

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur

Et de la recherche scientifique

Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen

Faculté des Sciences

Département de Physique

Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables

Mémoire

Présenté pour l'Obtention du diplôme de

MAGISTER

En Physique Energétique et Matériaux

Par

M^{me} GHENNOU Épouse BAKHTI Souad

ÉTUDE COMPARATIVE DES PARAMETRES PHYSIQUES DES MATERIAUX

PHOTOVOLTAÏQUES A BASE DE SILICIUM MONOCRISTALLIN ET

POLYCRISTALLIN

Soutenu le / / devant le jury composé de

Président : CHABANE SARI. N.E Professeur à L'Université de Tlemcen

Directeur de thèse : BENYOUCEF.B Professeur à L'Université de Tlemcen

Examineurs :

BENOUAZ.T Professeur à L'Université de Tlemcen

MERAD.A MC à L'Université de Tlemcen

BENSMINE.S MC à L'Université de Tlemcen

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 l'Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables (URMER) de la faculté des sciences.

Je voudrais particulièrement exprimer mes sincères reconnaissances et ma profonde gratitude à monsieur **B. BENYOUCEF**, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd- Tlemcen. ; qui tout au long de ce travail m'a apporté une aide des plus précieuses. L'aboutissement de cette étude lui doit beaucoup. Ses conseils judicieux, son esprit scientifique très vif et ses encouragements m'ont été très bénéfiques.

Mes remerciements vont également à monsieur, **N. E. CHAEBANE SARI** Professeur à l'Université Abou-bekr Belkaïd Tlemcen, pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie sincèrement monsieur **T. BENOUAZ** Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen et monsieur **A. MERAD** et madame **S. BENSMAINE** Maîtres de conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen d'avoir accepter de faire partie du Jury.

Dédicaces

A mes chers parents qui m'ont aidé à accomplir si bien mes études et qui ont assuré la prise en charge de ma fille quand j'étais à l'unité.

A mes frères et sœurs surtout à Abdelmoumen.

A la lumière de ma vie ma fille Fatima El Zohra.

A mon cher mari Amine.

A toute ma belle famille.

A tous mes proches et amis.

Table des matières

Table des matières

<u>Introduction générale</u>	1
<u>Chapitre I: Généralité photovoltaïques</u>	
I. Introduction	3
II. Les énergies renouvelables	3
II.1. Les énergies renouvelables, c'est quoi ?	3
II .2. Quelle est la place des ER ?	4
II.3. Les 5 familles énergies renouvelables	4
II.3.1. L'énergie solaire	4
II.3.2. L'énergie éolienne	5
II.3.3. L'énergie hydraulique	6
II.3.4. La biomasse	6
II.3.5. La Géothermie	7
II.4. Quel sera l'avenir des énergies renouvelables ?	8
III. Le photovoltaïque dans le monde	8
III.1. Pourquoi le photovoltaïque ?	8
III.2. Le solaire photovoltaïque	9
III.3. Le contexte mondial	9
IV. L'énergie photovoltaïque	11
IV.1. Historique	11
IV.2. Avantages et inconvénients	11
IV.2.1. Avantages	11
IV.2.2. Inconvénients	11

IV.3. Secteurs d'applications	12
V. Principe de l'effet photovoltaïque	12
VI. Les technologies photovoltaïques	13

Chapitre II : Fonctionnement et caractéristiques des cellules solaires

I. Introduction	14
II. Le rayonnement solaire	14
III. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	15
III.1 L'interaction photon/semiconducteur	15
III.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	17
IV. Cellule photovoltaïque	18
IV.1 Cellule photovoltaïque idéale	18
IV.1.1 Conversion photon-électron	18
IV.1.2 Courant de conversion	21
IV.2 Cellule réelle à jonction PN	21
IV.2.1 Jonction PN	21
IV.2.2 Polarisation de la jonction PN	22
IV.2.4 Caractéristique idéale et schéma équivalent	23
IV.2.5 Caractéristique réelle. Rendements	24
IV.3. Cellule photovoltaïque sous éclairage	27
IV.4. Cellule photovoltaïque sous obscurité	27
V. Paramètres des cellules photovoltaïques	28
V.1 Courant de court-circuit, I_{CC}	28
V.2 Tension à circuit ouvert, V_{OC}	28
V.3 Facteur de forme, FF	30
V.4. Le rendement η	30
V.5 Le rendement quantique, EQE	31
V.6 Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque	31

V.6. Réponse spectrale de la cellule photovoltaïque	32
VI. Facteurs limitant le rendement	34
VII. Structure des cellules photovoltaïques	36
VII.1 Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque	36
VII.2 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque	37
VII.2.1. Passivation des faces avant et arrière	38
VII.2.2. Couche antireflet	38
VII.2.3. Texturation de la surface	38
VII.2.4. Contacts face avant et arrière	39
VI.2.4. BSF	39

Chapitre III : Matériaux photovoltaïques à base de silicium

I. Introduction	41
II. Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque	41
II.1. Comment fabrique-t-on du silicium pur, des puces et des cellules solaires?	41
II.2. Structure cristalline du Si	41
II.3. Bandes d'énergie du Si	42
II.4. Semiconducteur intrinsèque	44
II.4.1. Concentration intrinsèque	44
II.4.2. Température intrinsèque	45
II.4.3 Différents types de dopage	45
II.4.3.1. Semi- conducteur dopé n	45
II.4.3.2. Semi-conducteur dopé p	46
II.4.4. Densité de charges dans un semi-conducteur	46
II.5. Génération et recombinaison des porteurs	47
II.5.1 Recombinaison en volume de type radiative	48
II.5.2 Recombinaison en volume de type Auger	48
II.5.3.Recombinaison par piège	49

a. Recombinaison en volume de type RSH	49
b. Recombinaison en surface	50
III. Rappels	50
III.1 Matériaux cristallins MC	50
III.2 Matériaux non-cristallins MNC	50
IV. Cellule à base de silicium cristallin massif	51
IV.1. Silicium solaire	51
IV.2. Silicium monocristallin	52
IV.3. Silicium multicristallin	52
IV.4. Silicium polycristallin	55
IV.5. Silicium nanocristallin et amorphe	56

Chapitre IV : Résultats de la simulation

Partie I : Logiciel de Simulation des caractéristiques électriques

I.1 Logiciel PC-1D	57
I.2. Aperçu du logiciel	57
I.3. Les paramètres du dispositif (Device)	58
I.4. Les paramètres des régions	58
I.5. Les paramètres d'excitation	59
I.6. Les résultats	59

Partie II : Simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin.

II.1. La caractéristique courant/ tension	60
II.2. La réponse spectrale	60
II.3. Influence des paramètres de la base sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et le rendement η	61
II.3.1. Les démarches suivies pour la simulation	61
II.3.2. Etude de l'influence des paramètres de la base	62

II.3.3. Interprétation des résultats	63
II.3.4. Valeurs de l'épaisseur et le dopage de la base pour obtenir un rendement optimale	63
I.4. Influence des paramètres de l'émetteur sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et le rendement η	63
II.4.1. Les démarches suivies pour la simulation	63
II.4.2. Etude de l'influence des paramètres de l'émetteur	64
II.4.3. Interprétation des résultats	65
II.4.4. Valeurs de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur pour obtenir un rendement optimal	66
II.5 .Effet de la couche BSF	66
II.5.1. Caractéristique I(V)	66
II.5.2. Réponse spectrale	67
II.6. Effet de la texturation	67
II.6.1.La caractéristique I(V)	67
II.6.2. Réponse spectrale	68

Partie III : Simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin.

III.1 .La caractéristique courant/tension	68
III.2. La réponse spectrale	69
III.3. Influence des paramètres de la base sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et le rendement η	69
III.3.1. Les démarches suivies pour la simulation	69
III.3.2. Etude de l'influence des paramètres de la base	70
III.3.3. Interprétation des résultats	71
III .3.4. Valeurs de l'épaisseur et le dopage de la base pour obtenir un rendement optimale	71
II.4. Influence des paramètres de l'émetteur sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et le rendement η	71
III.4.1. Les démarches suivies pour la simulation	71
III.4.2. Étude de l'influence des paramètres de l'émetteur	72
III.4.3. Interprétation des résultats	73

III.4.4. Valeurs de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur pour obtenir un rendement optimal	73
III.5. Effet de la couche BSF	74
III.5.1. Caractéristique I(V)	74
III.5.2. Réponse spectrale	74
III.6. Effet de la texturation	75
III.6.1. Caractéristique I(V)	75
III.6.2. Réponse spectrale	75

Partie IV : Etude comparative.

IV.1 Etude comparative entre les cellules à base de silicium monocristallin et à base de silicium polycristallin	76
IV.2. La caractéristique courant/tension	76
	77
IV.2. La réponse spectrale	
	77
IV.3. Conclusion	77

Conclusion générale

78

Introduction générale

Introduction générale

Face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz, charbon, etc.), en énergie d'origine thermonucléaire (Uranium, Plutonium,...), face aux multiples crises pétrolières, économiques, aux changements climatiques dus à l'effet serre, la science s'est tout naturellement intéressée aux ressources dites " renouvelables " et notamment vers la plus ancienne, le soleil, qui fournit chaque jour à la terre, par son rayonnement, l'équivalent de plusieurs milliers de fois la consommation énergétique totale de l'humanité pour ses activités d'aujourd'hui. Capturer cette énergie solaire et la transformer directement en électricité par effet photovoltaïque est une technologie en rapide évolution assurée par les ressources de l'électronique dans sa gamme d'éléments semi-conducteurs. [21]

L'énergie photovoltaïque obtenue grâce aux cellules solaires est de plus en plus considérée comme une source d'énergie qui peut contribuer à la production mondiale d'électricité tout en participant au développement durable.

Il existe actuellement plusieurs types d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, géothermique, éolienne, la bio-masse et le photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la Terre, ces énergies proviennent directement ou indirectement du Soleil.

Pour la première fois, le marché photovoltaïque de l'Union européenne a atteint les limites des capacités d'approvisionnement de la filière. Mais pour les années à venir, l'évolution du marché photovoltaïque dépendra de décisions politiques. Pour justifier de ce soutien, les industriels de la filière devront donc montrer leur capacité à réduire leurs coûts de production.

L'objectif est de se rapprocher le plus possible du coût du kilowattheure "fossile", qui lui ne cesse d'augmenter.

La connaissance intime et détaillée de la structure des cellules solaires méritera toute notre attention. Il y a fort à parier d'éviter des questions tels : Quels sont les matériaux utilisés dans la technologie des piles solaires? Quels sont les paramètres technologiques et optiques nécessaires pour la réalisation de cellules solaires ? [21]

Le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque est le silicium cristallin (abondant, facile à traiter, non toxique). Cependant, dans le coût du module, le prix du matériau intervient pour environ 50% et de nombreuses études visent donc à réduire les coûts relatifs à la préparation des substrats. [20]

De ce fait, de nombreux travaux de recherche et développement sont aujourd'hui en cours pour limiter la consommation de silicium. La technique de fabrication industrielle utilise des substrats de silicium d'environ 300 µm d'épaisseur pour des questions de résistance mécanique. Des études ont cependant montré que l'utilisation de substrats silicium monocristallins en couches minces d'une épaisseur de l'ordre de 50µm, permettrait potentiellement d'atteindre des rendements de conversion élevés, supérieurs à 20%. [19]

Le présent mémoire est organisé en 4 chapitres qui présentent, de manière générale les différentes filières des énergies renouvelables, les concepts de la technologie des cellules solaires ainsi que le matériau de base pour la fabrication des cellules solaires.

Dans le premier chapitre, on fait le tour d'horizon sur les sources des énergies renouvelables et spécialement l'énergie solaire photovoltaïque en tenant compte de leur technologie.

Le deuxième chapitre décrit dans un premier temps le fonctionnement et les caractéristiques de la cellule photovoltaïque en silicium. Nous y abordons le principe de conversion photovoltaïque, les paramètres caractéristiques de la cellule photovoltaïque ainsi que les différents facteurs limitant le rendement de conversion.

Le troisième chapitre présente le matériau de base pour la fabrication des cellules solaires, leurs propriétés physiques et chimiques et les cellules à base de silicium.

Dans le quatrième chapitre nous utilisons la simulation numérique à une dimension pour mettre en évidence les paramètres prépondérants pour l'obtention de rendements élevés pour les cellules photovoltaïques à base de silicium monocristallin et polycristallin.

En terminera par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités photovoltaïques

I. Introduction

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen de capteur relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière, énergie solaire photovoltaïque, qui fait l'objet de ce chapitre. Nous souhaitons à travers ce chapitre répondre aux questions de base qui se posent pour savoir les différentes filières des énergies renouvelables et particulièrement l'énergie solaire photovoltaïque.

II. Les énergies renouvelables

II.1. Les énergies renouvelables, c'est quoi ?

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne ; la lumière solaire excitant les photopiles ; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. Sans oublier ces végétaux, comme la canne à sucre ou le colza, grâce auxquels on peut produire des carburants automobiles ou des combustibles pour des chaudières très performantes. Tout cela constitue les énergies nouvelles et renouvelables, " ENR " pour les adeptes du jargon énergétique, et plus justement ER pour les seules énergies renouvelables.

En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau et la géothermie ne rejettent aucune pollution, lorsqu'elles produisent de l'énergie. La combustion de la biomasse génère certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que des carburants fossiles, tels que le charbon ou le fioul. [44]



II.2. Quelle est la place des ER ?

Globalement, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. Selon le dernier " Inventaire sur la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde ", réalisé par l'Observatoire des Énergies Renouvelables et EDF, 20 % du courant produit sur la planète est d'origine renouvelable. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole ou le charbon (62,7 %) et par l'énergie nucléaire (17,1 %).

Qu'un électron sur cinq soit " propre ", cela n'est déjà pas si mal. Mais ce chiffre encourageant masque une grande disparité entre les sources d'énergies renouvelables. À elle seule, l'hydroélectricité génère 92,5 % de l'électricité issue des ER. Les utilisations de la biomasse produisent 5,5 % du courant mondial " vert ", la géothermie 1,5 %, l'éolien 0,5 % et les techniques solaires y contribuent seulement pour 0,05 %.

Toutefois, ces grandes masses sont extrêmement variables d'un pays à l'autre. Tout est, en effet, fonction des gisements d'ER. Ainsi, 99,2 % de l'électricité de Norvège (pays de montagnes et d'eau) est générée par les barrages. Quelle ironie pour un pays par ailleurs producteur de pétrole ! À l'inverse, les Pays-Bas, nation ô combien sensible aux questions environnementales, utilisent très marginalement les ER pour produire leur courant : moins de 5 % [44]

II.3. Les 5 familles énergies renouvelables

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois. Le solaire (solaire photovoltaïque, solaire thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies flux inépuisables par rapport aux « énergies stock » tirées des gisements de combustibles fossiles en voie de raréfaction : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel. Entrez dans l'univers des énergies renouvelables : Quelles sources d'énergies ? Pour quels besoins ? Comment les capter, les transformer ? Sous quelle forme les utiliser ? [45]

II.3.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire a directement pour origine l'activité du Soleil. Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel on trouve notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique émettent de l'énergie. Le niveau d'irradiance (le flux énergétique) arrivant à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire. [46]



II.3.2. L'énergie éolienne

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Ces derniers sont notamment caractérisés par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique.

Des voiliers ont été utilisés dès l'Antiquité, comme en témoigne la Barque solaire de Khéops. Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, l'essentiel des déplacements nautiques à moyenne et longue distance ce sont faits grâce à la force du vent. Un dérivé terrestre n'ayant d'usage que sportif a été rendu possible par les techniques modernes : le char à voile.

L'énergie éolienne a aussi été vite exploitée à l'aide de moulins à vent équipés de pales en forme de voile, comme ceux que l'on peut voir aux Pays-Bas ou encore ceux mentionnés dans Don Quichotte. Ces moulins utilisent l'énergie mécanique pour actionner différents équipements. Les moulins des Pays-Bas actionnent directement des pompes dont le but est d'assécher ou de maintenir secs les polders du pays. Les meuniers utilisent des moulins pour faire tourner une meule à grains. Aujourd'hui, ce sont les éoliennes qui prennent la place des moulins à vent. Les éoliennes transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, soit pour l'injecter dans un réseau de distribution soit pour être utilisé sur place (site isolé de réseau de distribution). [46]



II.3.3. L'énergie hydraulique

À l'instar de l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique tire son origine dans les phénomènes météorologiques et donc du Soleil. Ces phénomènes prélèvent de l'eau principalement dans les océans et en libèrent une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. De l'eau en altitude possède une énergie potentielle de pesanteur. Cette énergie est peut être alors captée et transformée, lors des mouvements de l'eau qui retourne vers les océans. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettait de capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines-outils (machines à tisser, moulins à moudre le blé...).

Plus tard, avec l'invention de l'électricité, on a transformé cette énergie mécanique en énergie électrique.

Autres énergies hydrauliques :

- Énergie des vagues : utilise la puissance du mouvement des vagues,
- Énergie marémotrice : issue du mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée),
- Énergie hydrolienne : Les hydroliennes utilisent les courants sous marins,
- Énergie thermique des mers : produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans,
- Énergie osmotique : La diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer est source d'énergie. [46]



II.3.4. La biomasse

Ce terme générique désigne, en fait, toute matière d'origine organique. Dès lors, les utilisations énergétiques de la biomasse recouvrent un grand nombre de techniques. Globalement, on peut utiliser la biomasse de trois façons différentes : en la brûlant, en la faisant pourrir ou en la transformant chimiquement.

1. La brûler, c'est s'en servir comme d'un combustible de chaudière. On utilise aussi bien des déchets de bois, de récoltes que certains déchets, comme les ordures ménagères, les déchets industriels banals ou certains résidus agricoles.

2. En se décomposant, sous l'effet des bactéries, certains déchets putrescibles (comme certaines boues de stations d'épuration des eaux usées ou la fraction organique des déchets ménagers, les épluchures par exemple) produisent du biogaz. Ce mélange de gaz est en majorité composé de méthane, utilisable, une fois épuré, pour alimenter, lui aussi, des chaudières ou des véhicules fonctionnant au GNV (Gaz Naturel Véhicule).
3. Enfin, certaines cultures, comme le colza, les betteraves ou certaines céréales, telles que le blé, peuvent être transformés en biocarburant. L'huile de colza transformée est un excellent substitut au gazole. Alors que la transformation chimique des céréales ou de la betterave peut fournir de l'ETBE, un additif qui, ajouté à l'essence, permet de réduire certaines émissions polluantes de nos voitures.

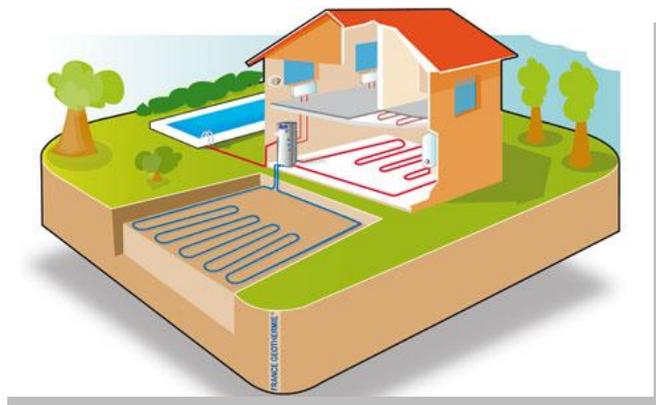
Comprend trois familles principales :

- Les bois énergie ou biomasse solide
- Le biogaz
- Les biocarburants. [44]



II.3.5. La Géothermie

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C). [47]



II.4. Quel sera l'avenir des énergies renouvelables ?

Bien malin celui qui pourrait répondre avec certitude à cette question. Certes, les années qui viennent s'annoncent prometteuses pour les énergies propres. Entre 1993 et 1998, les capacités " renouvelables " mondiales ont crû de 2,4 % par an. La lutte contre le changement climatique, le développement de la production d'électricité décentralisée et le progrès technique devraient donner un formidable coup de fouet à ces jeunes filières. Toutefois, de nombreux experts, à l'instar de Jean-Marie Chevalier, professeur à l'université Paris Dauphine et spécialiste en géopolitique de l'énergie, estiment que la part des renouvelables, même si elle augmentera dans les années qui viennent, restera globalement faible. D'une part, parce que les ressources d'énergies fossiles sont encore considérables : 40 ans de réserves prouvées de pétrole, 62 ans pour le gaz, 400 ans pour le charbon. D'autre part, parce que les ER resteront probablement toujours plus chères que les énergies classiques, tant le prix de ces dernières n'intègre pas leurs coûts environnementaux. Aussi est-il important, pour préserver notre environnement, de veiller dès à présent à réduire notre consommation d'énergie. Selon une étude réalisée par le ministère de l'Économie en mars 2000, cette consommation augmentera chaque année de 1,4% par an, si rien n'est fait. Frappée par la plus grave crise énergétique de son histoire, la Californie espère réduire le nombre de coupures de courant en faisant adopter par les Californiens des gestes simples qui permettent de réaliser de substantielles économies. Des petits réflexes que nous pouvons tous également adopter, pour le plus grand bénéfice de la planète. [44]

III. Le photovoltaïque dans le monde

III.1. Pourquoi le photovoltaïque ?

Il ne s'agit pas de rêver d'une électricité produite à 100 % par le photovoltaïque ou d'entrer dans une logique de concurrence vis-à-vis des autres formes d'énergies (renouvelables ou non).

Disposer de nombreuses alternatives que ce soit l'énergie éolienne, hydraulique, nucléaire ou photovoltaïque est au contraire un avantage. Le photovoltaïque peut en revanche apporter une part substantielle de la production électrique en remplacement notamment d'une production fortement émettrice de gaz à effet de serre (centrale électrique au gaz par exemple). Il peut aussi alléger la dépendance énergétique du pays. Enfin, il crée une véritable dynamique d'emplois et de croissance dans le pays beaucoup plus que d'autres formes d'énergies. Le cas de la « sun valley » en Allemagne est emblématique. Un objectif envisageable mais ambitieux serait, en France, de produire 5 % d'électricité photovoltaïque.

Le photovoltaïque souffre d'un grand nombre d'idées reçues. Certaines confinent même aux mythes voire à l'acharnement. Citons les principales. [18]

III.2. Le solaire photovoltaïque

La montée en puissance de l'énergie photovoltaïque résulte donc de cette prise de conscience née de la nécessité de préserver les ressources naturelles tout en assurant le mieux être de la population mondiale. Elle devient aujourd'hui une réalité industrielle et économique qui doit relever les défis technologiques avec essentiellement pour régulateurs, des impératifs économiques et budgétaires.

Indépendamment des points communs avec les autres énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque présente plusieurs autres avantages. Tout d'abord, elle est relativement bien répartie à la surface du globe et facilement disponible, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. De plus, les panneaux photovoltaïques exigent peu d'entretien, sont fiables et ont une relativement longue durée de vie (25 ans), ce qui rend leurs coûts de fonctionnement très faibles.

Enfin, la technologie photovoltaïque, dominée par le silicium, présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne pas de perturbations du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. Cependant, avec une intégration correcte dans les bâtiments, l'intrusion visuelle du photovoltaïque peut être minimale.

Jusqu'en 1997, la technologie modulaire photovoltaïque se limitait aux applications professionnelles (bornes téléphoniques, télédétection, alarme, relais télécom, etc...), ce qui assurait un développement de la technologie. Mais, avec des taux de croissance de 15% par an, il aurait fallu encore attendre 2015 pour que la production mondiale annuelle atteigne 1000 MW/an. Autrement dit, la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire serait restée un procédé nouveau, ou au mieux l'énergie pour les sites isolés quand on n'a pas le choix.

III.3. Le contexte mondial

La production d'électricité photovoltaïque reste cependant plus chère que l'électricité classique. Mais les prix sont en baisse continue, grâce entre autres à des subventions européennes ou locales. Ainsi le marché européen a montré toute sa solidité en 2005. 645 MWc de photopiles ont été installés dans les pays de l'Union européenne contre 546 MWc en 2004 (+ 18,2 %). L'Allemagne était toujours en 2005 le premier marché mondial du photovoltaïque, loin devant le Japon et les États-Unis, avec plus de 600 MWc installés. Cette réussite insolente a inspiré l'Espagne et l'Italie qui ont mis en place les conditions d'un développement rapide de leur filière photovoltaïque.

Notons enfin que si les 10 000 km² de toitures existantes en France étaient couvertes de panneaux solaires, la production d'électricité serait de 1 000 TWh par an soit près du double de la consommation intérieure brute actuelle (516,4 TWh en 2004).

L'évolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques (Figure I-1) subit la même ascension qu'en Europe pour passer de 1195 MWc en 2004 à 1727 MWc en 2005 soit une croissance de 44,5 %.

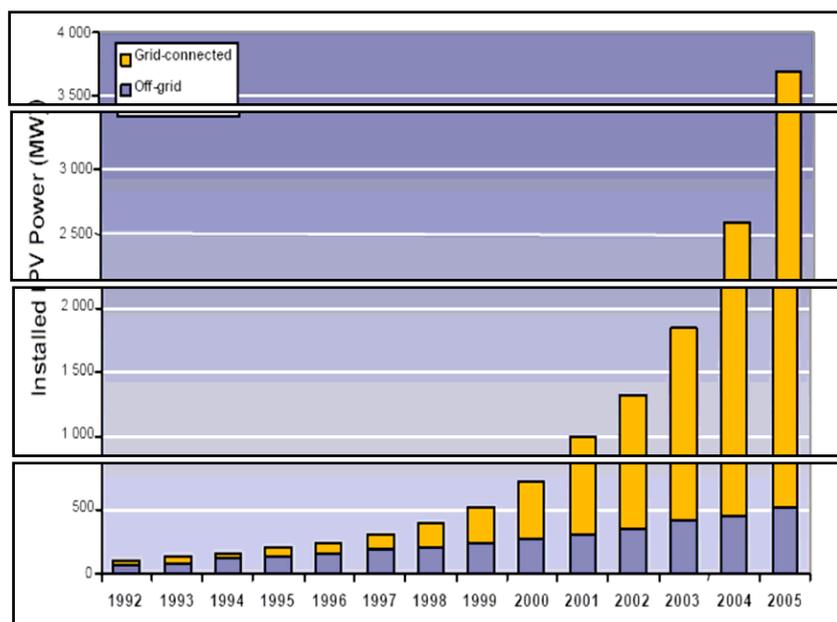


Figure I-1 : Evolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques en MWc. [30]

Cette croissance est cependant réfrénée par le manque actuel de silicium. Les industriels recherchent des moyens efficaces de diminuer leurs coûts de production en essayant notamment de baisser la consommation de silicium qui représente une part substantielle du prix total du panneau. L'utilisation de silicium en couche mince présente ainsi de réels avantages économiques qui sont à l'origine de mon sujet de recherche.

Les projections les plus courantes prévoient un marché annuel de l'ordre de 6 GWc pour l'année 2010, et entre 15 et 21 GWc pour 2020 [31]. Cependant, cette croissance suppose que l'industrie photovoltaïque garantisse ses approvisionnements de silicium avec les fabricants de ce semi-conducteur.

En effet, en 2004 l'industrie photovoltaïque avait consommée 13000 tonnes de silicium. Au rythme de croissance actuel, le photovoltaïque devrait devenir le premier consommateur de silicium devant la micro-électronique, à l'horizon 2015 (avec 150000 tonnes).

Pour faire face à cette croissance, la recherche dans ce domaine s'oriente sur deux axes essentiels, qui peuvent sembler opposés : augmenter le rendement des cellules, tout en diminuant les coûts de production et plus précisément la quantité de silicium consommé par watt produit. [19]

IV. L'énergie photovoltaïque

IV.1. Historique

C'est en 1839 que le physicien français Edmond Becquerel découvre que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière.

Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912 Mais ce n'est qu'en 1954 que la première cellule photovoltaïque a été mise au point par des chercheurs du laboratoire Bell aux USA. Cette première cellule PV était en silicium et avait un rendement de 4,5% [1].

IV.2. Avantages et inconvénients

IV.2.1. Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rend 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 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.

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.

IV.2.2. 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.

IV.3. Secteurs d'applications

- ❖ Domaine spatial
- ❖ Habitation isolée
- ❖ Industrie isolée
- ❖ Centrale de puissance
- ❖ Résidence urbaine
- ❖ Biens de consommation [44]

V. Principe de l'effet photovoltaïque [32, 2,3]

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- L'absorption de photons
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur

Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué [4] :

- d'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie ;

- et d'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible possible.

L'optimisation de ce dispositif passe par une gamme de fréquence absorbante la plus large possible, couvrant la partie la plus dense du spectre solaire ; ainsi qu'une différence d'énergie entre deux niveaux de transition la plus petite qu'il soit. Leur structure de bande (interdite et de conduction) fait des semi-conducteurs le meilleur compromis pour la réalisation des cellules solaires. On en trouve actuellement en arséniure de gallium pour les applications spatiales, en silicium cristallin pour les applications terrestres et en silicium amorphe pour des cellules bas coût.

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption de photons donnant lieu à la création de paires électron-trou. Un champ électrique permanent, au sein du matériau, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison [5]. Ce champ peut être généré de plusieurs manières : par la jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents (hétérojonctions), soit par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diodes Schottky), ou encore à l'interface de zones d'un même semiconducteur dont les concentrations en électrons libres sont différentes (homojonctions ou jonction p-n).

Enfin, le couplage de ce dispositif avec des électrodes collectrices ou grilles, en face avant et arrière, permet la connexion de la cellule à un circuit électrique externe. Cette grille métallique doit

présenter une résistance de contact petite en comparaison avec les différentes résistances du dispositif (résistance de base et de front). [19]

VI. Les technologies photovoltaïques

L'industrie photovoltaïque est concentrée à près de 99% [31] sur l'utilisation du silicium comme matériau de base (Figure I-9). Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages : il est abondant à la surface du globe car facilement extrait à partir du sable ; il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs II-VI ; il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés isolantes et passivantes et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,12 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct : pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 80 μm pour le silicium, alors que seulement 1 μm de GaAs suffit. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV) : le GaAs, avec une largeur de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements plus élevés (>30%).

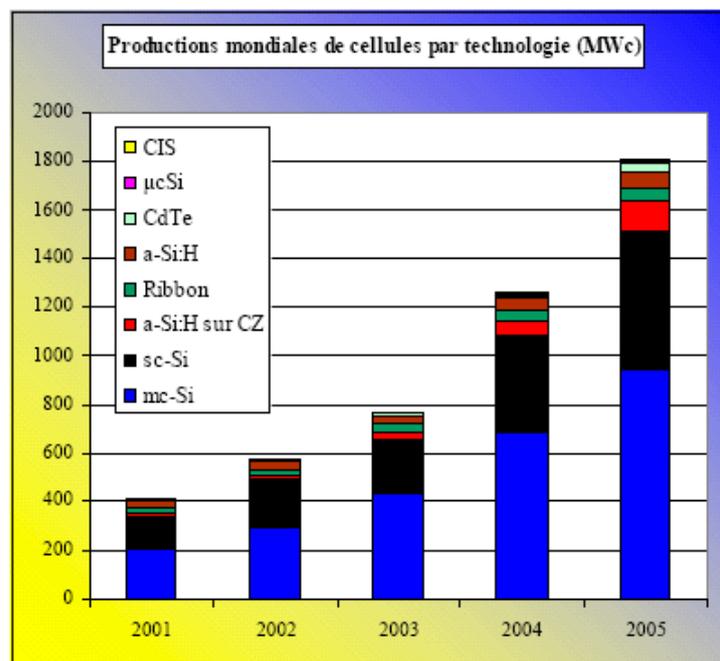


Figure I-9 : Production mondiale de cellules par technologie MWc (2001-2005)

Dans l'histogramme de la figure I-9, le silicium multicristallin voit sa part relative diminuer de 54.5 à 52.3%, le monocristallin voit sa part augmenter de 36.5 à 38.7% (en y incorporant la technologie HIT de Sanyo qui utilise à la fois du sc-Si et du a-Si :H. En y incorporant la technologie HIT, le silicium amorphe voit sa part augmenter de 8.8 à 10.9%. Le ruban ne décolle pas (passant de 3.3 à 2.9%). Pas plus que le $\mu\text{c-Si}$ (0.7%) [31]

Chapitre II

Fonctionnement et caractéristiques des cellules solaires

I. Introduction

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, ses caractéristiques et ses limitations et en fin la structure des cellules ainsi ces constituants de base.

1I. Le rayonnement solaire

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée : le soleil. La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800 K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5 μm pour une puissance d'environ 60 MW/m², soit un total de $9,5 \cdot 10^{25}$ W. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de 1,36 kW/m² hors atmosphère.

Cette irradiance est pondérée par divers facteurs à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et saison. Des gaz comme l'ozone (O₃), pour des longueurs d'ondes inférieures à 0,3 μm , le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O), pour les infrarouges au dessus de 2 μm , absorbent les énergies proches de leur énergie de liaison, ce qui conduit à des «trous» dans le spectre solaire visible au sol. Par ailleurs, les poussières et aérosols présents dans l'atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente. Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Masse (AM). Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (II.1)$$

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta=0^\circ$, AM=1 : la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiance de 970 W/m², mais a été arrondi à 1kW/m². L'intensité ID reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante:

$$I_D = 1,353 \cdot (0,7^{AM})^{0,678} \quad (II.2)$$

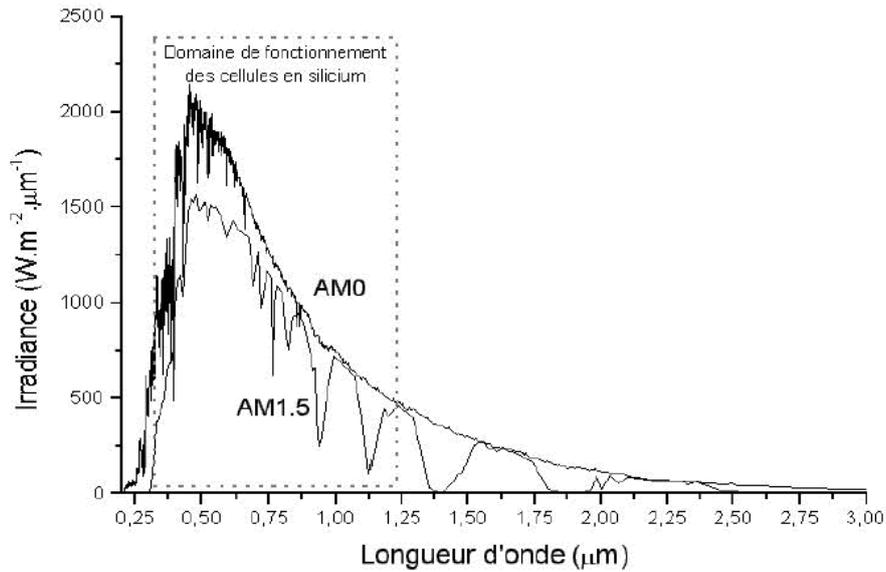


Figure II-1 Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 d'après. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.

Il apparaît que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge. Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques, et de l'altitude du lieu. [33]

III. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

III.1 L'interaction photon/semiconducteur

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou *gap*, représente une caractéristique fondamentale des semiconducteurs. La figure II-2 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (figure II-2 (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semiconducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure II-2 (b)). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV (soit 365 nm).

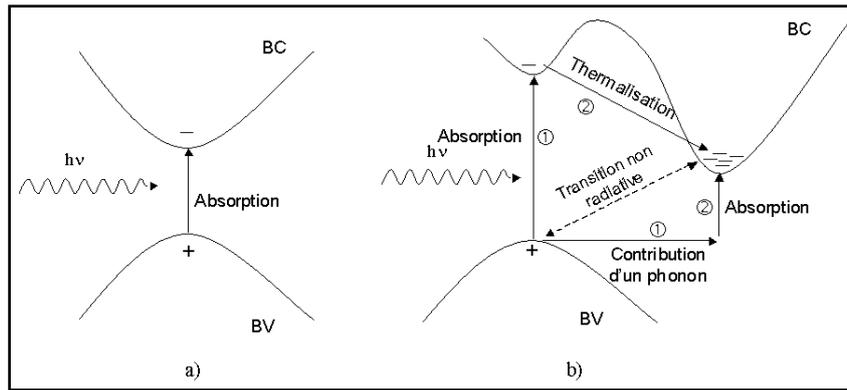


Figure II-2 Transitions inter-bandes d'électrons dans un semiconducteur. Le cas a) correspond à un semiconducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect. [33]

L'interaction entre les photons et un semiconducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure II-3 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition.

L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

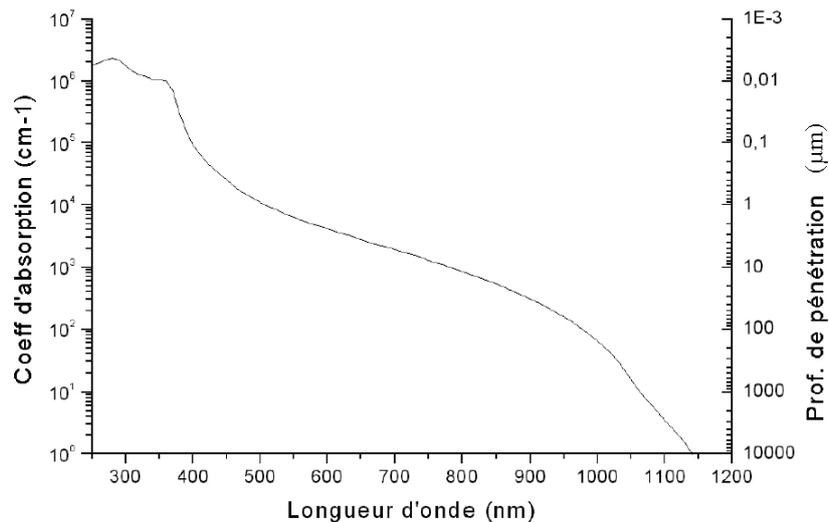


Figure II-3 Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde, d'après. [20]

L'interaction photon/électron au sein du semiconducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau.

Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photogénérés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur. [3]

III.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semiconducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semiconducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure II-4 :

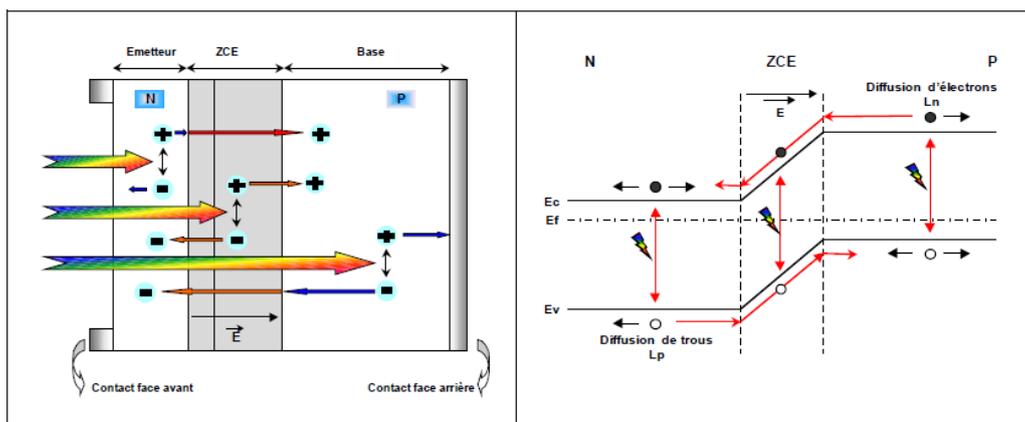


Figure II-4 Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. [19]

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région :

- 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 majoritaires.

On aura un photocourant 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 photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse. [3]

IV. Cellule photovoltaïque

IV.1 Cellule photovoltaïque idéale [7], [21]

IV.1.1 Conversion photon-électron

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant une énergie donnée par la relation :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (II. 3)$$

avec :

- $E(J)$ énergie,

- (m) longueur d'onde (souvent exprimée en micromètres),

- (Hz) fréquence.

Les physiciens du solide expriment généralement l'énergie E des photons en électronvolts (eV) et 10 années d'observations dans l'espace en conditions *AMO* ont permis d'établir une relation directe entre l'énergie d'un photon exprimée en électronvolts et sa longueur d'onde exprimée en micromètres :

$$E(eV) = \frac{1,2419}{\lambda(\mu m)} \quad (II. 4)$$

Le flux de photons par seconde et par centimètre carré $N(\lambda)$ de longueur d'onde λ est donné par la relation :

$$N_{(\lambda)} = M_{\lambda} \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (II.5)$$

avec :

- $N_{(\lambda)}$ ($cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$) flux de photons,
- $d_{\lambda}(m)$ tranche de longueur d'onde (de largeur $1\mu m$ en général : largeur spectrale normalisée).

La figure II.5 donne un exemple de flux de photons pour une atmosphère peu polluée. Aux limites du spectre visible, on a :

$\lambda = 0,4\mu m, E = 3,10 eV$; N varie entre 1 et $3 \cdot 10^{17}$ photons (ultraviolet),

$\lambda = 0,78\mu m, E = 1,59 eV$; N varie entre 3 et $5 \cdot 10^{17}$ photons (infrarouge).

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite que :

- les photons soient absorbés par le matériau (absorption optique) en transmettant leur énergie au matériau,
- l'énergie transmise aux électrons soit une énergie potentielle et non une énergie thermique,
- les électrons excités par les photons soient collectés avant de reprendre leur énergie initiale (relaxation), afin de fournir un courant électrique.

La structure périodique des atomes dans un solide entraîne des bandes d'énergies interdites pour l'électron et chaque matériau est caractérisé par une largeur de bande interdite (gap) exprimée en eV dont la valeur détermine la nature du matériau (conducteur, semi-conducteur, isolant). Si E_v est l'énergie maximale de la première bande d'énergies autorisées (bande de valence) et E_c l'énergie minimale de la seconde bande d'énergies permises (bande de conduction), la largeur de la bande interdite E_g du matériau est donnée par :

$$E_g = E_c - E_v \quad (II.6)$$

Sous certaines conditions, les photons dont l'énergie est supérieure à E_g peuvent faire passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction laissant ainsi un trou dans la bande de valence. L'électron et le trou ainsi libérés doivent rapidement être collectés pour participer ensuite à la conduction électrique avant leur recombinaison.

À partir de ces quelques éléments de la physique du solide, on peut définir les critères d'un convertisseur idéal photon-électron :

- le dispositif de collecte nécessite un champ électrique important au niveau de la création des paires électron-trou, ce qui élimine les conducteurs dont la différence des niveaux de Fermi

est trop faible. Il nécessite en outre des matériaux à conductivité suffisante, ce qui élimine les isolants,

- le matériau semi-conducteur dont la largeur de bande interdite est comprise entre $0,7$ et $4 eV$ est un matériau photovoltaïque du spectre solaire.

La jonction PN sous éclairage, caractérisée par une barrière de potentiel importante au niveau de la jonction et réalisée à partir de matériaux semi-conducteurs photovoltaïques, est la solution actuellement la plus répandue de convertisseur photovoltaïque.

Le principe de la conversion photon-électron à deux niveaux d'énergie pour la cellule photovoltaïque idéale : est donné par :

- tout photon d'énergie inférieure à E_g n'est pas absorbé et traverse le matériau sans transmettre d'énergie aux électrons,
- tout photon d'énergie supérieure ou égale à E_g est totalement absorbé et crée une paire électron-trou,
- tout électron créé participe à la conduction (pas de recombinaison),
- la tension de sortie de cette cellule élémentaire idéale est E_g/q avec q charge de l'électron ($q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$).

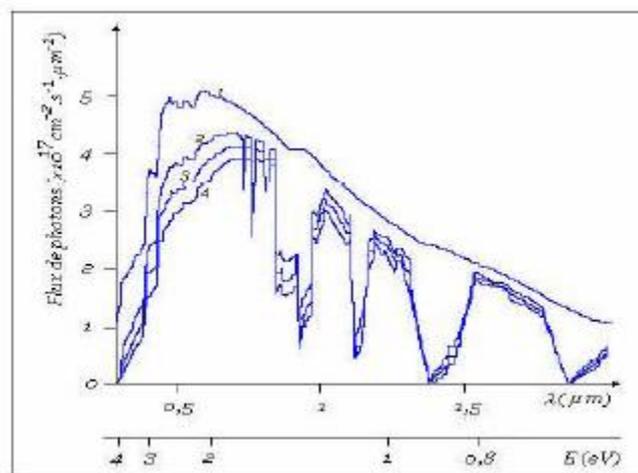


Figure II.5 : Flux de photons.

IV.1.2 Courant de conversion

On peut aisément calculer le courant de conversion d'une cellule idéale à partir de la Figure II.5 et des hypothèses précédentes. Par exemple, un faisceau incident d'énergie centrée autour de $1,1 eV$ et de largeur spectrale $1 eV$ est composé d'un flux de $3,2 \cdot 10^{17}$ photons par centimètre carré et par seconde dans les conditions $AM0$ (hors atmosphère). Avec un rendement quantique de 1 , c'est également le flux d'électrons, d'où un courant (en multipliant par la charge de l'électron) de $51,2 mA/cm^2$ et par micromètre de largeur spectrale. Pour obtenir des valeurs théoriques correspondant au spectre solaire, on prend généralement des

tranches spectrales de largeur 25 meV et on calcule, pour chacune de ces tranches, le courant produit. [6]

IV.2 Cellule réelle à jonction PN [22], [23]

IV.2.1 Jonction PN

Elle résulte de la juxtaposition dans un même matériau semi-conducteur de deux zones; l'une de type P (majoritaire en trous, minoritaire en électrons) et l'autre de type N (majoritaire en électrons, minoritaire en trous). Dès la juxtaposition, des courants de diffusion de trous et d'électrons se développent autour de la jonction et créent, au voisinage immédiat de celle-ci, une barrière de potentiel qui s'oppose aux courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone. Lorsque l'équilibre est atteint, le champ électrique créé par la barrière de potentiel est suffisant pour équilibrer les courants de diffusion des porteurs majoritaires et des porteurs minoritaires, par suite de la largeur très faible de la jonction (de $0,2$ à quelques micromètres), d'où un courant global de diffusion nul. Les niveaux d'énergie au voisinage de la jonction sont alors donnés par la figure II.6

Au niveau de la jonction, la bande d'énergie est centrée autour du niveau de Fermi E_F , et il existe, autour de cette énergie, une largeur de bande interdite séparant la bande de valence et la bande de conduction. Pour créer un courant dans la jonction PN , il est nécessaire:

- soit d'abaisser la barrière de potentiel en polarisant la jonction (effet utilisé pour les diodes de redressement),
- soit d'apporter une énergie supplémentaire aux porteurs dans la bande de valence (énergie thermique, énergie lumineuse, etc.),
- et de collecter rapidement les charges ayant traversé la bande interdite avant leur recombinaison.

Remarquons que, si la température augmente, les électrons remplissent progressivement tous les états d'énergie et peuvent, pour une température donnée, annuler la bande interdite donc l'effet jonction PN (cas du silicium à $400 \text{ }^\circ\text{C}$). Cette remarque est importante pour les cellules photovoltaïques à jonction PN dont le rendement diminue avec l'élévation de la température.

IV.2.2 Polarisation de la jonction PN

Si l'on polarise une jonction PN , on obtient la caractéristique $I_d = f(V)$ donnée sur la figure 21. Le modèle mathématique associé à cette caractéristique est donné par :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V}{\eta V_T}\right) - 1 \right) \quad (II.7)$$

avec

- I_s (A) courant d'obscurité des porteurs minoritaires (saturation),
- V_T (V) potentiel thermique (25 mV à 20°C) ($V_T = KT/q$),
- η coefficient dépendant du matériau (facteur d'idéalité),
- $\eta = 1$; $I_s = 5\text{ A}$ à $T = 300\text{ K}$ pour le germanium,
- $\eta = 2$; $I_s = 10\text{ nA}$ à $T = 300\text{ K}$ pour le silicium aux courants faibles,
- $\eta = 1$ pour le silicium aux courants forts (photopiles au Si, nous prendrons $\eta = 1$).

En polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et un courant de porteurs majoritaires important peut se développer. En polarisation inverse, le courant de porteurs minoritaires est très faible et varie très peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage (diode Zener). Ce courant inverse est par contre très sensible à la température au niveau de la jonction.

La tension directe V aux bornes de la jonction varie peu à partir d'un seuil dont la valeur dépend du matériau ($0,1$ à $0,3\text{ V}$ pour Ge; $0,5$ à $0,8\text{ V}$ pour Si).

La jonction PN en fonctionnement récepteur (puissance absorbée $P = VI_d$ positive) est décrite par les quadrants I et III de la figure II.7

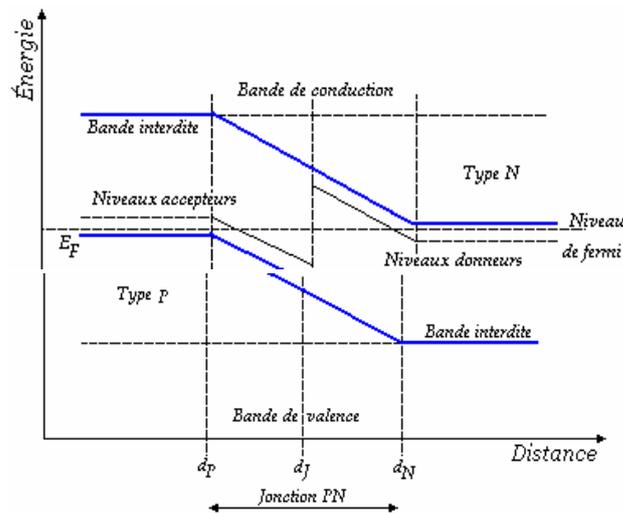


Figure II.6 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.

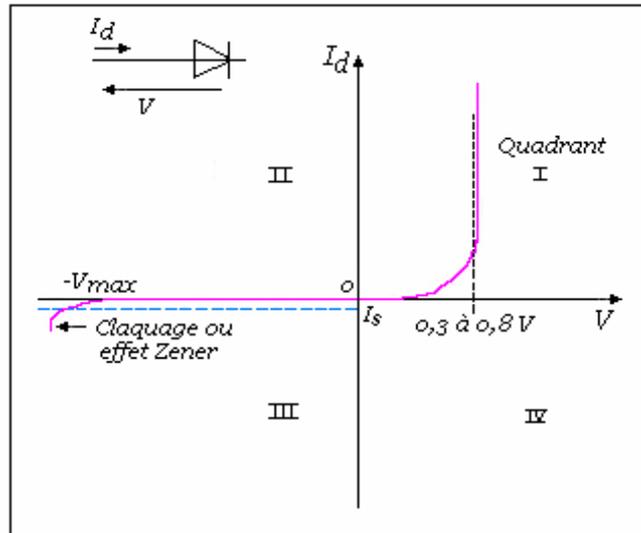


Figure II.7 : Caractéristique d'une jonction PN polarisée.

IV.2.4 Caractéristique idéale et schéma équivalent

Dans ce nouveau repère, l'équation d'une caractéristique correspondant à un éclairement E en $W. m^{-2}$ est donnée par [34] :

$$I_p = I_{cc} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV_p}{\eta kT}\right) - 1 \right) \quad (II.8)$$

où I_{cc} représente le courant de court-circuit dû à l'éclairement E

Selon une idée très répandue dans la littérature concernant les cellules solaires, il y aurait un lien entre la tension en circuit ouvert (V_{oc}) et le courant de saturation de la diode (I_s). Selon cette idée, une valeur élevée de V_{oc} correspondrait à une basse valeur de I_s :

$$I_s = I_{cc} \left(\exp\left(\frac{qV_{oc}}{\eta kT}\right) - 1 \right) \quad (II.9)$$

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque déduit de l'équation (14) est donné par la figure II.8 et comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN .

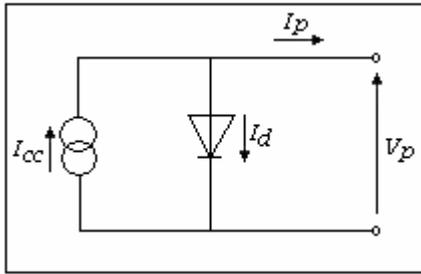


Figure II.8 : Schéma équivalent de la cellule idéale.

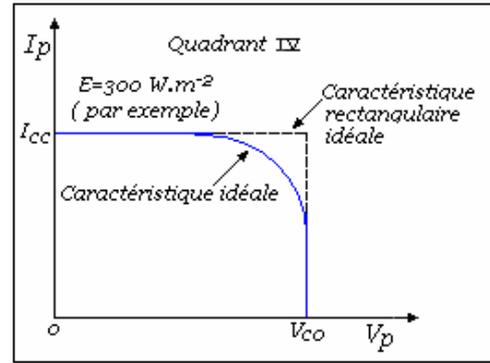


Figure II.9 : Caractéristique I_p - V_p d'une cellule idéale.

IV.2.5 Caractéristique réelle. Rendements

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dus à la fabrication et représentés sur le schéma équivalent par deux résistances; une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions, et une résistance R_{sh} (shunt) en parallèle sur le générateur de courant qui caractérise les divers courants de fuite dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Si V est la tension aux bornes de la jonction, l'équation caractéristique de la cellule réelle est alors donnée par :

$$I_p = I_{cc} + I_d + \frac{V}{R_{sh}} \quad (II.10)$$

$$V = V_p + R_s \cdot I_p \quad (II.11)$$

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure II.10. Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.

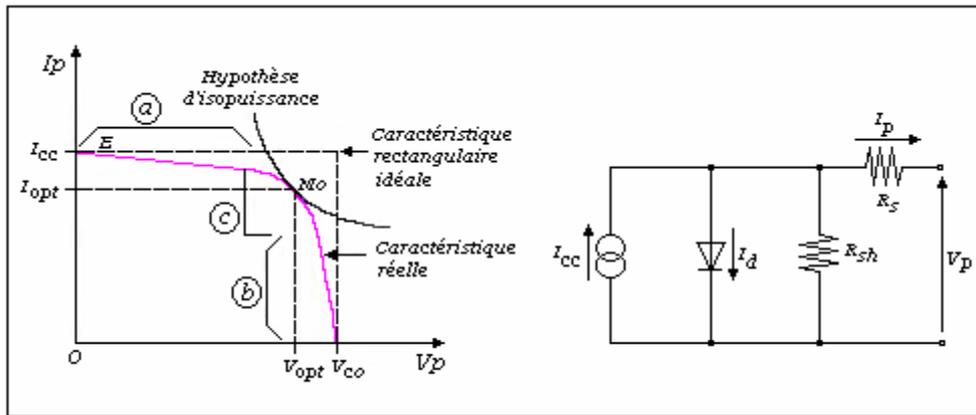


Figure II.10 : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

La caractéristique se divise en trois parties :

- la zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement,
- la zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} ,
- la zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

La cellule photovoltaïque est un générateur de puissance finie dont le maximum pour un éclairement donné est situé en MO de coordonnées V_{opt} et I_{opt} correspondant au point de contact avec l'hyperbole d'isopuissance. La figure II.11 donne le réseau de caractéristiques réelles paramétrées en éclairement. L'influence de la température sera précisée au niveau du module photovoltaïque. Le rendement de la cellule dépend du matériau utilisé et des pertes.

Le choix du matériau résulte d'un compromis entre la tension de sortie de la cellule liée à la largeur de la bande interdite E_g (tension de sortie E_g/q) et le nombre et l'énergie des photons du rayonnement solaire. À partir des courbes caractéristiques du rayonnement solaire et du calcul du courant de la cellule idéale, on a tracé le rendement théorique (figure II.12) qui présente un maximum de l'ordre de 43 % pour des largeurs de bande interdite E_g de 1 à 1,5 eV. Le silicium avec 1,1 eV reste encore actuellement le matériau le plus utilisé. Ce compromis tient compte des pertes dues à l'absorption incomplète des photons et à l'excès d'énergie des photons très énergétiques (ultraviolet). D'autres facteurs diminuent encore le rendement de la cellule réelle comme :

- la recombinaison électron-trou (rendement de collecte) ;
- la forme de la caractéristique réelle qui n'est pas rectangulaire (facteur de courbe),
- la tension de sortie réelle inférieure à la tension E_g/q (facteur de tension),
- les résistances série et shunt,

- la réflexion à la surface du matériau ou de son encapsulage.

Le rendement des cellules industrielles au silicium reste encore faible (inférieur à 15 %), mais de grands espoirs sont permis grâce à l'obtention en laboratoire de rendements supérieurs à 25 % avec des matériaux (*AsGa*) et des technologies différentes (multicouches).

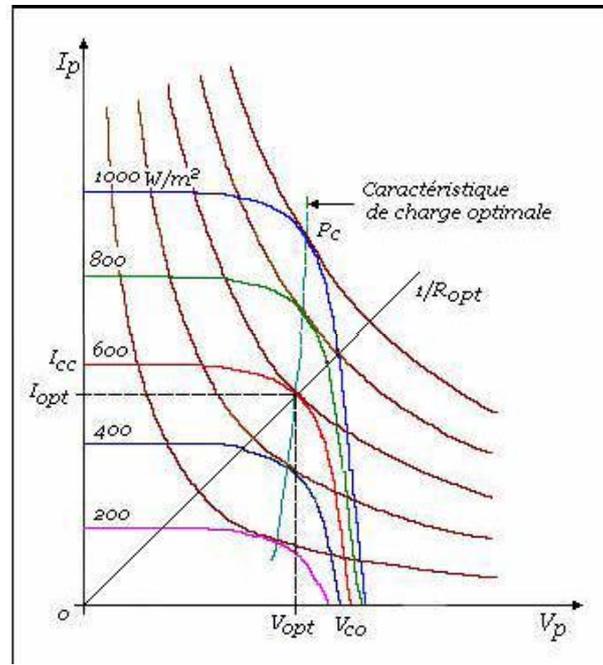


Figure II.11 : Exemple de réseau de caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

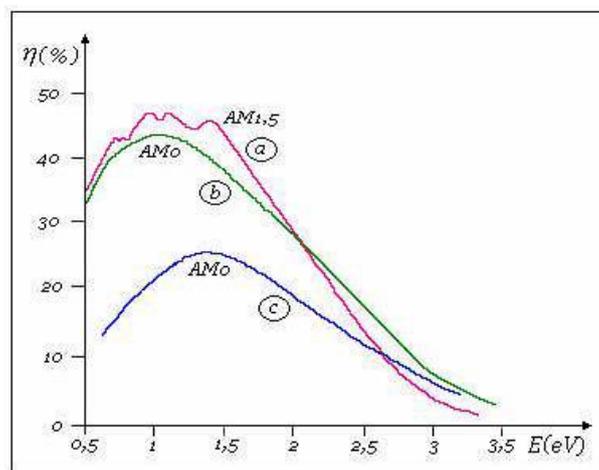


Figure II.12 : Rendement théorique de la cellule idéale.

IV.3. Cellule photovoltaïque sous éclaircissement

Les photons incidents vont générer des paires électron-trou dont le comportement va différer selon la zone d'absorption :

- Dans la zone de charge d'espace (ZCE) engendrée par la jonction $p-n$, les paires électron-trou créées sont dissociées par le champ électrique. Les électrons sont accélérés puis injectés dans la zone n (émetteur) et les trous dans la zone p (base). Un photocourant de génération est créé.
- Dans les zones de base et d'émetteur, les porteurs minoritaires générés (trous dans l'émetteur et électrons dans la base) vont diffuser vers la ZCE. S'ils atteignent cette dernière avant de se recombiner, ils sont injectés dans la zone n pour les électrons et dans la zone p pour les trous et deviennent majoritaires.

Un photocourant de diffusion est créé.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le photocourant de porteurs minoritaires résultant I_{ph} . Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

IV.4. Cellule photovoltaïque sous obscurité

Le courant dans une telle structure de type jonction $p-n$ est appelé courant d'obscurité et a la forme suivante :

$$I_{obs} = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (II.12)$$

Avec : $q = \text{charge élémentaire} = 1.6.10^{-19} C$

$V = \text{tension aux bornes de la jonction (V)}$

$k = \text{constante de Boltzmann} = 1.38.10^{-23} J.K^{-1}$

$T = \text{température (K)}$

$I_s = \text{courant de saturation inverse de la jonction } p-n$

$\eta = \text{coefficient d'idéalité de la jonction}$

Ce courant d'obscurité correspond au **courant de diode** (I_d), il résulte de la polarisation de la jonction.

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit alors :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \quad (II.13)$$

Soit :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (II.14)$$

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et le courant d'obscurité. [8]

La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode, sous éclairement la caractéristique à l'allure présentée sur la figure II-13 suivante :

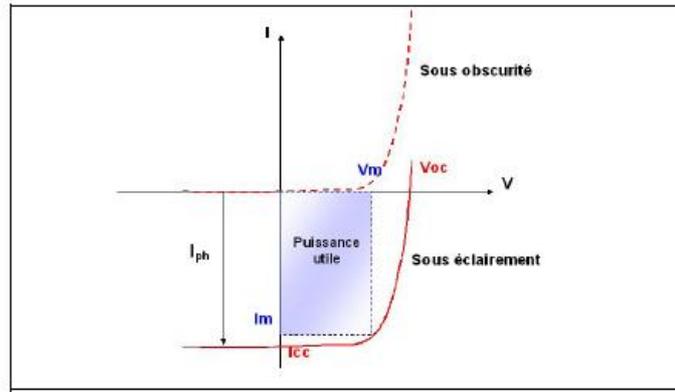


Figure II.13 : Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque

V. Paramètres des cellules photovoltaïques [23]

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{CC} , V_{OC} , FF et η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

V.1 Courant de court-circuit, I_{CC}

Le courant de court-circuit I_{CC} 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.

V.2 Tension à circuit ouvert, V_{OC}

La tension de circuit ouvert V_{OC} , est la tension mesurée lorsque 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. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule. A partir de l'expression du courant total de la cellule sous illumination, équation (II.15) dans le cas d'un courant nul, on obtient son expression

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \text{Log} \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (II.15)$$

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement figure II.14 :
 - Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\text{Log} \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \approx \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (II.16)$$

d'où :

$$V_{co} \approx \frac{kT}{q} \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (II.17)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule.

La formule précédente peut s'écrire aussi $V_{CO} = R_0 I_{ph}$, en posant :

$$R_0 = \frac{kT}{q} \frac{1}{I_s} \quad (II.18)$$

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

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

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad (II.20)$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \text{Log} \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (II.21)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

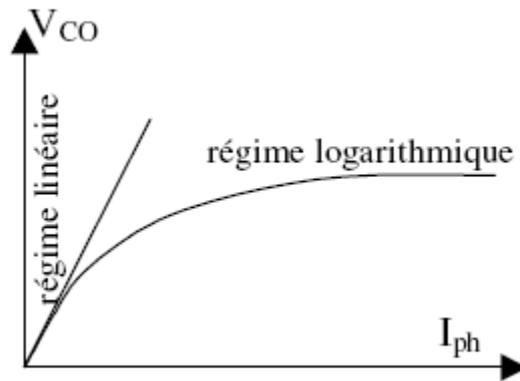


Figure II.14 : différents régimes selon la puissance d'éclairement.

V.3 Facteur de forme, FF

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement PM (I_M , V_M) de la courbe courant-tension (courant compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{OC}) (Figure II.13).

Ce point P_M est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox , Oy et les droites $x = I_m$ et $y = V_m$ passe par un maximum. Le nom "facteur de forme" (*fill factor*) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (II.22)$$

Il est égal au rapport de la surface du rectangle P_{max} défini par la figure II.13, sur celle du rectangle dont les cotés mesurent V_{OC} et I_{CC} . Plus ce paramètre est élevé, meilleure est l'efficacité de conversion. En dehors de ce point de fonctionnement P_M particulier, la diminution du courant par recombinaison intervient à des points de fonctionnement ayant V_x supérieur à V_M et des pertes par dissipation (effet joule) des résistances séries apparaissent dans le cas $I > I_M$.

V.4. Le rendement η

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{oc}}{P_{in}} \quad (II.23)$$

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

V.5 Le rendement quantique, EQE

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, *IQE* (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, *EQE* (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit:

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{hc}{e\lambda} \quad (II.24)$$

où $J_{cc}(\lambda)$ est le flux lumineux incident, e la charge de l'électron et E_{ph} l'énergie du photon (avec $E_{ph}(\lambda) = hc/\lambda$, h étant la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde).

L'EQE est aussi désigné sous le terme d'IPCE (de l'expression anglaise Incident Photon to Current Efficiency). En remplaçant les trois constantes par leur valeur numérique, on obtient :

$$IPCE = 1,24 \times \frac{J_{cc}}{\varphi(\lambda) \times \lambda} \quad (II.25)$$

Où J_{cc} est exprimé en $A \cdot cm^{-2}$, $j(\lambda)$ en $W \cdot cm^{-2}$ et λ , en μm .

V.6. Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairage et celui d'un générateur de courant, produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement réel de la cellule.

Pour tenir compte des différentes limitations de la cellule photovoltaïque, on introduit le modèle à deux diodes représenté sur la figure suivante (Figure II-15).

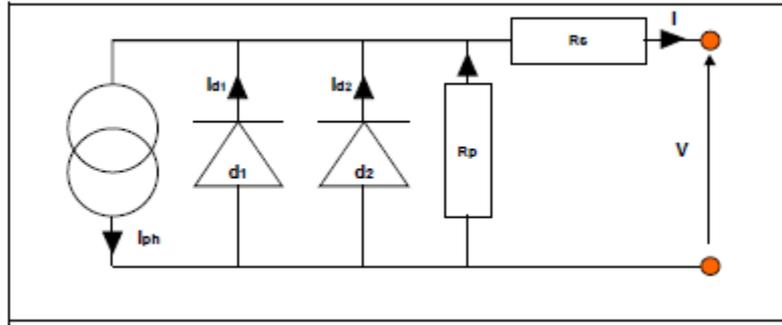


Figure II-15 : Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les différents paramètres de ce modèle sont :

Le générateur de courant : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogénéré.

La résistance série R_s : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semiconducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle R_p : également connue sous le nom de résistance de court-circuit, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible.

La diode $d1$ modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.

La diode $d2$ modélise la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace.

Le courant au sein de la cellule photovoltaïque est donc donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left(\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right) - I_{d2} \left(\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{n_2 kT}\right) - 1 \right) \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (II.26)$$

V.7. Réponse spectrale de la cellule photovoltaïque [14]

La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident.

La réponse spectrale RS est donnée par la relation : $RS = \frac{q\lambda}{hc} EQE$ (II.27)

EQE représente le rendement quantique externe de la cellule, c'est à dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. Pour une longueur d'onde donnée, le rendement quantique externe est égal à 1 si chaque photon génère un électron.

Si l'on prend en compte la réflectivité de la surface de la cellule photovoltaïque, on détermine son rendement quantique interne IQE.

L'interaction entre les photons et un semiconducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure II-15 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

On peut alors accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule. L'émetteur (en surface de la cellule) collecte les photons de faible longueur d'onde alors que la base ne prend en compte que les photons de grande longueur d'onde (Figure II.16).

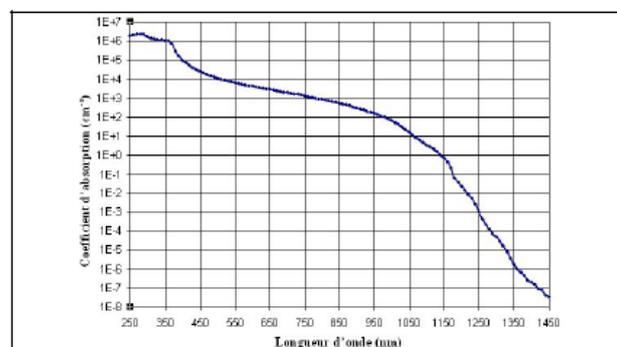


Figure II.16 : Coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde.

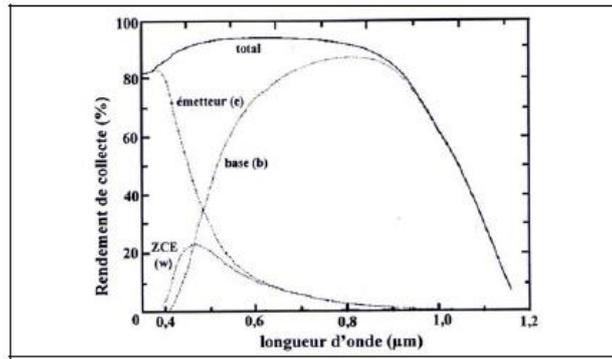


Figure II.17 : Exemple de réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque.

La limite supérieure en longueur d'onde correspond au gap du silicium soit 1,12 eV, limite qui peut être amenée à 1,052 eV si l'on prend en compte l'absorption assistée par phonons.

Les caractéristiques intrinsèques de la cellule induisent automatiquement des pertes de rendement qui sont amplifiées par les défauts de fabrications et aussi par la structure utilisée.

VI. Facteurs limitant le rendement

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 plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Ces pertes sont évoquées ci après :

■ Les pertes énergétiques :

La première limitation correspond aux photons utiles dans la conversion.

Les photons dont l'énergie est inférieure au gap du matériau, ne peuvent générer de paire électron/trou, et ne sont donc pas absorbés par la cellule photovoltaïque : dans le cas du silicium tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à 1250 nm sont perdus.

Un modèle plus détaillé du phénomène permet toutefois de considérer les mécanismes d'absorption assistée par phonons. Ceci repousse la limite de l'énergie du gap du silicium de 1,124 eV à 1,052 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon. [5]

Les photons dont l'énergie est supérieure à E_g sont absorbés par le matériau, mais l'excès d'énergie ($h\nu - E_g$) est dissipé sous forme de chaleur par les phonons du réseau : ce phénomène s'appelle la thermalisation. Sous un éclairage de AM1.5, cette perte est évaluée à 33 % dans le cas du silicium [34].

Enfin, les photons les plus énergétiques sont absorbés dans les premiers micromètres sous la surface éclairée de la cellule, c'est-à-dire dans la « zone morte » que constitue l'émetteur, à l'intérieur de laquelle les porteurs photogénérés sont perdus par recombinaison avec les dopants.

Compte tenu de ces pertes énergétiques, en considérant que les pertes optiques sont nulles et que chaque photon d'énergie supérieure à E_g génère une paire électron-trous, le rendement maximal d'une cellule photovoltaïque en silicium est de l'ordre de 40%.

■ Les pertes optiques :

Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant.

Le silicium est un matériau d'aspect métallique, très réfléchissant. L'indice de réfraction du silicium étant environ 3,5, le coefficient de réflexion d'une interface air-silicium est de l'ordre de 30%, ce qui représente les pertes directes des photons par réflexion. D'autre part, il y a une partie des photons qui, bien qu'ayant l'énergie nécessaire, traversent l'épaisseur de la cellule sans être absorbés. Ce terme devient important quand la cellule est très fine ($<100 \mu\text{m}$) conduisant à des pertes par transmission. Ceci peut être minimisé en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule (réflecteur arrière).

Différentes préparations de surface permettent de diminuer les pertes par réflexion et/ou transmission des photons ; nous citerons à titre non exhaustif :

- la texturation de surface (i.e. la formation de relief de tailles micrométriques), qui permet de diminuer les réflexions sur la face avant (éclairée), et d'augmenter le trajet optique des photons en les piégeant à l'intérieur du substrat ;
- le dépôt en face avant d'une couche anti-reflet de $\text{SiN}_x : \text{H}$, dont l'indice de réfraction est inférieure à celui du silicium (généralement $n=2$), qui permet de diminuer les pertes par réflexion ;
- la formation d'un réflecteur en face arrière, dans le cas de cellules classiques, qui permet d'éviter les pertes par transmission.
- Recombinaisons des porteurs photogénérés :

On distingue deux types de recombinaisons, qui ne dépendent que de la qualité du matériau :

■ les recombinaisons de surface : elles sont dues aux défauts cristallographiques présents à la surface, aux liaisons pendantes, ... Elles sont caractérisées par S : vitesse de recombinaison en surface des porteurs minoritaires. Différents traitements de surface permettent de passiver efficacement la surface, telle l'oxydation, le dépôt de nitrure (SiN), ... Ainsi, S peut varier de quelques cm/sec pour des surfaces très bien passivées à 10^7cm/sec pour des surfaces très recombinantes. Plus la cellule est de faible épaisseur, plus les recombinaisons de surface influent sur le rendement de la cellule.

les recombinaisons en volume (Auger et Shockley-Reed-Hall): elles sont dues aux défauts présents dans le volume du substrat (impuretés, dislocations, joints de grains, ...). Elles sont caractérisées par L_D : la longueur de diffusion des porteurs minoritaires, et par τ_D : durée de vie des porteurs minoritaires ; ces deux grandeurs sont reliées par la relation :

$$L_D = \sqrt{(D \cdot \tau_D)} \quad (II.28)$$

avec D : coefficient de diffusion des porteurs minoritaires. L'utilisation d'un substrat de très bonne qualité et très bien passivé en surface et en volume permet d'obtenir une longueur de diffusion des porteurs minoritaires élevée. Dans le cas des couches minces, L_D doit être au moins 3 à 4 fois supérieure à l'épaisseur de la cellule.

■ Les pertes liées à la cellule et au procédé de fabrication:

En effet, même dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme FF ne peut dépasser 0,89 [9], puisque les équations courant/tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle : $\exp(qV/kT)$. Il ne pourra donc pas exister de courbe courant/tension rectangulaire. Ce paramètre dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction p-n et du matériau, de la résistivité des contacts métalliques, etc... [34].

A cette première limitation, peuvent s'ajouter également l'influence de la résistance série et de la résistance parallèle qui vont consommer une partie du courant photogénéré et donc affecter le facteur de forme. La résistance série est due à la résistivité du matériau, à la résistance de contact entre le silicium et les connexions métalliques et à la résistance des lignes de connexions. La résistance parallèle quant à elle représente les courants de fuite dans la cellule, les fuites par les bords de la cellule photovoltaïque, les fuites locales au niveau de la jonction (présence de fissures et dislocations).

De plus, dans le cas d'une cellule classique, on observe un autre type de perte lié à la surface occupée par les contacts sur la face avant éclairée, on parle alors de taux d'ombrage.

Cependant, il existe certaines structures de cellules où le taux d'ombrage est égal à zéro (par exemple pour les cellules photovoltaïques à contacts arrières).

A part les pertes énergétiques, qui sont inhérentes au matériau silicium, les principaux facteurs limitatifs du rendement des cellules photovoltaïques sont liés à la qualité du matériau utilisé (notamment à la présence de défauts à la surface ou dans le volume du substrat), et au procédé de fabrication de la cellule photovoltaïque (piégeage des photons incidents, réduction des résistances parasites,...). L'utilisation de substrats de silicium de très bonne qualité, couplée à un procédé de fabrication optimisé, permet d'atteindre des rendements supérieurs à 20%.

Nous allons à présent nous intéresser aux technologies des cellules photovoltaïques et en particulier à la technologie silicium. [19]

VII. Structure des cellules photovoltaïques

VII.1 Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% sur l'utilisation du silicium comme matériau de base (figure II-18). Ce semiconducteur présente en effet, différents avantages : il est abondant à la surface du globe car facilement extrait à partir du sable ; il n'est pas toxique comme certains semiconducteurs III-V ; il possède un oxyde naturel (SiO_2)

présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct : pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100 μm pour le silicium, alors que seulement 1 μm de GaAs suffit. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV) : le GaAs, avec une largeur de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés.[35]

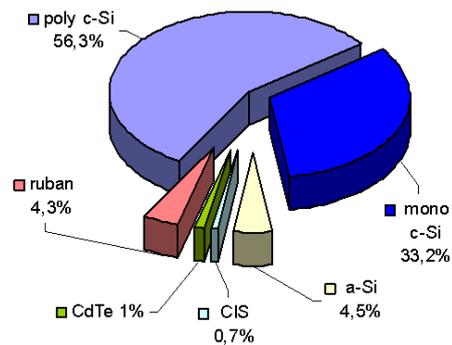


Figure II.18 Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003[35]

Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque (figure II-18). Outre les avantages précités, 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 y est plus importante, puisque les modules produits selon cette technologie ont un rendement plus élevé que ceux en silicium multicristallin. [36]

Le silicium multicristallin est quant à lui fabriqué à partir de sources de matériau moins raffinées, mais convient aux processus de l'industrie photovoltaïque : il constitue 56,4% des modules fabriqués en 2003. [35] La majeure partie de ce matériau est produit par des procédés de solidification unidirectionnelle, tels que le Polix® (Photowatt) ou le Baysix® (Bayer). C'est le matériau qui conduit au coût le plus faible au Wc, en comparaison avec d'autres procédés (2,12 \$/Mc contre 2,43 \$/Wc pour les modules en silicium monocristallin). D'autres méthodes de production se développent, tel que le silicium en ruban EFG (pour Edge defined film Fed Growth), qui est produit directement sous forme de plaques minces, mais qui présente des rendements de conversion inférieurs à ceux des lingots traditionnels. [8]

VII.2 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure II-19.

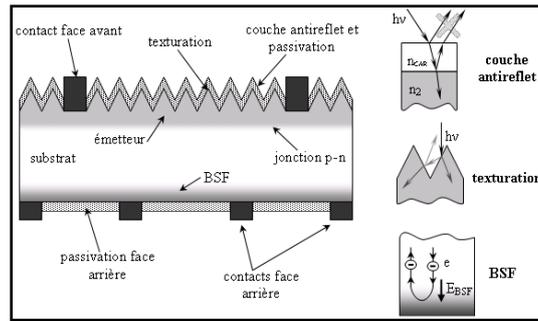


Figure II.19 Composition d'une cellule photovoltaïque.

VII.2.1. Passivation des faces avant et arrière

La surface des semiconducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x\text{:H}$).

VII.2.2. Couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (voir insertion sur la figure II-19). Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2.N + 1). \lambda}{4. n_{CAR}}, \quad N = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (II. 29)$$

on obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semiconducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents).

Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , SiN_x , etc [9].

VII.2.3. Texturation de la surface

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

L'insertion sur la figure I-8 présente le principe de réflexions multiples propre à la texturation. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant : un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale, qui ne vaut plus R mais R^2 . D'autre part, un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction θ différent de 0° . Le trajet de ce rayon au sein du silicium sera donc augmenté d'un facteur $1/\sin\theta$ par rapport au cas d'une

surface plane et perpendiculaire à l'éclairement, ce qui aura pour effet d'augmenter la part de photons absorbés par le matériau. Pour finir, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique θ_c à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet au sein du semiconducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons. En appliquant la loi de Descartes, on trouve que cet angle vaut 17° dans le cas du silicium dans l'air. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des cellules de faible épaisseur, et peut être renforcé par une texturation de la face arrière et/ou une couche antireflet sur cette même face.

Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, [29] acides [11]), texturation mécanique [37] (laminage à froid sous un peigne dentelé), texturation laser [12].

VII.2.4. Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique $I=f(V)$ du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. [24]

Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multicristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées. [3]

VI.2.4. BSF

Le BSF (*champ de surface arrière*), aussi appelé "*High-Low Junction*", est une zone très fortement dopée sur la totalité de la face arrière des photopiles. Le dopage de cette couche est du même type que celui de la base si bien que la structure de la cellule est n^+-p-p^+ . Pour du silicium de type p (cas général), le bore et l'aluminium sont les dopants principaux. L'épaisseur de la couche p^+ (WBSF) est d'environ 5 à 15 μm .

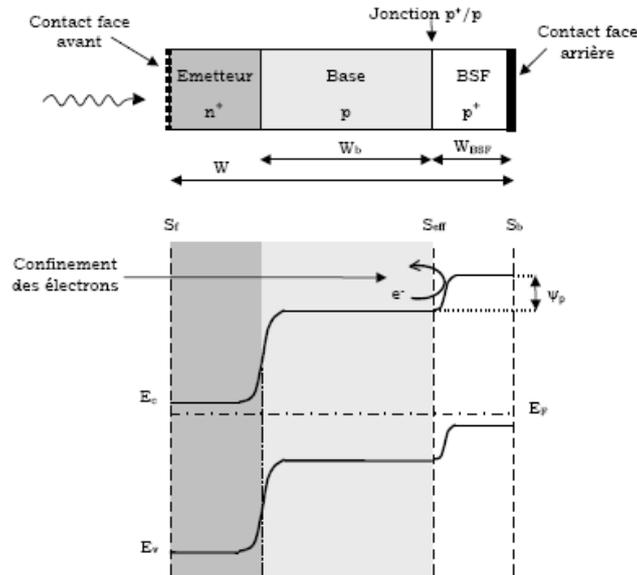


Figure II.20 : Structure et diagramme de bandes d'une cellule solaire avec un champ arrière.

En créant un gradient d'accepteurs en face arrière de la cellule, il est possible d'obtenir :

1. une augmentation de la *tension de circuit ouvert* et du *courant de court-circuit*
2. une augmentation de la *réponse spectrale* aux grandes longueurs d'onde
3. une résistance de contact réduite

L'effet du BSF est compréhensible à partir du diagramme de bandes de la structure (Figure II.20). La barrière de potentiel ψ_B induite par la différence de niveau de dopage entre la base p et le BSF p+, tend à confiner les électrons (porteurs minoritaires) dans la base. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison S_b très élevée. Le principe de la structure est modélisé par une vitesse de recombinaison effective S_{eff} très inférieure à S_b . [33]

Chapitre III

Matériaux photovoltaïque à base de silicium

I. Introduction

Les technologies du photovoltaïque ont pendant longtemps reposé sur l'utilisation du silicium. Elles ont ainsi bénéficié dans une certaine mesure des progrès faits dans la connaissance de ce matériau de base des cellules photovoltaïques.

II. Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque

II.1. Comment fabrique-t-on du silicium pur, des puces et des cellules solaires?

Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzéux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Ce procédé génère du silicium ayant un taux de pureté de 96-99%.

Une plus grande pureté est exigée en matière de composants électroniques (diodes et transistors) qui ne tolèrent qu'un seul atome étranger pour 10^{12} atomes de silicium. Pour y arriver, le silicium est dissous dans de l'acide chlorhydrique et purifié par distillations successives. Le trichlorosilane ainsi obtenu, dont le point d'ébullition se situe à 33 °C seulement, est réduit à l'aide d'hydrogène jusqu'à atteindre l'état de silicium liquide. Un cristal de forme cylindrique, le monocristal (jusqu'à environ 20 cm de diamètre), est extrait de cette masse liquide. On en scie ensuite de petites plaques extrêmement fines de 0,5 mm (« wafers »). [25]

II.2. Structure cristalline du Si

La matière condensée peut prendre deux états solides différents, suivant les conditions dans lesquelles elle s'est formée : un état dit amorphe, dans lequel la disposition des atomes est aléatoire, ou un état cristallisé. Caractérisé par un arrangement périodique des atomes. Les solides amorphes sont généralement appelés des verres et considérés comme des liquides de haute viscosité. Les solides cristallisés peuvent former des monocristaux, si la périodicité est ininterrompue dans tout le volume, ou des poly-cristaux, s'il existe une périodicité locale et que le solide est composé d'un ensemble de grains cristallins de taille à peu près uniforme. Dans la microphotographie de la Figure III.1, prise par Transmission Electron Microscopy (TEM), une vue de coupe du réseau cristallin du silicium permet d'observer sa périodicité.

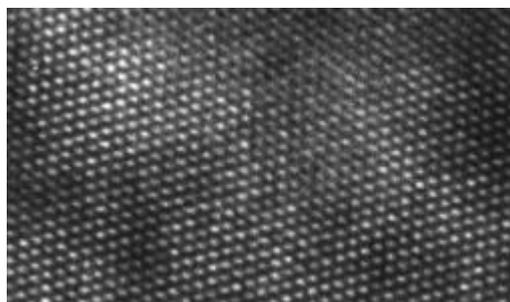


Figure III.1. Microphotographie du réseau cristallin du silicium prise par TEM

Le résultat est un ensemble ordonné, ou localement ordonné, des noyaux d'atomes et d'électrons liés entre eux par des forces principalement coulombiennes. Ces forces sont plus ou moins importantes suivant l'électronégativité des éléments intervenant dans les liaisons, ce qui confère aussi des propriétés mécaniques et électriques au solide cristallisé résultant. On distingue quatre familles de solides cristallins : les cristaux ioniques, les cristaux covalents, les métaux et les cristaux moléculaires. [20]

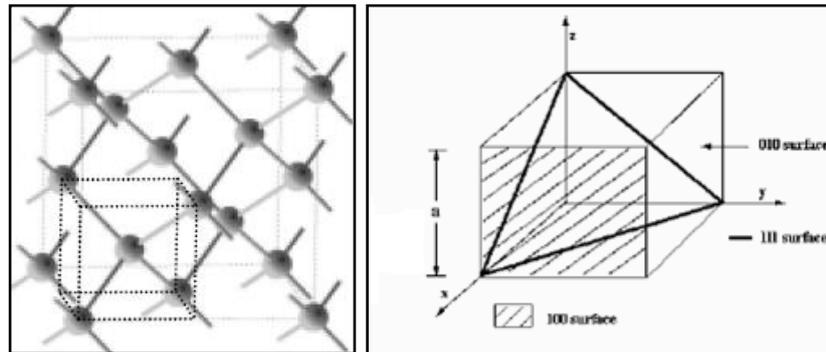


Figure III.2 Réseau du silicium et sa cellule élémentaire (en pointillé, noir), à gauche. Plans réticulaires principaux et ses indices de Miller, à droite.



Figure III.3 Plans réticulaires principaux du silicium et leurs indices de Miller.

Le silicium, ainsi que les autres éléments de la colonne IV du tableau périodique (C, Ge, Sn) forment des cristaux covalents. Ces éléments génèrent des liaisons covalentes, avec leurs quatre atomes voisins, en mettant en commun leurs quatre électrons de valence. Les électrons de valence ont une énergie de liaison importante dans le cas du carbone diamant, ce qui en fait un isolant (ou plutôt un semiconducteur de large bande interdite), et une énergie nulle dans le cas de l'étain, ce qui en fait un bon conducteur. Dans le cas du silicium cette énergie a une valeur intermédiaire des températures normales, faisant de ces matériaux des semiconducteurs aux applications intéressants.

Le réseau cristallin du silicium est celui du diamant (voir Figure III.2). Le silicium est un matériau monoatomique, la cellule élémentaire (en pointillé noir dans la Figure III.2) contient deux atomes de silicium, l'atome central plus un quart de chacun de ses quatre voisins. Chaque atome a une coordination tétraédrique et a des liaisons covalentes avec les atomes voisins. Les plans réticulaires

principaux du silicium sont montrés dans la Figure III.2 et la Figure III.3. Les plans 100 et 111 sont les plus utilisés par l'industrie de semiconducteurs sur silicium monocristallin. [26]

II.3. Bandes d'énergie du Si

Bien que les électrons d'un atome isolé (i.e. un gaz) aient des niveaux d'énergie permis bien définis, le comportement de ces électrons dans un réseau cristallin périodique est différent. Si la distance entre les atomes est suffisamment petite, comme dans le cas du réseau cristallin du silicium, la présence des atomes voisins génère une sorte d'interférence entre les niveaux permis de chaque atome. Cela entraîne une multitude quasi continue d'états autour de chaque niveau permis de l'atome individuel. Cet ensemble d'états, très proches entre eux, est plutôt considéré alors comme une bande d'énergie permise, avec une densité d'états associée.

Les niveaux d'énergie des électrons de valence et le niveau d'énergie d'ionisation génèrent ainsi deux bandes d'énergie permises particulièrement intéressantes, la bande de valence et la bande de conduction, séparées par une bande dépourvue de niveaux permis, nommée bande interdite (voir Figure III.4). La particularité de ces bandes permises tient au fait que, s'agissant d'électrons partagés par les atomes du réseau cristallin (Les électrons dans la bande de valence sont partagés par les atomes pour générer des liaisons covalentes. Dans la bande de conduction, les électrons ne sont liés plus aucun atome et servent la neutralité de la charge globale), ils peuvent circuler librement dans toute la maille cristalline et ainsi générer des courants de conduction électrique.

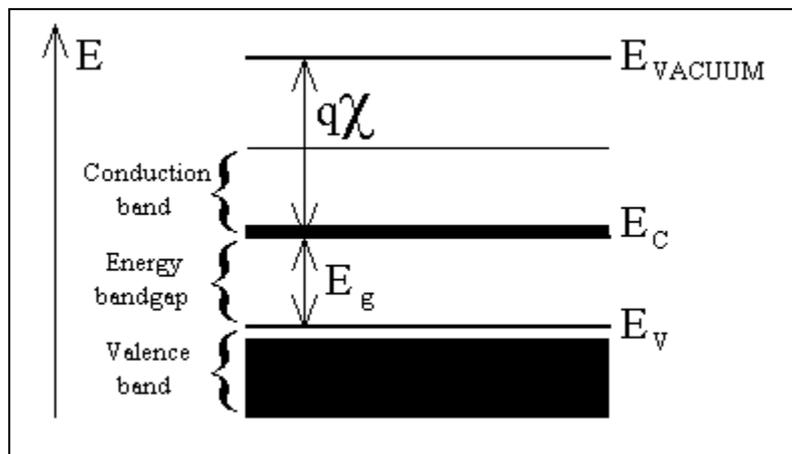


Figure III.4. Diagramme des bandes d'énergie des semiconducteurs. [2]

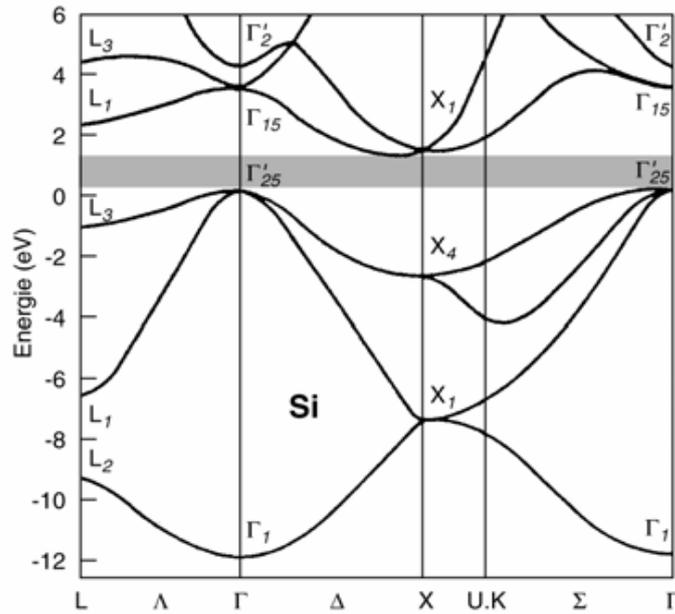


Figure III.5. Structures de bande du Si

Le silicium est un semiconducteur à bande interdite, ($E_G = 1,12 \text{ eV}$) à 300 K) (figure III.5). Pour le silicium, le sommet de la bande de valence est situé au centre de zone de Brillouin appelé Γ . Le minimum de la bande de conduction est situé au bord de zone.

La figure III.6 montre la première zone de Brillouin d'un réseau cubique à face centrée, comme celui de Silicium. Cette cellule élémentaire du réseau réciproque possède plusieurs directions de haute symétrie. Les directions ΓX [110] et ΓL [111] représentent les directions de l'espace réciproque. Γ est le centre de zone de Brillouin.

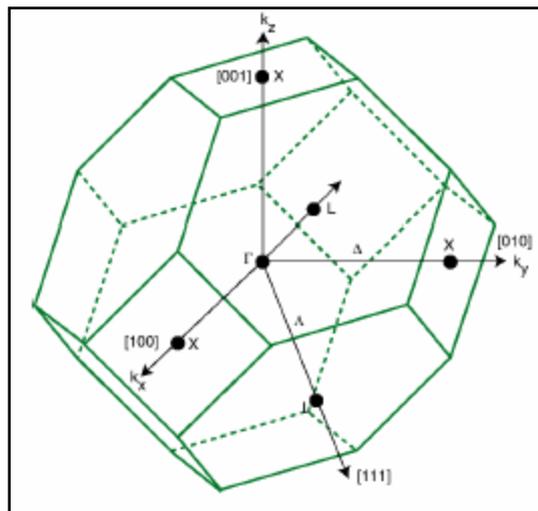


Figure III.6 : Première zone de Brillouin d'un réseau à cubique face centrée. [27]

II.4. Semiconducteur intrinsèque

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique. Un tel monocristal possède une structure de type tétraédrique c'est à dire que chaque atome est entouré symétriquement de 4 atomes. [14]

II.4.1. Concentration intrinsèque

A l'équilibre thermique, les densités totales d'électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence sont données par les expressions suivantes [20] :

$$n = \frac{2}{h^3} (2\pi m_e kT)^{\frac{3}{2}} \exp \left[\frac{E_F - E_c}{kT} \right] = N_c \exp \left[\frac{E_F - E_c}{kT} \right] \quad (III.1)$$

$$p = \frac{2}{h^3} (2\pi m_h kT)^{\frac{3}{2}} \exp \left[\frac{E_v - E_F}{kT} \right] = N_v \exp \left[\frac{E_v - E_F}{kT} \right] \quad (III.2)$$

Où :

N_c et N_v sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence.

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité des porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne pouvant résulter que de l'excitation thermique des électrons de la bande de valence, les trous et les électrons existent nécessairement par paires ($p=n=n_i$), donc on obtient les expressions suivantes, pour la concentration intrinsèque des porteurs et le niveau de Fermi intrinsèque :

$$n_i = [N_c N_v]^{\frac{1}{2}} \exp \left[- \frac{E_g}{2kT} \right] \quad (III.3)$$

$$E_F = \frac{1}{2} [E_v + E_c] + \frac{3}{4} kT \log \frac{m_h}{m_e} \quad (III.4)$$

Il en résulte que le niveau de Fermi intrinsèque E_F est toujours très proche du centre de la bande interdite.

Dans le cas d'un semi-conducteur non dégénéré et à l'équilibre thermique

$$(p = p_0, \quad n = n_0, \quad p_0 \cdot n_0 = n_i^2) :$$

$$n_0 = n_i \exp \left[\frac{E_i - E_F}{kT} \right] \quad (III.5)$$

$$p_0 = n_i \exp\left[\frac{E_i - E_F}{kT}\right] \quad (III.6)$$

II.4.2. Température intrinsèque

La transition entre le régime d'épuisement et le régime intrinsèque marque la température limite pour un dispositif semi-conducteur, dite température intrinsèque. D'où l'importance, dans les cas d'applications en haute température, de repousser au maximum cette transition.

Si on définit la température intrinsèque T_i comme la température où la concentration intrinsèque $n_i(T)$ devient comparable ou égale à la concentration des impuretés dopantes nette: $|N_d - N_a|$ [6]

$$n_i(T_i) = |N_d - N_a| \quad (III.7)$$

II.4.3 Différents types de dopage

Les semi conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels ; ils servent de base aux semi conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés pour modifier leur comportement. Il existe deux types de semi conducteurs extrinsèques [48]:

II.4.3.1. Semi- conducteur dopé n

Matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. On y a introduit généralement du phosphore, de l'Arsenic ou encore de l'Antimoine. Prenons par exemple le cas du Silicium dans lequel on introduit de l'Arsenic (possède 5 électrons sur la couche extérieure).

On associe à l'Arsenic un niveau donneur E_d dans la bande interdite très proche de la bande de conduction. L'intérêt est que pour les températures supérieures à 0°K, les atomes d'arsenic sont ionisés ce qui revient à faire passer l'électron du niveau donneur à la bande de conduction. La concentration de donneurs sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs ($N_d - N_a > 0$) ce qui correspond à la définition d'un semi-conducteur dopé n.

A la température ambiante pratiquement tous les donneurs sont ionisés et si la concentration en atomes donneurs est N_d , la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera :

$$n = n_0 + N_d \quad (III.8)$$

Où n_0 est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

II.4.3.2. Semi-conducteur dopé p

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électrons. On y a introduit généralement du Bore, de l'Aluminium, du Gallium ou encore de l'Indium, prenons le cas du Silicium dans lequel on introduit du Bore. On associe au Bore un niveau accepteur a E dans la bande interdite très proche de la bande de valence [40].

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé n, la concentration en trous du semi-conducteur sera :

$$p = p_0 + N_a \quad (III.9)$$

II.4.4. Densité de charges dans un semi-conducteur

Si l'on considère un Semi-conducteur possédant une densité N_d d'atomes donneurs et une densité N_a d'atomes accepteurs on peut estimer qu'à la température ordinaire toutes les impuretés sont ionisées. Il en résulte le bilan des charges suivant:

$$n + N_a = p + N_d \quad (III.10)$$

Dans le cas de semi-conducteurs dopés n ou p la relation (III .10) se simplifie lorsque l'on tient compte des ordres de grandeur des différentes concentrations.

➤ Semi-conducteur dopé n:

$N_a = 0$ et $N_d \gg p \Rightarrow n \approx N_d$: Les électrons sont les porteurs majoritaires.

La densité des donneurs ionisés N_d^+ s'écrit:

$$N_d^+ = \frac{N_d}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_F - E_d}{kT}\right)} \quad (III.11)$$

E_d étant le niveau d'énergie donneur.

➤ Semi-conducteur dopé p:

$N_d = 0$ et $N_a \gg n \Rightarrow p \approx N_a$: Les trous sont les porteurs majoritaires.

La densité d'accepteurs N_a^- s'écrit [2] :

$$N_a^- = \frac{N_a}{1 + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{E_a - E_F}{kT}\right)} \quad (III.12)$$

E_a étant le niveau d'énergie accepteur.

Le matériau semiconducteur étant globalement neutre, l'équation de la neutralité électrique s'écrit :

$$n + N_a^- = p + N_d^+ \quad (III.13)$$

II.5. Génération et recombinaison des porteurs

Si on considère un semi conducteur à l'équilibre thermique, il se produit en permanence un processus de génération de paires électrons-trous par agitation thermique.

Cependant il existe aussi le processus inverse, un électron se recombine avec un trou, c'est la recombinaison. Dans un semi-conducteur à l'équilibre les deux processus s'équilibrent de façon à ce que la concentration en porteurs libres reste constante.

Lorsque l'électron descend de la bande de conduction vers la bande de valence, le semi-conducteur restitue l'énergie sous forme de chaleur ou émet de la lumière (photon).

Ce dernier effet est utilisé dans les diodes électroluminescentes (L.E.D.) ou les lasers semiconducteurs.

Le photon émis a une énergie égale à E_g selon :

$$\lambda \cdot E_g = h \cdot c \quad (III.14)$$

Soit :

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.24}{E_g(eV)} \quad (III.15)$$

En sens inverse, un photon qui possède une énergie supérieure ou égale à E_g a le pouvoir de générer une paire électron-trou.

Quand le semi-conducteur absorbe une énergie suffisante ($h\nu \geq E_g$), il engendre une paire électron-trou. En général, hors équilibre et en régime transitoire, les taux nets de recombinaison des électrons et des trous respectivement sont donnés par :

$$\begin{cases} U_n = D_n \Delta n \\ U_p = D_p \Delta p \end{cases} \quad (III.16)$$

Avec :

$$\begin{cases} U_n = \frac{\bar{n} - n}{\tau_p} \\ \bar{n} = \frac{\partial n}{\partial t} \end{cases} \quad (III.17)$$

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ($t < 10^{-8}$ s). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons :

II.5.1 Recombinaison en volume de type radiative

Le processus de recombinaison radiative ou interbande est défini comme l'inverse du processus d'absorption. L'excès d'énergie de l'électron recombiné est cédé sous forme d'un rayonnement optique. Ce processus est important pour les matériaux à bande interdite directe comme le GaAs et faible pour les matériaux à gaps indirects comme le Si. De ce fait, ce mécanisme n'influe pas considérablement sur la durée de vie des porteurs minoritaires. Le taux de recombinaison est proportionnel à la fois au nombre d'électron et au nombre de trous :

$$R = B(pn - n_i^2) \quad (III.18)$$

Avec :

B est le coefficient de recombinaison radiative, sa valeur est égale à $9,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$.

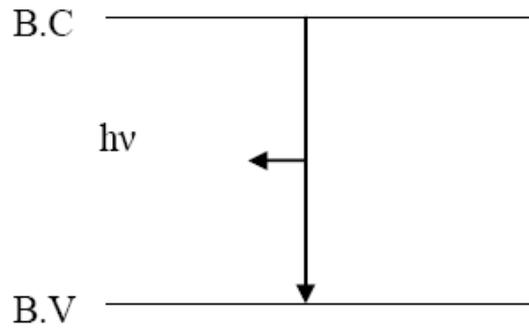


Figure III.7. Schéma descriptif du processus de recombinaison de type radiatif

II.5.2 Recombinaison en volume de type Auger

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées. Le taux de recombinaison est donné par la relation :

$$R = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \quad (\text{III.19})$$

Avec C_n et C_p sont des coefficients d'Auger. Leurs valeurs sont respectivement :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_n = 2,2 \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s} \\ C_p = 9,9 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s} \end{array} \right. \quad (\text{III.20})$$

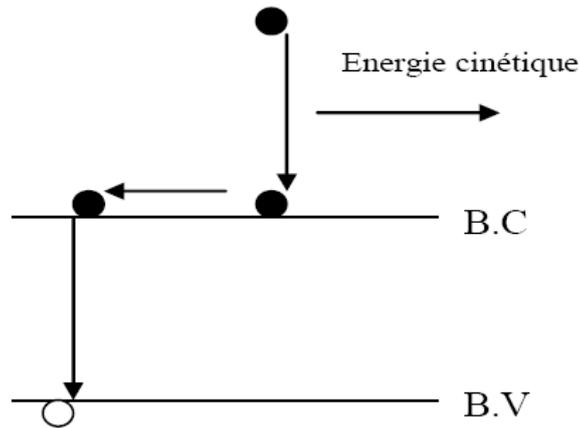


Figure III.8. Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger

II.5.3. Recombinaison par piège

Les deux mécanismes précédents ne dépendent que du dopage et pas des défauts et des centres de recombinaison associés. Ils sont souvent masqués par des processus de recombinaison plus efficaces faisant intervenir les niveaux profonds.

Pour le silicium, il y a des niveaux profonds proches du milieu de la bande interdite associés à quelques impuretés courantes. L'électron a tendance à revenir à son état initial dans la bande de valence, en passant par ces niveaux (s'ils existent).

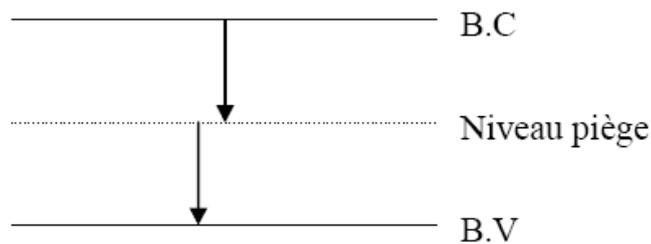


Figure III.9. Schéma descriptif du processus de recombinaison par piège

a. Recombinaison en volume de type RSH

Le modèle physique décrivant les recombinaisons en volume est basé sur le modèle de

Read-Shokley-Hall à un seul niveau piège. Le taux de recombinaison par piège est donné par la relation :

$$R_{RSH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n \left(p + n_{ie} e^{-\frac{E_T}{kT}} \right) + \tau_p \left(n + n_{ie} e^{\frac{E_T}{kT}} \right)} \quad (III.21)$$

Où :

E_T représente l'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite, τ_n et τ_p ont une valeur égale à $10^3 \mu s$. n_{ie} est la concentration intrinsèque effective donnée par la relation suivante :

$$n_{ie}^2 = pn \exp\left(\frac{\Delta E_{g_n} + \Delta E_{g_p}}{kT}\right) \quad (III.22)$$

Elle est due au rétrécissement de la bande interdite pour un semi-conducteur fortement dopé et ΔE_{g_n} , ΔE_{g_p} présentent le rétrécissement de la bande interdite.

b. Recombinaison en surface

La surface d'un semi-conducteur est un lieu où les recombinaisons sont particulièrement nombreuses, en raison des liaisons non satisfaites des atomes de surface et autres défauts caractéristiques à température constante ($T=300^\circ K$). Les recombinaisons en surface avant et arrière inhérentes aux densités de dopages selon la relation suivante :

$$S = S_0 \left(\frac{N}{N_{set}} \right)^\alpha \quad (III.23)$$

S_0 , N_{set} et α dépendent du traitement de la surface et de la passivation. Pour une oxydation thermique d'une couche de silicium de type n, α est de 1 et N_{set} est de 10^{18} cm^{-3} .

La passivation est l'ajout d'une couche de SiO_2 en surface pour limiter les recombinaisons en surface et combler les liaisons cassées (en surface) lors de la découpe du semi-conducteur. [40]

III. Rappels

III.1 Matériaux cristallins MC

Un matériau solide cristallin est caractérisé par un ordre cristallographique à longue distance. Une telle définition n'est pas parfaitement claire; en effet, que signifie longue distance ? Dans la pratique on considère comme cristallin un matériau qui diffractera les rayons X; en effet, ce phénomène n'est observé que si l'ordre à grande distance existe. Pour des atomes de masse moyenne (éléments de transition 3d, par exemple) les diffractogrammes apparaissent pour des dimensions de cristaux de l'ordre de 2 nm. Cette définition n'est cependant pas sans ambiguïté; en effet, l'absence de

diagramme de diffraction X est également observée lorsque les grains qui diffractent deviennent suffisamment petits. Il est certain qu'un matériau présentant un diagramme de diffraction X est cristallisé; inversement, il n'est pas évident qu'un matériau "amorphe" aux rayons X ne soit pas microcristallin. [49]

III.2 Matériaux non-cristallins MNC

La définition des matériaux non-cristallins découle à l'évidence de celle des matériaux cristallins. L'équivoque de la définition de ces derniers sera, bien entendu, héritée de cette relation. Certains MNC peuvent cependant être définis assez clairement; les verres et certains polymères ne présentent pas de spectres de diffraction X et d'autre part possèdent une température caractéristique appelée T_g ; la présence de ces deux propriétés caractérise sans aucune équivoque l'état vitreux (Figure III.10 et III.11). Par contre, dans le cas d'autres matériaux non-cristallins obtenus par les méthodes sol-gel, par exemple, il n'existe pas de méthode physique permettant de trancher clairement entre un état amorphe et la microcristallinité.

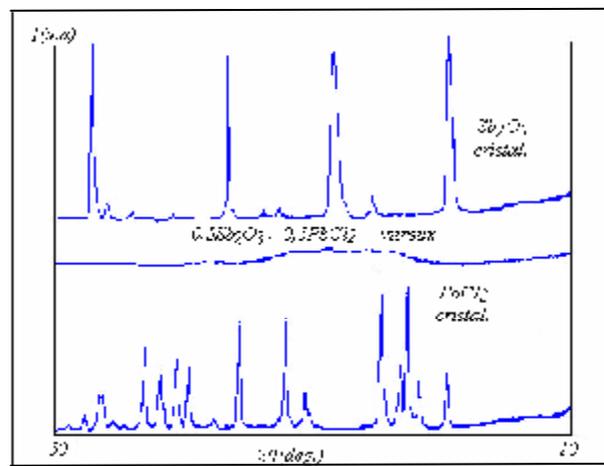


Figure III.10 : Diffractogrammes X de Sb_2O_3 et $PbCl_2$ cristallisés et du verre (amorphe) résultant de la combinaison des deux composés.

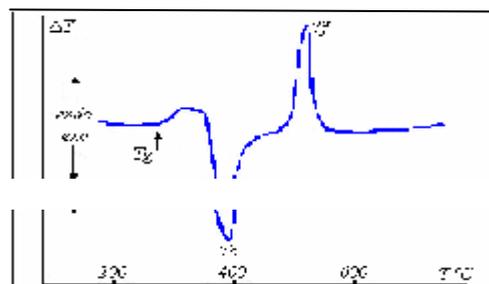


Figure III.11 : Analyse thermique différentielle du verre oxychloré d'antimoine et de plomb mettant en évidence la température de transition vitreuse. [50]

IV. Cellule à base de silicium cristallin massif

IV.1. Silicium solaire

Le silicium, à la base de toute l'industrie électronique moderne, est obtenu par réduction de la silice dans un four électrique, ce qui fournit le matériau dit "métallurgique" dont la pureté est de 98 % environ. Celui-ci est purifié à son tour, sous forme de gaz trichlorosilane ou silane. Après pyrolyse de ces derniers, le matériau obtenu sert de produit de départ pour la croissance. [39]

IV.2. Silicium monocristallin

a) Techniques de croissance de monocristaux

Il est possible d'avoir des monocristaux par la méthode Czochralski (Cz) de diamètre 30 cm, longs de plus de 1 m. Il faut noter qu'en partant de 1 kg de silice, on n'obtient pas plus de 100 g de silicium monocristallin pour une dépense énergétique considérable, de l'ordre du MWh. De plus, la moitié de ce cristal sera perdue au cours de la découpe en tranches de 300 μm d'épaisseur. Il est de type p, c'est-à-dire dopé bore, à une concentration comprise entre 10^{16} et 10^{17} atomes/cm³, de façon à présenter une résistivité de l'ordre de 0,1 à 1 Ω cm. Ce choix résulte d'un compromis entre une résistivité la plus faible possible et un dopage modéré afin d'éviter la dégradation de la longueur de diffusion des porteurs photogénérés. Par la suite, il faut encore créer une barrière de potentiel nécessaire à la collecte des charges, c'est-à-dire la structure émettrice des cellules photovoltaïques qui ne sera pas détaillée dans le cadre de cette présentation.

b) Cellules record sur monocristaux

Avec de tels matériaux Cz de la micro-électronique, il est possible d'obtenir des rendements de conversion en laboratoire de plus de 22 % en Cz (FhG-ISE, Allemagne) et le record de 24,7 % sur FZ est détenu par l'Université de New South Wales, Australie.

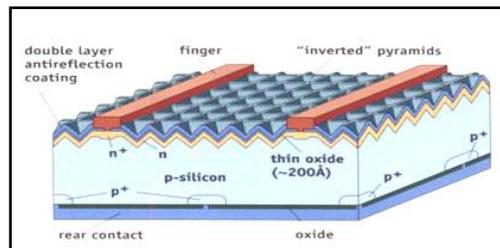


Fig.III.12 : Structure de la cellule de laboratoire la plus performante. (Source Photovoltaics Special Research Center UNSW [40])

IV.3. Silicium multicristallin

a) Techniques de croissance de multicristaux

Dans un polycristal les monocristaux sont séparés les uns des autres par des zones perturbées, les joints de grains, et chaque cristal de plus petite dimension n'a pas la même orientation que son voisin. On privilégie les techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (d'où l'appellation silicium multicristallin, mc-Si) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cette technique par solidification directionnelle, où des blocs de plus de 250 kg peuvent être obtenus par refroidissement contrôlé du silicium en fusion dans un moule de nature appropriée (souvent en quartz), est plus rapide et moins coûteuse en énergie que la croissance d'un lingot Cz ou FZ (24 à 48 h contre quelques semaines pour ces derniers).

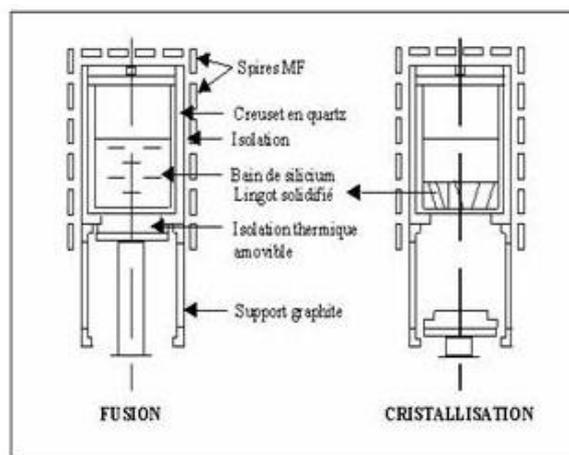


Fig. III.13 : Principe de croissance par solidification directionnelle du type Polix développé par Photowatt. (Source Photowatt S.A. [41])

Cependant ce matériau contraint et disloqué est également contaminé par des impuretés résiduelles de la charge de silicium constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique. Les premiers matériaux mc-Si ont été le Silso de Wacker en Allemagne dès 1975, suivi en France par le Polix de Photowatt. Aux États-Unis, les matériaux les plus connus sont le Semix de Solarex (devenu BP-Solar) et le HEM de Crystal Systems.

Les Japonais proposent depuis les années 90 un nouveau matériau produit par coulée continue en creuset électromagnétique (Osaka Titanium Co., OTC, devenu le Sitix de Summitomo). En France, le Madylam de Grenoble explore également cette possibilité de tirage en creuset froid (Emix) ainsi que Photowatt (PolixEM).

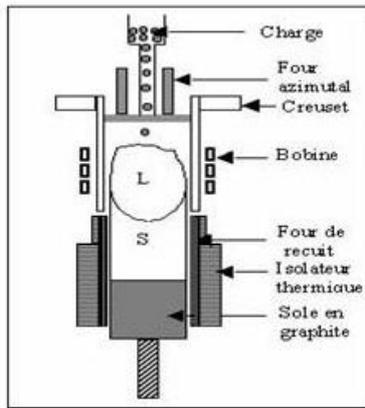


Fig. III14 : Principe de croissance de silicium par coulée continue en creuset électromagnétique.
(Source Madylam [29])

b) Amélioration des performances des cellules réalisées sur des multicristaux

Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10 % avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour de grandes plaquettes de 10x10 ou 15x15 cm². Ces progrès s'expliquent par l'amélioration constante de la qualité des matériaux et par l'accroissement des connaissances des défauts et des impuretés résiduels.

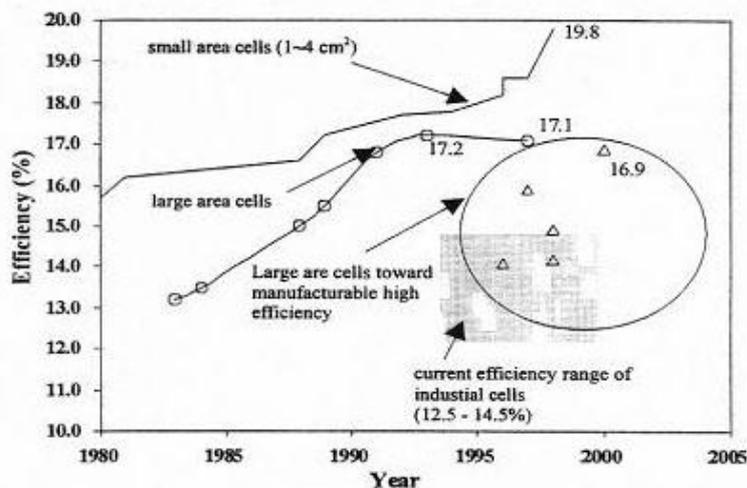


Fig. III.15 : Progression, en laboratoire et dans l'industrie, des rendements de conversion des cellules à base de silicium multicristallin. (Source NREL [42])

Actuellement, on sait parfaitement passer les effets néfastes de la plupart des défauts cristallographiques et de certains éléments métalliques sur l'activité électrique de la cellule par l'introduction d'hydrogène lors, par exemple, du dépôt d'une couche nitrure servant d'anti-reflet. Cependant, l'efficacité de cette neutralisation dépend de l'interaction de ces défauts et impuretés avec le carbone et l'oxygène selon leurs teneurs respectives dans les matériaux.

On peut également purifier les plaquettes de silicium lors d'un traitement thermique à haute température par un effet de migration des impuretés vers des sites situés en dehors des zones actives où elles peuvent être piégées (phénomène plus connu sous sa dénomination anglaise de "getter"). La maîtrise de ces phénomènes a permis au Laboratoire PHASE du CNRS-SPI d'obtenir le rendement record de 16,7 % sur des plaquettes Polix de Photowatt par des Recuits Thermiques Rapides (RTR) en four à lampes, c'est-à-dire sur la voie d'une réduction du bilan thermique et du respect de l'environnement du processus d'élaboration des cellules.

Toutefois, le sciage de ces grands blocs reste une opération onéreuse et conduisant à une perte non négligeable de matière, d'où son évolution vers des plaquettes ultra-minces (actuellement aux alentours de 200 μm en production chez Photowatt avec une limitation mécanique de manipulation des plaques se situant à environ 100-120 μm). L'alternative consiste à recourir à du silicium pouvant être mis en œuvre sans recourir à des opérations de découpe.

IV.4. Silicium polycristallin

La technologie en couches minces de silicium cristallin déposées sur un support, dont le développement sera largement déterminé par le coût du silicium charge, consiste à déposer une couche mince de silicium polycristallin de 10-40 μm d'épaisseur sur divers substrats de silicium métallurgique peu purifié, quartz, céramique ou métal. Ces couches minces devraient permettre d'obtenir des rendements de conversion du même ordre de grandeur que ceux qu'une cellule sur matériau massif, moyennant un confinement optique et un champ arrière répulsif pour les porteurs minoritaires et, du fait que la distance qu'ils ont à parcourir est plus faible, on peut se contenter d'une pureté moindre pour le matériau de base.

Depuis quelques années, les films minces de silicium cristallin suscitent un intérêt majeur en Europe et aux USA où Astropower aurait abouti (en 1998, après 10 ans d'annonce) à une fabrication pilote de cellules en couches minces sur une céramique de composition confidentielle avec une procédure de dépôt utilisant un alliage de silicium en phase liquide. Ce succès a entraîné de nombreux laboratoires sur des projets de fabrication de films de Si en phase vapeur sur supports de silicium, de céramique ou même de verre. [29]

Deux techniques sont actuellement en compétition, la croissance par épitaxie en phase liquide (LPE) dont le principal inconvénient est l'utilisation d'un substrat cristallin (19-21 % de rendement en laboratoire) et les dépôts en phase solide. On citera la décomposition pyrolytique du silane et de l'hydrogène sur un filament chaud de tungstène (LPICM) permettant de déposer du silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si}$) sur un substrat de verre à 500 °C à des vitesses relativement élevées ($> 5 \mu\text{m/h}$), les dépôts en phase vapeur ("Chemical Vapour Deposition (CVD)" en anglais) à des températures supérieures à 800 °C en présence d'un gaz contenant le silicium (silane ou chlorosilanes) avec la possibilité (CNRS-PHASE) d'une croissance plus rapide avec des vitesses de dépôt de l'ordre de 10 $\mu\text{m/mn}$ par CVD assistée par lampes ("Rapid Thermal-CVD (RT-CVD)" en anglais) où le substrat n'est chauffé que pendant la durée du dépôt à des températures bien plus élevées que celles du gaz.

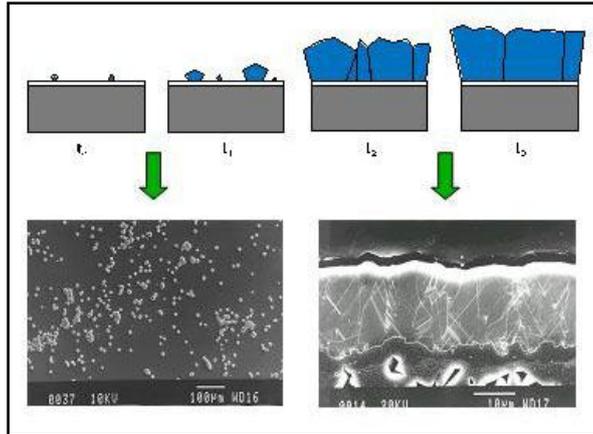


Fig. III.16 : Croissance de silicium en film mince sur céramique par RT-CVD. (Source CNRS-PHASE [42])

Les rendements restent cependant inférieurs à 10 % et ne passent à des valeurs de 13-16 % qu'avec une recristallisation pour augmenter la taille des grains. Sur support céramique on est parvenu à un rendement de 9,5 %.

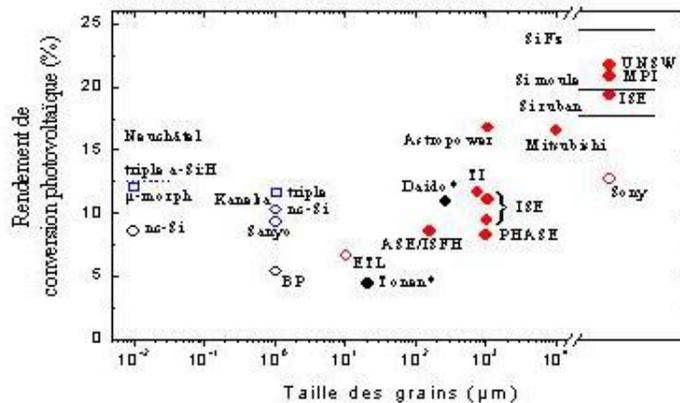


Figure. III.17 : Progression des rendements de conversion en laboratoire des cellules en fonction de la taille des grains. (Source CNRS-PHASE [16])

IV.5. Silicium nanocristallin et amorphe

a) État de l'art et perspectives

Depuis 1975, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, à l'état amorphe, dont les liaisons pendantes sont saturées par hydrogénation. Ce matériau présente trois avantages majeurs : un fort coefficient d'absorption ce qui autorise de très faibles épaisseurs l'ordre du micron diminuant ainsi le risque de pénurie de silicium, une faible consommation

énergétique durant le cycle de production avec un temps de retour énergétique inférieur à un an, et une aptitude à être déposé en grandes surfaces unitaires de l'ordre du m^2 d'un seul tenant.

Par contre ses deux points faibles sont le rendement de conversion et la dégradation sous lumière (instabilité dite de Staebler-Wronski), qui sont de mieux en mieux surmontés par des artifices technologiques tels que, en particulier, une superposition de deux structures p-i-n en "tandems" ou de trois couches actives très minces. On a réduit ainsi la dégradation sous lumière de 30 % à 10 %.

La structure la plus simple d'une cellule en silicium amorphe se compose d'une zone dopée bore, d'une zone intrinsèque et d'une zone dopée phosphore (p-i-n). Chaque élément peut être directement connecté en série sans besoin de liaisons externes. Bien que les rendements en laboratoire aient atteint les 20 % en double ou triple p-i-n, les rendements industriels stagnent depuis des années sous la barre des 10 %, de sorte que des études très prometteuses ont été reprises dans le domaine des matériaux nano- ou micro-cristallins et même presque amorphes (micro-morphe) avec des rendements de conversion déjà supérieurs à la barre des 10 %.

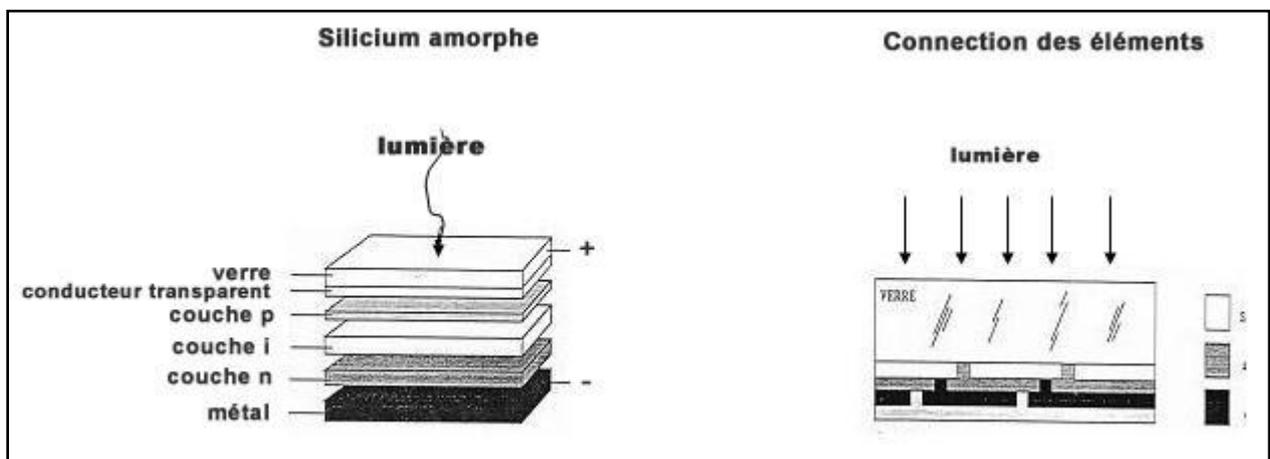


Fig. III.18 : Cellule à base de silicium amorphe à structure p-i-n et vue en coupe d'un module.

En effet, ces travaux ont démontré que des couches de micro-cristallines ou micro-morphes de silicium hydrogéné déposées en utilisant des techniques de décharge radio fréquence permettent de réaliser des cellules ne présentant plus aucune dégradation sous exposition à la lumière. L'idée est d'empiler une cellule p-i-n a-Si:H classique avec une cellule extrêmement fine de quelques microns d'épaisseur du type p-i-n μ c-Si:H (à l'Institut de Microtechnique de Neuchâtel) ou p-i-n micro-morphe Si:H (à l'École Polytechnique de Palaiseau). [17]

Chapitre IV

Résultats de la simulation

Partie I : Logiciel de Simulation des caractéristiques électriques

I.1 Logiciel PC-1D

PC-1D est un logiciel de simulation électrique commercialisé qui résout les équations décrivant le transport des électrons et des trous dans une dimension dans les dispositifs à matériaux semi-conducteurs cristallins. Ce logiciel est plus particulièrement conçu pour la simulation des dispositifs photovoltaïques.

I.2. Aperçu du logiciel

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire PC1D a 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 ce domaines.

Son utilisation est très pratique, il permet de simuler n'importe qu'elle 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 présenter sur la Figure I.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.

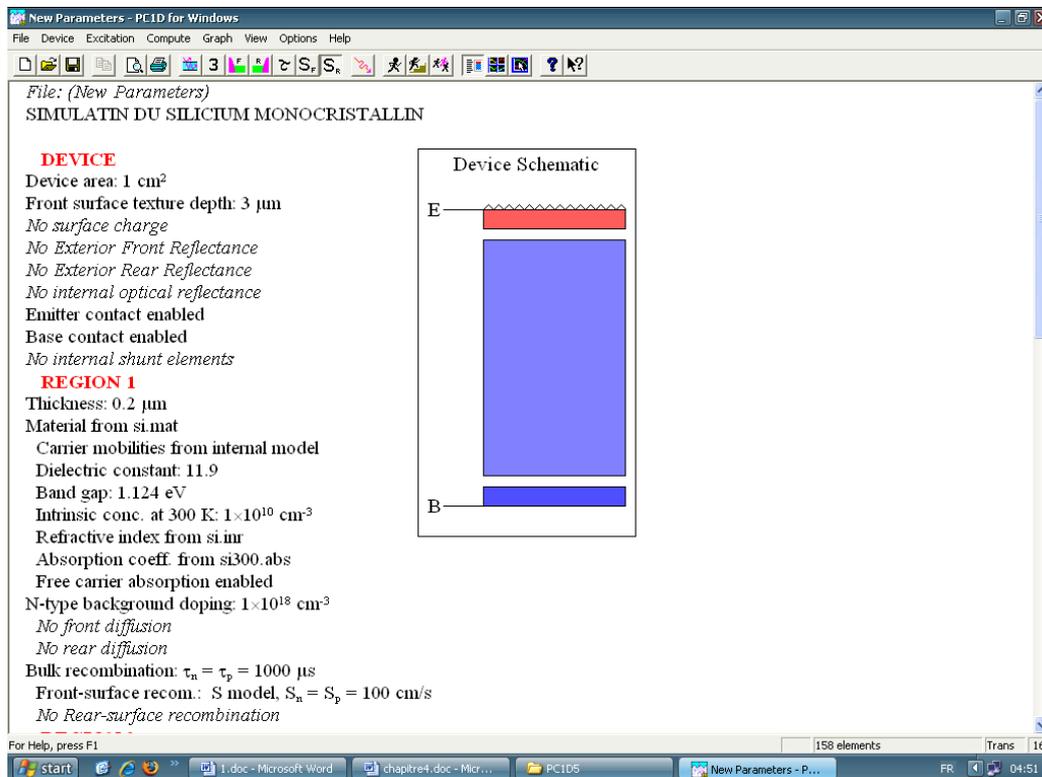


Figure I.1 Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

I.3. Les paramètres du dispositif (Device)

- Aire du dispositif (Device) : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur le photocourant d'une manière appréciable. Dans notre simulation, nous avons choisi une surface de 1cm^2 .
- Surface texturée : les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur (depth) $3\mu\text{m}$ et d'angle facial $54,74^\circ$. 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 (SiO_2), 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.
- Réflectance optique interne : elle est négligée dans notre simulation, nous considérons que les surfaces sont spéculaires et non diffusées c.à.d. non rugueuses.
- Par défaut, l'émetteur et la base sont connectés au circuit, tandis que le collecteur est déconnecté.
- Quatre résistances shunt peuvent être introduits, chacune d'elle peut être conducteur, diode ou condensateur. Dans notre cas nous considérons qu'il n'y a pas d'élément qui peut shunter le circuit.

I.4. Les paramètres des régions

- L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium monocristallin elle varie sur un intervalle compris entre $0,1\mu\text{m}$ et $2,5\mu\text{m}$ et pour le silicium polycristallin entre $0,01\mu\text{m}$ et $0,1\mu\text{m}$.
- Le matériau utilisé: les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat), ils sont fournis 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 est : $a = (2,6 \cdot 10^{-27} \cdot n \cdot \lambda^3) + (2,7 \cdot 10^{-24} \cdot p \cdot \lambda^2)$.
- Type et concentration de dopage : de type n ou p, la concentration maximale est de

10^{19}cm^{-3} . Ce logiciel présente quatre profils de dopages : le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erf.

- 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.

I.5. Les paramètres d'excitation

- Deux fichiers intégrés dans le logiciel permettent de simuler la caractéristique courant-tension et autres 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, $T=25^\circ\text{C}$.
- 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 n), par un flux lumineux d'une intensité de $0,1\text{ W/cm}^2$. 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.

I.6. 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. [27]

Partie II : Simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin.

Cette partie consiste à simuler une cellule photovoltaïque n^+pp^+ à base de silicium monocristallin de surface 1cm^2 avec une texturation à la surface avant pour optimiser le captage du rayonnement.

II.1. La caractéristique courant/ tension :

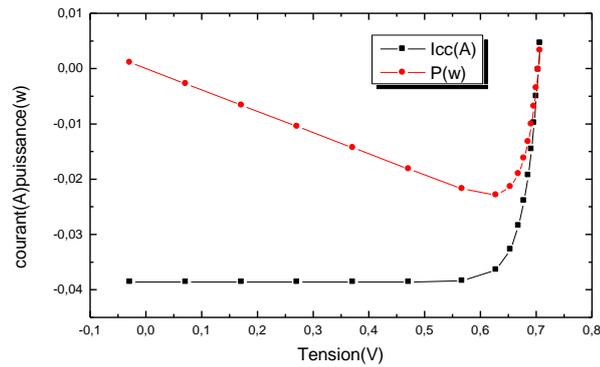


Figure II.3. La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de silicium monocristallin

$\left\{ \begin{array}{l} I_{cc}=0.0386 \text{ A} \\ P_{max}=0.02287 \text{ W} \\ V_{co}=0.7043 \text{ V} \end{array} \right.$	par conséquence	$\left\{ \begin{array}{l} \eta=20.87 \% \\ FF=84.12\% \end{array} \right.$
--	-----------------	--

II.2. La réponse spectrale :

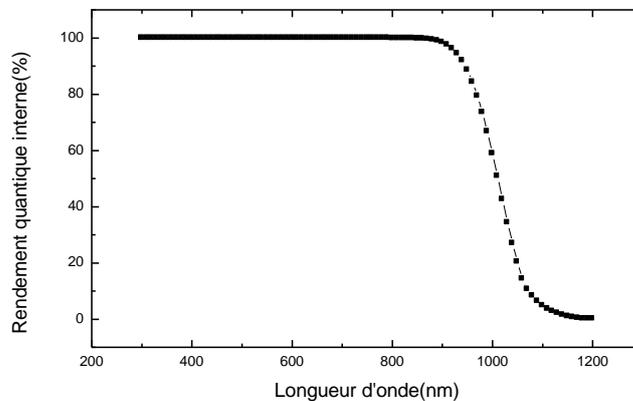


Figure II.4. Variation du rendement quantique pour une cellule solaire à base de silicium monocristallin

II.3. Influence des paramètres de la base sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et le rendement η :

II.3.1. Les démarches suivies pour la simulation :

- Optimisation des paramètres de la base :

Pour un matériau donné, les longueurs caractéristiques d'absorption L_{λ} et de recombinaison L_n

Commandent en première approximation, l'épaisseur de la base.

Il faut que $X_B \geq L_\lambda$ sur la plus grande partie du spectre, et $L_n > X_B$ si possible.

Pour le silicium cristallin, on a l'intérêt de choisir des bases relativement minces, pour augmenter à la fois le photocourant et la tension.

Dans tous les cas où $X_B < L_\lambda$, les pertes à l'absorption deviennent importantes c'est une raison de choisir des bases avec des épaisseurs le plus petit possible.

Il s'agit alors de faire en sorte que le parcours des photons dans la cellule soit supérieur à son épaisseur.

Le dopage de la base est nécessairement faible de façon à y minimiser la recombinaison des porteurs photogénérés. Ce choix réduit le V_{co} , mais permet de garder un rendement d'absorption et de collecte acceptable. [17]

La base est la région la plus faiblement dopée par rapport aux autres régions pour cela on va commencer par le calcul de ses paramètres.

L'optimisation des paramètres de la base (épaisseur et dopage) ce faite on fixant le dopage et l'épaisseur de la base et de la couche BSF et varié ceux correspond à la base en suite nous avons calculé les valeurs caractéristiques de la cellule en fonction de l'épaisseur et du dopage de la base.

Afin d'obtenir ces caractéristiques nous avons fixé les paramètres de la base qui donnent des meilleurs résultats.

Les paramètres de l'émetteur et du BSF sont tels que :

- Epaisseur de l'émetteur $X_E = 0.2 \mu\text{m}$.
- Dopage de l'émetteur $N_D = 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$.
- Epaisseur du substrat $X_{BSF} = 5 \mu\text{m}$.
- Dopage du substrat $N_{BSF} = 5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Les intervalles correspondent aux paramètres de la base comme suit :

- Epaisseur de la base $X_B = [10, 200] \mu\text{m}$.
- Dopage de la base $N_A = [1.10^{16}, 1.10^{18}] \text{ cm}^{-3}$.

II.3.2. Etude de l'influence des paramètres de la base :

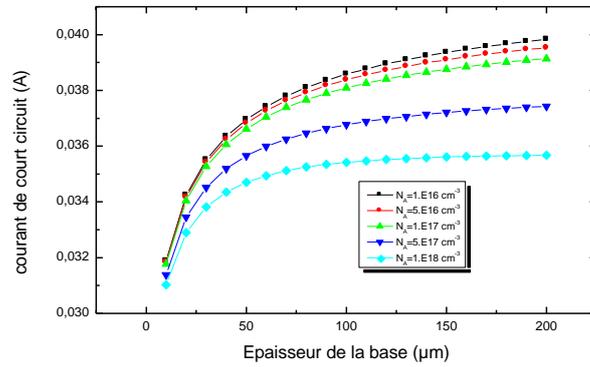


Figure II.5.1 Variation du courant de court circuit I_{cc} en fonction de l'épaisseur et le dopage de la base

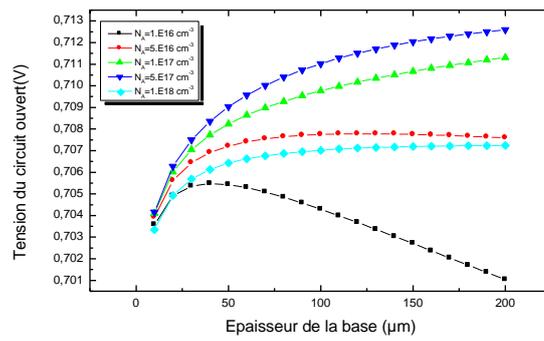


Figure II.5.2 Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur et le dopage de la base

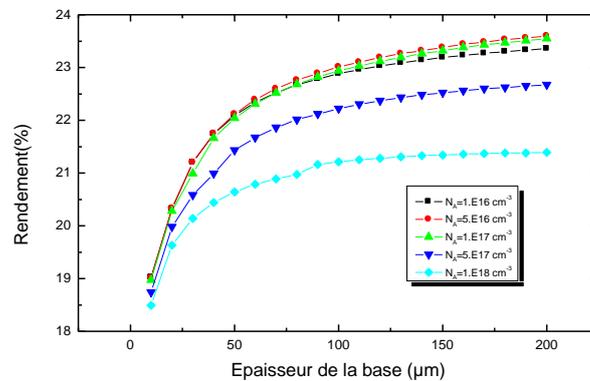


Figure II.5.3 Variation rendement η en fonction de l'épaisseur et le dopage de la base

II.3.3. Interprétation des résultats :

La figure II.5.1 illustre que le courant de court circuit varie très peu en fonction du dopage et surtout dans les petites valeurs du dopage [10^{16} , 5.10^{16} , 10^{17}], cette variation est inversement proportionnelle aux valeurs croissantes du dopage. On peut dire pour cette variation que les grandes valeurs du dopage vont diminuer la durée de vie des porteurs minoritaires qui mène à une diminution de la longueur de diffusion des électrons photogénérés et une augmentation de la recombinaison.

Pour les valeurs de l'épaisseur on remarque une augmentation rapide du courant de $10\mu\text{m}$ jusqu'à $50\mu\text{m}$, au-delà de cette valeur la variation devient presque constante.

La tension du circuit ouvert subit une variation remarquable en fonction du dopage et une augmentation très rapide en fonction de l'épaisseur.

La figure II.5.2 donne l'influence des paramètres de la base (épaisseur et dopage) sur le rendement de la cellule photovoltaïque. On remarque que le rendement obtenu pour une épaisseur de $80\mu\text{m}$ et un dopage de 5.10^{16} cm^{-3} est de 22.76% et pour une épaisseur de $200\mu\text{m}$ donne un rendement de 23.6%. Cette différence de $120\mu\text{m}$ va engendrer qu'une augmentation de 0.84% pour cette raison on prend l'épaisseur de $80\mu\text{m}$.

II.3.4. Valeurs de l'épaisseur et le dopage de la base pour obtenir un rendement optimale :

- Epaisseur de la base : $80\mu\text{m}$.
- Dopage de la base : 5.10^{16} cm^{-3}

1.4. Influence des paramètres de l'émetteur sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et le rendement η :

II.4.1. Les démarches suivies pour la simulation :

➤ Optimisation des paramètres de l'émetteur :

L'émetteur a pour rôle de générer la barrière de potentiel, pour le silicium cristallin le dopage idéal est proche de 10^{18} cm^{-3} et l'épaisseur de l'émetteur entre 0.1 et $2.5\mu\text{m}$ pour :

Laisser passer les photons qui doivent être absorbés par la base.

Absorber les photons de haute énergie et collecter les photoporteurs ainsi générés.

La résistance-série de la photopile est alors contrôlée par l'émetteur et reste suffisamment faible pour conserver un facteur de forme élevé. [17]

Cette simulation nous a permis de trouver une épaisseur et un dopage de l'émetteur offrant des résultats optimaux, pour cela on va étudier l'influence de ces deux paramètres sur le courant de court circuit, la tension du circuit ouvert et du rendement.

Pour faire cette étude on va fixer les paramètres de la base et de la couche BSF et varier celle de l'émetteur comme suit :

Les paramètres de la base et de la couche BSF sont tels que :

- Epaisseur de la base $X_B=80 \mu\text{m}$.
- Dopage de la base $N_A=5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$.
- Epaisseur du substrat $X_{BSF}=5 \mu\text{m}$.
- Dopage du substrat $N_{BSF}=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Les intervalles correspondant aux paramètres de l'émetteur sont comme suit :

- Epaisseur de l'émetteur $X_E= [0.1, 2.5] \mu\text{m}$.
- Dopage de l'émetteur $N_E= [1.10^{17}, 5.10^{18}] \text{ cm}^{-3}$.

II.4.2. Etude de l'influence des paramètres de l'émetteur :

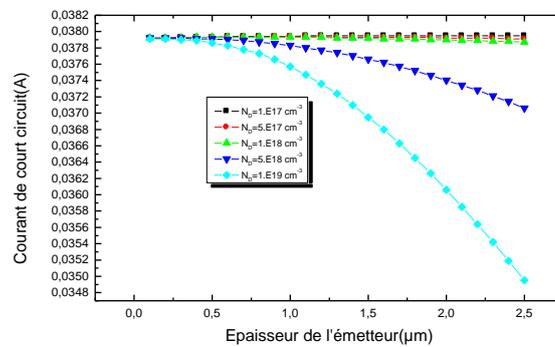


Figure II.6.1 Variation du courant de court circuit I_{cc} en fonction de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur

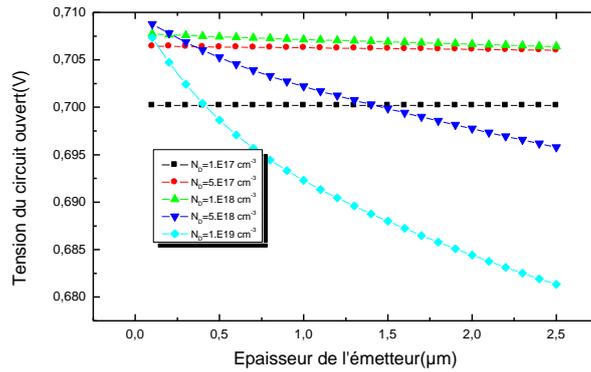


Figure II.6.2 Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur

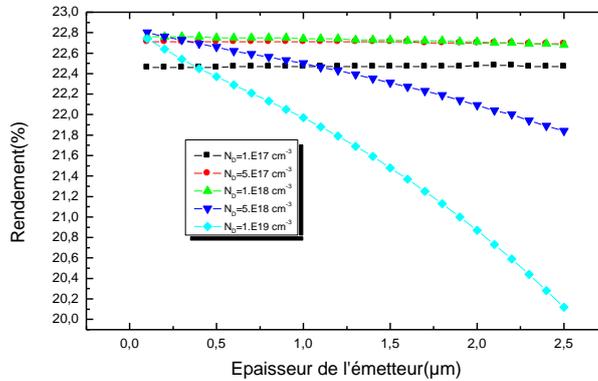


Figure II.6.3 Variation du rendement η en fonction de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur

II.4.3. Interprétation des résultats :

La variation du courant de court circuit présentée dans la figure II.6.1 montre une stabilité remarquable pour les dopages inférieurs à 10^{18} cm^{-3} et une diminution très rapide quand on a augmenté le dopage et l'épaisseur de l'émetteur. On peut dire que l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur a une influence sur la profondeur de la zone des charges d'espace car elle ne permet pas la diffusion des porteurs photogénérés qui ont une longueur de diffusion faible et par conséquent diminué le photocourant.

La figure II.6.3 montre que le rendement prend presque la même configuration que la variation du courant et on remarque qu'il prend sa valeur optimale pour une épaisseur $X_E=0.1 \mu\text{m}$ et un dopage de $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

II.4.4. Valeurs de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur pour obtenir un rendement optimal :

- Épaisseur de l'émetteur : $0.1 \mu\text{m}$.

■ Dopage de l'émetteur: $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Les valeurs des paramètres (épaisseur et dopage) de la base et l'émetteur donnant un rendement optimal de la cellule à base de silicium monocristallin $\eta=22.8 \%$ vont montrer dans le tableau suivant :

Épaisseur de la base	80 μm
Dopage de la base	$5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Épaisseur de l'émetteur	0.1 μm
Dopage de l'émetteur	$5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$

II.5 .Effet de la couche BSF :

Afin de mettre en évidence la passivation de la face arrière par la couche p+, c'est-à-dire le maintien des porteurs minoritaires (les électrons) à l'écart de la face arrière très recombinante, nous avons comparé la caractéristique courant/tension et la réponse spectrale des cellules standards et celle avec BSF

II.5.1. Caractéristique I(V) :

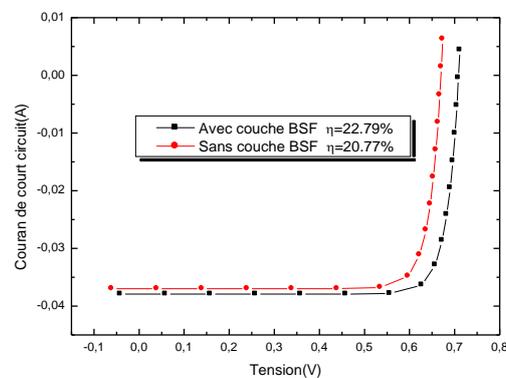


Figure II.7. La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de silicium monocristallin avec et sans couche BSF

II.5.2. Réponse spectrale :

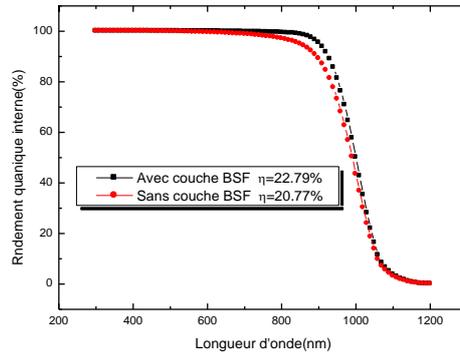


Figure II.8. Influence de la couche BSF sur la réponse spectrale.

II.6. Effet de la texturation :

La texturation de la surface avant permet de :

Effets de la texturation:

1. diminution de la réflexion
2. augmentation du parcours des photons dans le matériau ($1/\sin \theta$)
3. augmente le piégeage de la lumière[X]

Les caractéristiques courant/tension et la réponse spectrale d'une cellule solaire avec texturation et d'une cellule solaire standard sont reportées sur les deux figures suivantes :

II.6.1.La caractéristique I(V) :

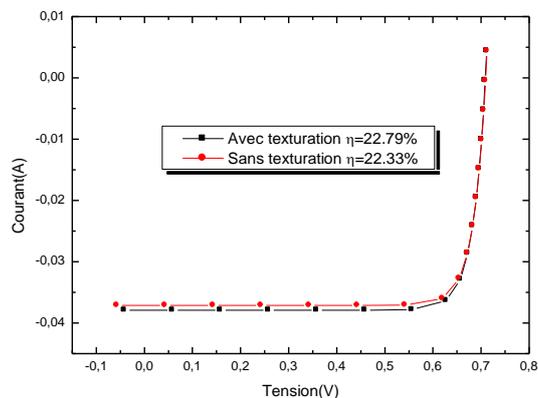


Figure II.9. La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de silicium monocristallin avec et sans texturation.

II.6.2. Réponse spectrale :

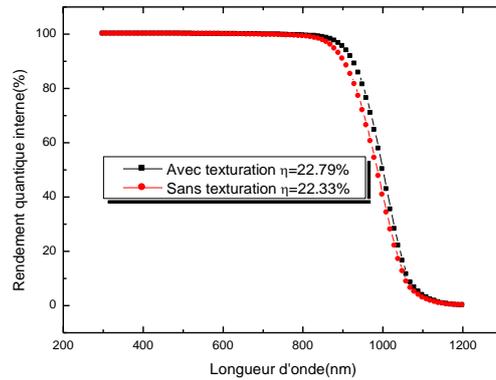


Figure II.10. Influence de la texturation sur la réponse spectrale.

Partie III : Simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin.

Actuellement, la recherche dans le domaine des cellules solaires à base du silicium est orientée vers le silicium polycristallin. Ceci est dû principalement à deux facteurs importants; Le faible prix de revient et le contrôle des propriétés du matériau à travers la taille, l'activité et la composition chimique des grains et l'orientation des joints des grains durant l'élaboration [13].

III.1 .La caractéristique courant/tension :

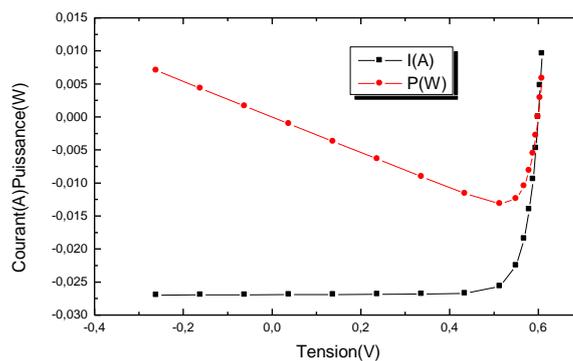


Figure III.1. La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de silicium polycristallin

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{cc}=0.0269 \text{ A} \\ P_{max}=0.01317 \text{ W} \\ V_{co}=0.5999 \text{ V} \end{array} \right. \quad \text{par conséquent} \quad \left\{ \begin{array}{l} \eta=13.17 \% \\ FF=81.61\% \end{array} \right.$$

III.2. La réponse spectrale :

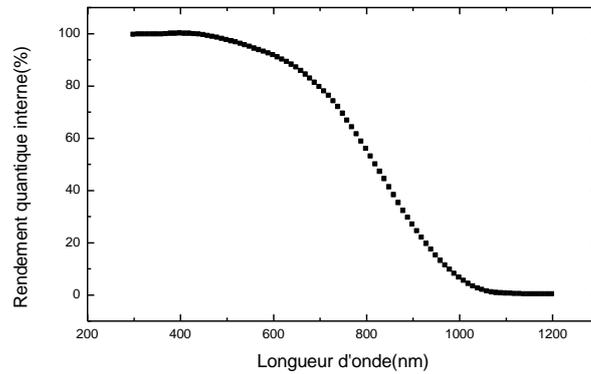


Figure III.2. Variation du rendement quantique pour une cellule solaire à base de silicium polycristallin

III.3. Influence des paramètres de la base sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et le rendement η :

III.3.1. Les démarches suivies pour la simulation :

➤ Optimisation des paramètres de la base :

Pour calculer les paramètres de la base donnant un rendement optimal on va fixer les paramètres de l'émetteur et de la couche BSF et on vari ceux de la base.

Les paramètres de l'émetteur et du BSF sont tels que :

- Epaisseur de l'émetteur $X_E=0.01 \mu\text{m}$.
- Dopage de l'émetteur $N_D=1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$.
- Epaisseur du substrat $X_{BSF}=0.02\mu\text{m}$.
- Dopage du substrat $N_{BSF}=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Les intervalles correspondent aux paramètres de la base comme suit :

- Epaisseur de la base $X_B= [1, 15] \mu\text{m}$.
- Dopage de la base $N_A= [1.10^{16}, 1.10^{18}] \text{ cm}^{-3}$.

III.3.2. Etude de l'influence des paramètres de la base :

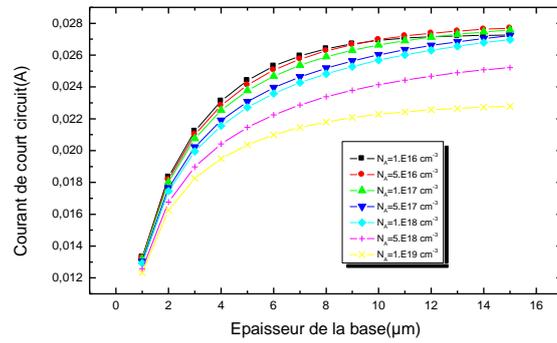


Figure III.3.1. Variation du courant de court circuit I_{cc} en fonction de l'épaisseur et le dopage de la base

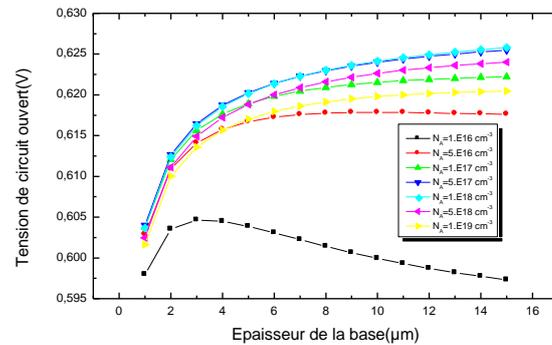


Figure III.3.2. Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur et le dopage de la base

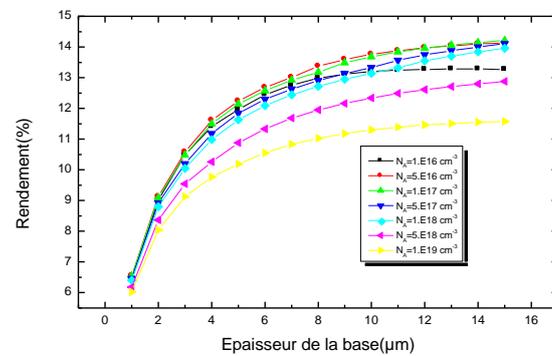


Figure III.3.3. Variation du rendement η en fonction de l'épaisseur et le dopage de la base :

III.3.3. Interprétation des résultats :

L'effet de la variation du dopage et de l'épaisseur de la base sur le courant de court-circuit est représenté dans la figure III.3.1

On remarque que I_{cc} est inversement proportionnel aux valeurs croissantes du dopage et en déduit que cette croissance diminue la longueur de diffusion des électrons photogénérés et augmente la recombinaison mais cette variation est peu faible en fonction de l'épaisseur de la base, la variation de I_{cc} est remarquable pour les petites épaisseurs (de 1 jusqu'à $10\mu\text{m}$) au delà de cette valeur la variation est presque constante.

L'influence des paramètres de la base sur la tension du courant ouvert est montrée dans la figure III.3.2

La tension varie très peu en fonction de l'épaisseur de la base et subit une augmentation très rapide en fonction du dopage de 10^{16} jusqu'à 5.10^{16} et à partir de cette valeur la variation est affaiblit.

Le profil du rendement de la conversion PV en fonction des paramètres de la base est montré dans la figure III.3.3

La variation du rendement montre que pour une épaisseur de $15\mu\text{m}$ et un dopage de 1.10^{17}cm^{-3} donne un rendement optimale de $\eta=14,11\%$ et pour le même dopage et une épaisseur de $10\mu\text{m}$ on trouve un rendement de $\eta=13,37\%$. puisque cette augmentation d'épaisseur ($5\mu\text{m}$) ne guerre que de $0,74\%$ on choisit l'épaisseur de $10\mu\text{m}$.

III .3.4. Valeurs de l'épaisseur et le dopage de la base pour obtenir un rendement optimale :

- Epaisseur de la base : $10\mu\text{m}$.
- Dopage de la base : 1.10^{17}cm^{-3}

II.4. Influence des paramètres de l'émetteur sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et le rendement η :

III.4.1. Les démarches suivies pour la simulation :

➤ Optimisation des paramètres de l'émetteur :

On a intérêt d'avoir une épaisseur de l'émetteur la plus faible possible, pour un bon photocourant et un meilleur rendement.

Ceci s'explique par le fait que les porteurs minoritaires photogénérés par les courtes longueurs d'ondes, parviennent facilement à atteindre la zone de charge d'espace, par contre si l'épaisseur de l'émetteur est importante, ces photoporteurs se recombinent avant même d'atteindre cette zone.

Pour faire cette étude on va fixer les paramètres de la base et de la couche BSF et varié celle de l'émetteur comme suit :

Les paramètres de la base et de la couche BSF sont tels que :

- Epaisseur de la base $X_B=10 \mu\text{m}$.
- Dopage de la base $N_A=1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$.
- Epaisseur du substrat $X_{BSF}=0.02\mu\text{m}$.
- Dopage du substrat $N_{BSF}=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Les intervalles correspondent aux paramètres de l'émetteur sont comme suit :

- Epaisseur de l'émetteur $X_E= [0.01, 0.1] \mu\text{m}$.
- Dopage de l'émetteur $N_E= [1.10^{17}, 5.10^{19}] \text{ cm}^{-3}$.

III.4.2. Étude de l'influence des paramètres de l'émetteur :

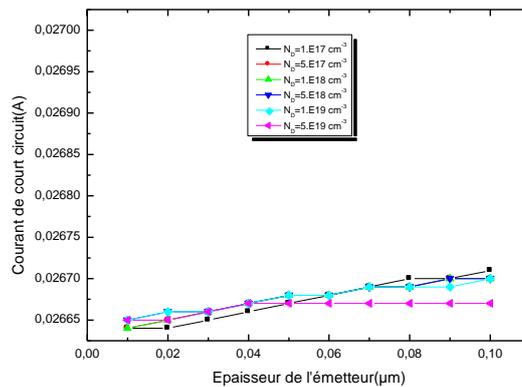


Figure III.4.1. Variation du courant de court circuit I_{cc} en fonction de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur

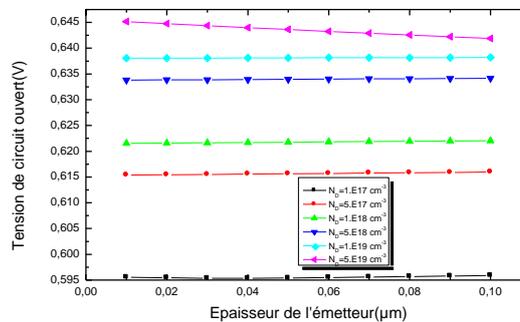


Figure III.4.2. Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur

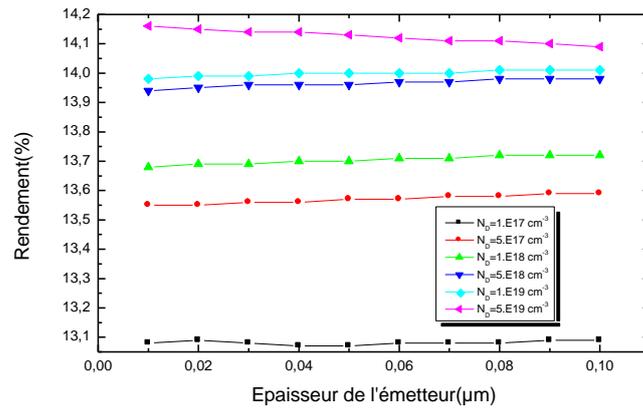


Figure III.4.3 Variation du rendement η en fonction de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur

III.4.3. Interprétation des résultats :

La figure III.4.1 donne la variation du courant de court circuit en fonction des paramètres de l'émetteur (épaisseur et dopage), on remarque que ces paramètres n'influent pas beaucoup sur le I_{cc} et ces valeurs restent presque constantes, ceci est expliqué par la présence des joints de grains dans le silicium polycristallin qui diminuent le déplacement des porteurs minoritaires photogénérés et augmentent la recombinaison.

La tension de circuit ouvert illustrée dans la figure III.4.2 montre une augmentation remarquable en fonction des valeurs croissantes du dopage.

On remarque qu'on a un bon rendement photovoltaïque pour une épaisseur $X_E = 0.1 \mu\text{m}$ et un dopage de $5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

III.4.4. Valeurs de l'épaisseur et le dopage de l'émetteur pour obtenir un rendement optimal :

- Epaisseur de l'émetteur : $0.01 \mu\text{m}$.
- Dopage de l'émetteur: $5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Les valeurs des paramètres (épaisseur et dopage) de la base et l'émetteur donnant un rendement optimal de la cellule à base de silicium polycristallin vont montrer dans le tableau suivant :

Epaisseur de la base	$10 \mu\text{m}$
Dopage de la base	$1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Epaisseur de l'émetteur	$0.01 \mu\text{m}$
Dopage de l'émetteur	$5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$

III.5. Effet de la couche BSF :

III.5.1. Caractéristique I(V) :

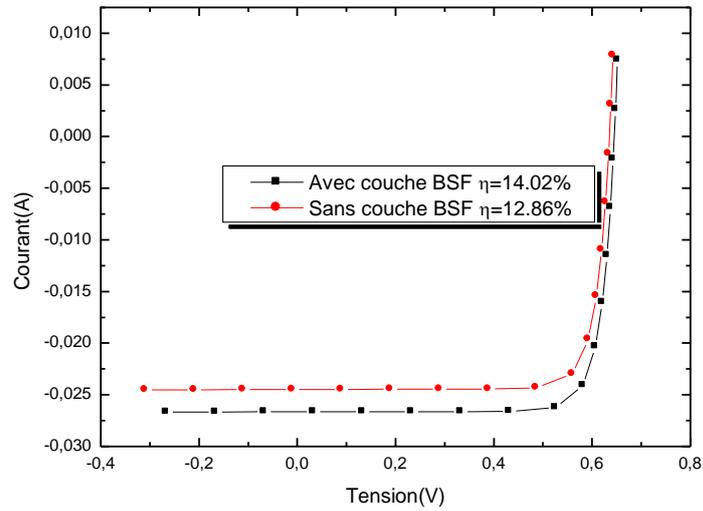


Figure III.5. La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de silicium polycristallin avec et sans couche BSF

III.5.2. Réponse spectrale :

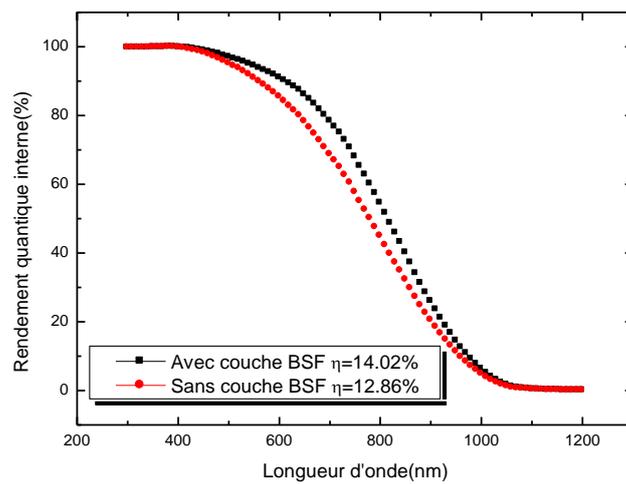


Figure III.6. Influence de la couche BSF sur la réponse spectrale

III.6. Effet de la texturation :

III.6.1. Caractéristique I(V) :

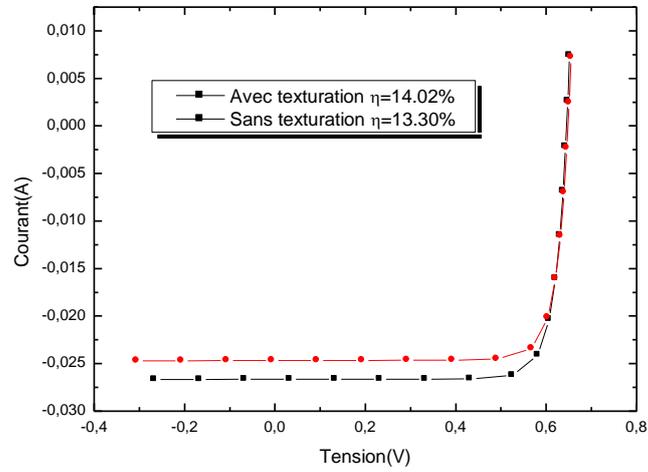


Figure III.7. La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de silicium polycristallin avec et sans texturation

III.6.2. Réponse spectrale :

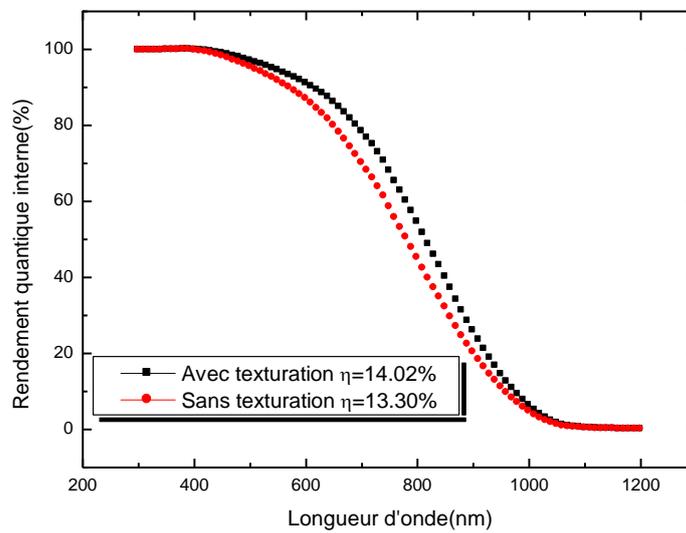


Figure III.8. Influence de la texturation sur la réponse spectrale

Partie IV : Etude comparative.

IV.1 Etude comparative entre les cellules à base de silicium monocristallin et à base de silicium polycristallin :

On établit un tableau qui nous permet de comparer les grandeurs photovoltaïques des cellules solaires obtenues après simulation dans les deux cas : silicium monocristallin et silicium polycristallin :

Grandeurs photovoltaïques	Cellule base de silicium monocristallin	Cellule à base de silicium polycristallin
I _{cc} (A)	0.0379	0.0266
V _{co} (V)	0.7088	0.6451
η (%)	22.79	14.02
FF(%)	84.83	81.70

IV.2. La caractéristique courant/tension :

Les caractéristiques courant/tension et la réponse spectrale des deux cellules solaires monocristallines et polycristallines sont reportées sur les deux figures suivantes :

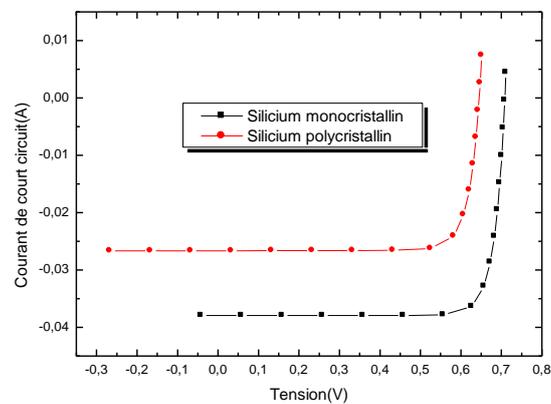


Figure IV.1. Caractéristique I(V) des deux structures :

(a) Silicium monocristallin

(b) Silicium polycristallin

(a) I_{cc}=0.0379A

V_{co}=0.7088V

η=22.79%

FF=84.83%

(b) I_{cc}=0.0266A

V_{co}=0.6451V

η=14.02%

FF=81.70%

Le résultat important de ces mesures est que la résistance parallèle (R_p) des cellules à base de silicium monocristallin est inférieure à celle des cellules à base de silicium polycristallin. Ceci signifie que les courants de fuite sont plus importants dans le premier cas.

IV.2. La réponse spectrale :

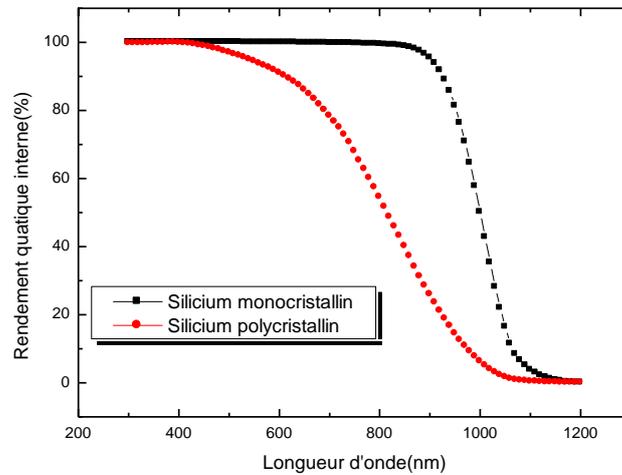


Figure IV.2. Réponse spectrale des deux structures :

(a) Silicium monocristallin

(b) Silicium polycristallin

(a) $I_{cc}=0.0379A$

$V_{co}=0.7088V$

$\eta=22.79\%$

$FF=84.83\%$

(b) $I_{cc}=0.0266A$

$V_{co}=0.6451V$

$\eta=14.02\%$

$FF=81.70\%$

On observe une augmentation importante de la réponse spectrale autour de 900 nm. Le champ arrière améliore, de manière notable, la collecte des porteurs.

IV.3. Conclusion:

Le présent chapitre se divise en quatre parties:

Nous avons présenté dans la première un aperçu du logiciel de simulation numérique des cellules solaires à une dimension PC-1D, qu'il permet de simuler n'importe qu'elle structure photovoltaïque selon les matériaux disponibles en fichier data.

Dans la deuxième et la troisième parties on a simulé deux cellules la première est à base de silicium monocristallin et la deuxième est à base de silicium polycristallin respectivement et trouver les paramètres optimaux de chaque région des deux cellules donnant les meilleurs caractéristiques de sortie comme suit:

Pour la cellule à base de silicium monocristallin:

Les paramètres optimaux sont:

$N_D=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$

$N_A=5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$

$X_B=80\mu\text{m}$

$X_E=0.1\mu\text{m}$.

Et les meilleurs performances sont:

$$I_{cc}=0.0379A \quad V_{co}=0.7088V \quad \eta=22.79\% \quad FF=84.83\%$$

Pour la cellule à base de silicium polycristallin:

Les parameters optimaux sont:

$$N_D=1.10^{19} \text{ cm}^{-3} \quad N_A=1.10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad X_B=10\mu\text{m} \quad X_E=0.01\mu\text{m}.$$

Les meilleurs performances sont:

$$I_{cc}=0.0266A \quad V_{co}=0.6451V \quad \eta=14.02\% \quad FF=81.70\%$$

La difference entre les deux cellules est présentée dans la quatrième partie qui consiste à faire une étude comparative entre les meilleurs performances de sortie des deux cellules.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque (PV) est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules PV.

La production mondiale d'énergie photovoltaïque augmente de façon importante depuis plusieurs années mais son développement reste limité par son coût qui reste trop élevé par rapport aux énergies fossiles et nucléaires. Afin de réduire le coût de fabrication, une solution consiste à utiliser des substrats minces, la part du matériau dans la réalisation du module étant d'environ 50%. Cependant, de nouvelles technologies adaptées aux substrats minces (inférieurs à 50 μm) sont à mettre en œuvre.

Nous avons présenté dans le premier chapitre les différents types des énergies renouvelables, le principe et la technologie des cellules solaires.

Nous présenterons dans le deuxième chapitre le matériau silicium qui est le matériau de base pour la fabrication des cellules solaires, leurs propriétés et les différents modes de cristallisations.

Dans le troisième chapitre, nous rappelons le principe de fonctionnement, les caractéristiques, les paramètres principaux d'une cellule PV et les facteurs limitant le rendement de conversion.

Une simulation numérique à une dimension en utilisant le logiciel de simulation PC1D des deux cellules photovoltaïques la première à base de silicium monocristallin et la deuxième à base de silicium polycristallin et faire une étude comparative entre les caractéristiques photovoltaïques des deux cellules.

Notre étude est basée sur une simulation numérique des deux cellules (monocristalline et polycristalline) pour trouver des paramètres technologiques optimaux en variant l'épaisseur et le dopage des couches.

La première partie de la simulation consiste à simuler une cellule solaire à base de silicium monocristallin, dont les paramètres optimaux des différentes couches sont :

$$X_B=80 \mu\text{m}, N_A=5.10^{16} \text{cm}^{-3}, X_E=0.1\mu\text{m}, N_D=5.10^{18} \text{cm}^{-3}$$

Les meilleurs résultats de cette simulation sont:

$$I_{cc}=0.0379\text{A} \quad V_{co}=0.7088\text{V} \quad \eta=22.79\% \quad FF=84.83\%$$

La simulation de la cellule à base du Silicium polycristallin est présentée dans la deuxième partie et les paramètres optimaux sont :

$$X_B=10 \mu\text{m}, N_A=1.10^{17} \text{cm}^{-3}, X_E=0.01\mu\text{m}, N_D=5.10^{19} \text{cm}^{-3}$$

Les meilleurs résultats sont :

$$I_{cc}=0.0266\text{A} \quad V_{co}=0.6451\text{V} \quad \eta=14.02\% \quad FF=81.70\%$$

En conclusion que les cellules solaires à base de silicium monocristallins donnent des rendements de conversion et des réponses spectrales meilleurs que les cellules à base de silicium polycristallin ceci

est expliqué par la présence des joints de grains dans le polysilicium qui influe sur la vitesse de recombinaison.

Références

Références

- [1] D.M.Chapin., Fuller C.S.and Pearson G.L.: «A new silicon pn junction photocell for converting solar radiation into electrical power». J. Appl. Phys., vol. 25, 1954, pp. 676-677.
- [2] H.Mathieu «physique des cellules solaires et des composants électroniques». Paris : Ed. Masson, 1990, P 458-473.
- [3] M.Orgeret. «Les piles solaires, le composant et ses applications».Paris : Ed. Masson, 1985, P 247.
- [4] Ricauda. «Photodiode à semiconducteur dans : photopiles solaires. De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés»Presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, 1997, P49-51.
- [5] M. A.Green.: «Silicon Solar Cells : Advanced principles practice. Sydney : Center for photovoltaic devices and systems», Sydney, Australia, UNSW, 1995, 336 p.
- [6] S.M.Sze Semiconductor Devices. New York : John Wiley, 1981.
- [7] WINTER (C.J.), SIZMANN (R.L.) et VANT-HULL (L.L.).«Solar power plants. Fundamentals,Technology, Systems, Economics». Springer-Verlag(1991).
- [8] Jianhua Zhao, Aihua Wang, Pietro P. Altermatt, Stuart R. Wenham and Martin A. Green. «24% efficient perl silicon solar cell»: Recent improvements in high efficiency silicon cell research. Solar En.Mat.&Sol.Cells, 1996, Vol. 41/42, pp. 87-99.
- [9] Zhenqiang Xi, Deren Yang et al. «Investigation of texturization for monocrystalline silicon solar cells with different kinds of alkaline». Renewable Energy, 2004, Vol. 29, pp. 2101-2107.
- [10] M. J. Stocks, A. J. Carr and A. W. Blakers. «Texturing of polycrystalline silicon». Solar En.Mat.&Sol.Cells, 1996, Vol. 40, pp. 33-42.
- [11] P. Fath, C. Borst et al. «Progress in a novel high-throughput mechanical texturization technology for highly efficient multicrystalline silicon solar cells». Solar En.Mat.&Sol.Cells, 1997, Vol. 48, pp. 229-236.

[12] M. Bashahu and A. Habyarimana. «Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance. Renewable Energy», 1995, Vol. 6, pp. 129-138.

[13] M^{elle} Baya ZEBENTOUT « *Silicium Polycristallin : Conversion Photovoltaïque de l'Énergie Solaire et Dispositifs Électroniques* ».thèse de doctorat d'état Sidi Bel-Abbés(2007)

[14] A .Beiser. Physique Appliquée : Cours et Problèmes. McGrawHill, série Schaum

[15] Ander Laugier. « Les photopiles solaires du matériau du dispositif aux applications 1981». Institut National des Sciences Appliquées-Lyon 1981.

[16] A.Shah., Matériaux électroniques amorphes Vol. I&II, Polycopié EPFL/Uni-NE, Neuchâtel (1993)

[17] B .Equer. Energie solaire photovoltaïque. Volume 1 :Physique et Technologie De La Conversion photovoltaïque. Copyright 1993 ; Edition Marketing.

[18] Jérôme Damon-Lacoste«Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si:H/c-Si. Rôle prépondérant de l'hydrogène.»Thèse de doctorat LPICM –

Laboratoire de Physique des Interfaces et Couches Minces (Ecole polytechnique) 2007

[19] Fatima Abdo. «Croissance De Couches Minces De Silicium Par Epitaxie En Phase liquide À Basse Température pour Applications Photovoltaïques».Thèse de doctorat. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2007.

[20] Nichiporuk Oleksiy. «Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités». Thèse de doctorat. L'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.

[21] Chenoufi Hakim. «Optimisation Du Procédé Technologique De Réalisation D'une Cellule Solaire Par La Technique De Diffusion».Thèse de doctorat. UNIVERSITE DE BATNA.2005.

[22] Roshanak Radbeh«Réalisation et caractérisation de cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones» Thèse de doctorat Université de Limoges 2008.

[23] Kaminski A. : Etudes des étapes technologiques critiques dans la production des cellules solaires en silicium multicristallin. Thèse. Lyon : INSA de Lyon, 1997, 163 p.

[24] Bruno Thuillier. «Caractérisation Structurale Des Contacts Ohmiques Réalisés A Partir D'ENCREs Métalliques Sur Cellules Photovoltaïques En Silicium Multicristallin». Thèse de Doctorat. L'institut National Des Sciences Appliquées De LYON, 2001.

[25] Raúl-Andrés Bianchi «Techniques de conception des circuits int.gr.s analogiques pour des applications en haute température, en technologies sur substrat de silicium». Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.1999.

[26] Nguyen Huu Lam. «Épitaxie sélective et propriétés optiques, électriques des îlots quantiques de Ge sur Si(001)». Thèse de doctorat. L'université Paris XI Orsay 2004.

[27] Benahmed Benabdallah Nadia. «Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe». Thèse de Magister Tlemcen 2006.

[28] Senouci Ilham .Modélisation et simulation numérique d'une cellule photovoltaïque PIN à base de $Ga_{(1-x)}Al_xAs$. Thèse de magister. Centre universitaire de Béchar

[29] S. Bourdais, Thèse Univ L. Pasteur, Strasbourg (2000).

[30] Report IEA (International Energy Agency). Trends in photovoltaic application. PVPS T1-15, 2006, p6.

[31] F. Jahanshah, K. Sopian, S.H. Zaidi, M.Y. Othman, N. Amin and N. Asim. «Modeling the Effect of P-N Junction Depth on the Output of Planer and Rectangular Textured Solar Cells»

Solar Energy Research Institute, UKM, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia. 2009TEXT

[32] A.Claverie «Etat de l'art mondial de la technique photovoltaïque et politiques de promotion». Séminaire sur l'électricité photovoltaïque, Nice, 1994, 13 pages.

[33] Honsberg C., Bowden. Photovoltaics: Devices, Systems and Applications [CDROM]. Sydney (Aus) : Univ. of New South Wales, 1998.

[34] Observ'ER. Baromètre du Solaire Photovoltaïque. Systèmes Solaires, Avril 2004, N° 160, pp.69-83.

[35] Goetzberger A., Hebling C. Photovoltaic materials, past, present, future Solar En.Mat.&Sol.Cells, 2000, Vol. 62, pp. 1-19.

[36] Sarti D., Einhaus R. Silicon feedstock for the multicristalline photovoltaic industry. Solar En.Mat.&Sol.Cells, 2002, Vol. 72, pp. 27-40.

[37] *Dr. Romain Delamare , Ir. Olivier Bulteel, Prof. Denis Flandre. La conversion lumière / électricité: notions fondamentales & exemples de recherche* Microelectronics Laboratory (DICE), Wallonia Infrastructure for NanoFABrication (WINFAB)

Université catholique de Louvain Louvain-la-Neuve, Belgium.27mai 2009

[38] Shui-Yang Lien¹ and Dong-Sing Wu². «Simulation and Fabrication of Heterojunction Silicon Solar Cells from Numerical Computer and Hot-Wire CVD»

¹Department of Materials Science and Engineering, MingDao University, ChungHua 52345, Taiwan, Republic of China

²Department of Materials Science and Engineering, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, Republic of China. Progress In Photovoltaics: Research And Applications .2009PARAM POLY

[39] M. Green, Photovoltaics Special Research Center UNSWAnnual Report.

[40] PHOTOWATT International S.A., FR-38300 Bourgoin Jallieu .

[41] EPM-MADYLAM, FR-38400 St-Martin d'Hères.

[42] SOLEMS, Palaiseau FR. Production de petits modules de silicium amorphe pour applications en micropuissance.

[43] F. Khelifaoui, M. Remram. Fonctionnement à Haute Température d'une Cellule Solaire à Base du Silicium Polycristallin

[44] http://www.fnh.org/francais/doc/en_ligne/energie/dossier_art1.htm

[45] http://www.energies-renouvelables.org/energies_renouvelables.asp

[46] http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable

[47] http://www.energies-renouvelables.org/energie_geothermie.asp

[48] <http://dduk.free.fr/Repository/Articles/SemiCond.pdf>

[49] <http://www.icmcb.u-bordeaux.fr>.

[50] <http://www.techniques-ingenieur.fr>

Résumé

La filière silicium polycristallin en couches minces suscite un intérêt majeur dans l'industrie photovoltaïque. En effet, elle constitue une alternative très prometteuse à la filière silicium monocristallin puisqu'elle permet une réduction du coût matière. Théoriquement, pour un matériau monocristallin, les performances obtenues soient excessivement altérées par rapport à celles d'un matériau polycristallin à cause de la présence d'impuretés et de défauts cristallographiques, tels que les dislocations et les joints de grains.

Notre contribution consiste à optimiser les paramètres physiques et technologiques de deux cellules, la première est à base de silicium monocristallin et la deuxième est à base de silicium polycristallin. Aussi doit-on trouver les meilleures performances de sortie (I_{cc} , V_{co} , η et FF) des deux structures et enfin faire une étude comparative entre ces performances.

Ces travaux sont effectués en utilisant le logiciel de simulation numérique des cellules solaires à une dimension : PC-1D.

Mots clés : Silicium monocristallin, silicium polycristallin, cellule solaire, paramètres physiques, simulation, PC-1D.

ملخص

قطاع السليكون المتعدد البلورات ذات الطبقات الرفيعة أثار اهتماما كبيرا في الصناعة الكهروضوئية. في الواقع، هو بديل واعد عن قطاع السليكون أحادي البلورات لأنه يقلل من التكلفة المادية. نظريا، من أجل مادة أحادية البلورات، الخصائص التي تم الحصول عليها تكون أكبر بالمقارنة مع المادة متعددة البلورات بسبب وجود شوائب وعيوب البلورات مثل الاضطرابات وحدود الحبوب.

مساهمتنا في تحقيق أكبر قدر من المعالم الفيزيائية والتكنولوجية للخليتين، الأولى تعتمد على السليكون أحادي البلورات والثانية على أساس السليكون المتعدد البلورات وبالتالي يجب علينا أن نجد أفضل خصائص الإصدار (I_{cc} , V_{co} , η et FF للبنيتين) ومن ثم إجراء دراسة مقارنة بين هذه الخصائص.

نقد هذا العمل باستخدام برامج المحاكاة العددية للخلايا الشمسية في بعد واحد: PC-1D.
كلمات مفتاحية: السليكون أحادي البلورات، السليكون متعدد البلورات، الخلايا الشمسية، المعالم الفيزيائية، المحاكاة PC-1D.

Abstract

The sector polysilicon thin film aroused great interest in the photovoltaic industry. Indeed, it is a promising alternative to the sector since monocrystalline silicon reduces the material cost. Theoretically, a monocrystalline material, the obtained performances be excessively altered compared to those of a polycrystalline material due to the presence of impurities and crystallographic defects such as dislocations and grain boundaries.

Our contribution is to optimize the physical and technological parameters of two cells, the first is based on monocrystalline silicon and the second is based on polysilicon. Thus we must find the best performances Release (I_{sc} , V_{oc} , FF and η) of the two structures and then make a comparative study between these performances.

This work is carried out using numerical simulation software of solar cells in one dimension: PC-1D.

Keywords : Monocrystalline silicon, polycrystalline silicon, solar cell, physical parameters, simulation, PC-1D.