

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN – TIARET

ANNEXE SOUGUEUR



Mémoire de fin d'étude

Pour obtenir le diplôme de :

Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique Energétique & Energies Renouvelables

Effet de la texturisation sur les caractéristiques d'une cellule solaire à base d'un matériau semi-conducteur en couches minces

Présenté par : KEDAIMIA Mohyiddine

Soutenu le : 18/11/2020

Devant le jury :

- | | | |
|---------------------|---------|-----------|
| ▪ Mr BENAÏSSA Trari | M. A. A | Président |
| ▪ Mr MAHI Khaled | M. A. A | Examineur |
| ▪ Mr YESREF Djamel | M. A. A | Encadreur |

Promotion de 2019/2020

Remerciement

J'exprime ma gratitude avant ALLAH DIEU pour m'avoir donné la santé et d'entamer et de terminer mémoire

En preparation pour cette mémoire,

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Mr YESREF
Djamel*

Pour l'aide qu'il m'a apportée pour sa patience et sa disponibilité dont il a fait preuve envers moi et son œil critique qui m'a beaucoup aidé à organiser le travail et à améliorer la qualité des différentes parties de ma mémoire.

J'exprime ma reconnaissance aux membres du jury Mr. BENAÏSSA Trari et Mr MAHI Khaled, Que ont bien voulu accepter de porter leur jugement sur ce modeste travail que je souhaitons à mesure de leur satisfaction.

Qui ont accepté de juger ce travail

Je remercie également tous les professeurs pour leurs conseils et orientations, et pour leur soutien tout au long de ma carrière universitaire

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- ❖ *À ma mère qui m'a donné naissance sans oublier le mérite de ma mère qui m'a élevé et de mon père qui a perdu la lumière de la vie, Que Dieu le récompense dans son paradis.*
 - ❖ *Mon père qui m'a élevé, que Dieu prolonge sa vie*
 - ❖ *Mes frères et mes sœurs*
- À mes meilleurs amis :*

*Mohamed el Amine, Mokhtar, Abd el ghani,
Belkacem*

À chaque membre de ma famille

*À tous ceux que j'ai connus dans ma carrière
universitaire*

Table des Matières

Table des matières

Remercient

Dédicace

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERAL 1

Chapitre I

Généralités sur les cellules photovoltaïques

I.1	Introduction	4
I.2	L'énergie renouvelable	4
	I.2.1 La place des énergies renouvelables	4
	I.2.2 Les forme d'énergies renouvelables	5
I.3	L'énergie solaire	7
	I.3.1 Le spectre solaire	7
I.4	Généralités sur le soleil	8
	I.4.1 Position du soleil	9
	I.4.2 Les coordonnées du soleil	9
	I.4.2.a Coordonnées équatoriales	10
	I.4.2.a.1 Déclinaison solaire δ	10
	I.4.2.a.2 Angle horaire du soleil H	11
	I.4.3 Coordonnées horizontales	12
	I.4.3.a La hauteur du soleil (h)	12
	I.4.3.b Azimut du soleil (a)	13
I.5	Coordonnées terrestres	13
	I.5.1 Longitude	13
	I.5.2 La latitude	14
	I.5.3 L'altitude	14
I.6	Le rayonnement solaire	15

I.6.1 Composantes du rayonnement solaire	16
I.6.1.a Rayonnement direct	16
I.6.1.b Rayonnement diffus	16
I.6.1.c Rayonnement réfléchi	16
I.6.1.d Le rayonnement global	17
I.7 Temps solaire	17
I.7.1 Temps universel TU	17
I.7.2 Temps solaire moyen	18
I.7.3 Temps solaire vrai (TSV)	18
I.7.4 Equation du temps	18
I.7.5 Numéro du jour de l'année	19
I.8 Historique de cellule Photovoltaïque	19
I.9 La cellule photovoltaïque	20
I.10 Les différents structurent des cellules photovoltaïques	21
I.10.1 Les cellule à base de silicium	21
I.10.1.a Les cellule monocristal	21
I.10.1.b Les cellule poly cristallines	22
I.10.1.c Les cellule amorphe	22
I.10.2 La cellule photovoltaïque en couche mince	23
I.11 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	24
I.12 Paramètre de la cellule solaire	25
I .12.1 Courants de court-circuit I_{cc}	26
I .12.2 Tension de circuit ouvert V_{co}	27
I .12.3 Le facteur de forme FF	27
I .12.4 Rendement de conversion η	27
I.13 Association de cellules photovoltaïques	28
I.13.1 Montage série	28
I.13.2 Montage parallèle	29
I.13.3 Montage mixte série-parallèle	30
I.14 Les inconvénients et les avantages de l'énergie photovoltaïque	30
I.14.1 Inconvénients	30
1.14.2 Avantages	31
I.15 Conclusion	31

Chapitre II

Technologie d'une cellule photovoltaïque

II.1	Introduction	33
II.2	Le silicium comme matière de base d'une cellule photovoltaïque	33
	II.2.1. Le silicium	33
	II.2.1.a Réduction de la silice	34
	II.2.2.b Purification du silicium	35
	II.2.3 Le silicium dans la nature	35
II.3	Différents types du silicium	37
	II.3.1. Le Silicium monocristallin	37
	II.3.1.a Elaboration du silicium monocristallin par la méthode de Czochralski « CZ »	38
	II.3.2 Le silicium multi cristallin	39
	II.3.2.a Elaboration du silicium multi cristallin par la méthode de solidification directionnelle	39
	II.3.3 Le silicium poly cristallin	39
	II.3.4 Le silicium amorphe	39
II.4	La fabrication des cellules photovoltaïques	40
	II.4.1. Cellule, module et système	40
	II.4.2. Production des plaquettes (wafers)	42
	II.4.3 Nettoyage	43
	II.4.4 Attaque chimique des plaquettes	43
	II.4.5 Nettoyage des substrats et plaquettes	44
II.5	Elaboration de la cellule solaire en silicium monocristallin de type n	45
	II.5.1 Procédé standard de réalisation d'une cellule solaire en silicium monocristallin de type p	45
II.6	Structure des cellules solaires	46
	II.6.1 Eléments de base	46
II.7	Les Techniques pour diminuer des pertes de rayonnements	47
	II.7.1 Texturation (ou texturisation)	47
	II.7.1.a Les types des texturisations	51
	II.7.1.b Les méthodes expérimentales de la texturisation	52
	II.7.2 Les contacts face avant et face arrière	53

II.7.3	La couche antireflet	53
II.7.4	La couche active	53
II.8	Les couches minces	53
II.8.1	Le retour des couches minces sur la scène internationale	53
II.8.2	Notions sur les couches minces	54
II.8.3	Techniques de dépôts de couches minces	54
II.8.4.a	Méthodes physiques	55
II.8.4.b	Méthodes chimiques	55
II.9	Différentes générations du photovoltaïque	56
II.9.1	Première génération	56
II.9.2	Deuxième génération	58
II.9.3	Troisième génération	60
II.10	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	62
II.10.1	L'interaction photon/semi-conducteurs	63
II.10.2	Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	65
II.11	Conclusion	67

Chapitre III

Présentation du logiciel PC1D et Résultats des simulations

III.1	Introduction	69
III.2	Le PC1D	69
III.2.1	Aperçu du logiciel	69
III.3	Les paramètres du dispositif (Device)	70
III.4	Les paramètres des régions	71
III.5	Les Paramètres d'excitation	71
III.6	Visualisation des résultats	72
III.7	Le fonctionnement du PC1D	72
III.8	Simulation d'une cellule solaire à base de Silicium	73
III.8.1	Présentation de la cellule étudiée	75
III.8.2	Paramètres de la cellule à étudier	75
III.9	Résultat de simulation	76
III.10	Conclusion	80

Conclusion générale	82
Bibliographie	83

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	Analyse spectrale du rayonnement solaire	8
Figure I.2	Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal	9
Figure I.3	Variation annuelle de la déclinaison du soleil	10
Figure I.4	Variation de l'angle horaire en fonction de temps solaire vrai	12
Figure I.5	Repère horizontal	12
Figure I.6	Coordonnées terrestre	13
Figure I.7	Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes	14
Figure I.8	Rayonnement solaire transmis à la terre	15
Figure I.9	Composante du rayonnement global sur un plan horizontal	17
Figure I.10	Schéma d'une cellule solaire élémentaire	20
Figure I.11	schéma de la méthode CZ	22
Figure I.12	Des cellules solaires	23
Figure I.13	Structure schématique d'une cellule solaire	24
Figure I.14	Schéma équivalent électrique de la cellule PV	24
Figure I.15	Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque	26
Figure I.16	association série de cellules photovoltaïques	29
Figure I.17	association parallèle de cellules photovoltaïques	29
Figure I.18	association mixte de cellules photovoltaïques	30

Chapitre II

Figure II.1	Table périodique des éléments chimiques	34
Figure II.2	Sable hollandais (grains 0,2 à 0,6 mm).	36
Figure II.3	Quartz de la mine de La Gardette, Bourg d'Oisans, Isère, France.	36
Figure II.4	Technique de Czochralski pour la fabrication de Si monocristallin	38
Figure II.5	Différentes étapes d'élaboration de la cellule, du silicium brut au système solaire photovoltaïque	41
Figure II.6	Découpage du lingot.	43
Figure II.7	Nettoyage chimique des plaques	44

Figure II.8	Structure générale d'une cellule solaire de type p.	46
Figure II.9	Schéma de principe d'une cellule solaire.	47
Figure II.10	Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée.	48
Figure II.11	Texturisation alcaline	49
Figure II.12	Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant surface texturée	49
Figure II.13	Texturation de la surface d'un substrat de silicium, observée au MEB Zeiss Ultra+ du CIME Nanotech.	50
Figure II.14	Prototype de formation de cellules au silicium à partir de nanocolonnes. Dans ce cas, les nanocolonnes sont faites par attaque chimique en milieu liquide sur des billes de catalyseurs.	50
Figure II.15	Images MEB de substrats de silicium monocristallin (100) texturisés (a) au TMAHet (b) à la soude.	53
Figure II.16	Différentes techniques de dépôt des couches minces.	56
Figure II.17	Cellule Si monocristallin (sc. Si)	57
Figure II.18	Cellule Si polycristallin (Mc-Si)	57
Figure II.19	Cellule Si ruban (c-Si) tiré de la technologie RST	57
Figure II.20	Modules verre en CdTe efficacité de 18,7%	59
Figure II.21	Cellule CIS d'efficacité de 20%	59
Figure II.22	Cellule en CIGS, efficacité de 8,5%	59
Figure II.23	Film PV transparent avec un rendement de 10 %	60
Figure II.24	Centrale solaire à Concentration (CPV), puissance 19,9 GW, Seville	61
Figure II.25	Cellule dye sensitized solar celle panel.	61
Figure II.26	Cellule photovoltaïque organique	62
Figure II.27	Cellule solaire à base de nanoparticule.	62
Figure II.28	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	63
Figure II.29	Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect.	64
Figure II.30	Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde.	65

Figure II.31	Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.	66
---------------------	--	-----------

Chapitre III

Figure III.1	Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique	70
Figure III.2	Cellule solaire de type n/p avec texturation	73
Figure III.3	Structure de la cellule de référence simulée	75
Figure III.4	Caractéristique courant-tension et le rendement de la cellule solaire (avec texturation)	77
Figure III.5	Caractéristique courant-tension et le rendement de la cellule solaire (sans texturation)	77
Figure III.6	Variation de Tension V_{co} en fonction d'angle de la texturation	79
Figure III.7	Variation de courant I_{cc} en fonction d'angle de la texturation	79
Figure III.8	Effet de l'angle de la texturation sur le rendement.	80

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1	Caractéristiques principales de la sole	9
Tableau II.1	Propriétés physiques et thermiques du silicium	36
Tableau II.2	Différents milieux de dépôt de couches minces	53
Tableau III.1	Paramètre de la cellule de référence.	76
Tableau III.2	Résultat de la cellule étudiée avec et sans texturation	78

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Face à l'augmentation des besoins énergétiques mondiaux, à l'épuisement prévisible des ressources d'énergies fossiles et à la dégradation globale de l'environnement, le développement de sources d'énergie respectueuses de l'environnement est nécessaire.

Une des solutions consiste à développer des sources d'énergies renouvelables bon marché. Parmi lesquelles, l'énergie photovoltaïque qui consiste en la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est une des plus prometteuses et fait l'objet d'intenses recherches. Contrairement à d'autres énergies renouvelables (issues du vent, de la biomasse, de l'eau...), l'énergie solaire est disponible partout sur le globe avec plus ou moins d'intensité.

La production d'électricité photovoltaïque a connu ces dernières années un accroissement très rapide, surtout le silicium poly-cristallin qui constitue la quasi-totalité des cellules photovoltaïques commerciales. Cet accroissement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaires. [1]

L'industrie photovoltaïque repose essentiellement sur l'utilisation du silicium comme matériau de base (~98%). Ce semi-conducteur présente en effet différents avantages : il est abondant à la surface du globe, il n'est pas toxique et sa technologie est bien maîtrisée grâce au développement de la microélectronique. Ce matériau est utilisé sous différentes formes : monocristallin, polycristallin, amorphe ou sous forme de rubans. [2]

Le rendement d'une cellule solaire est affecté par différents types de pertes. Pour le silicium dont l'indice de réfraction est élevé ($n=3,5$), environ 30 % de la lumière est réfléchi. La réduction des pertes par réflexion doit impérativement être prise en compte. Ces pertes s'évaluent à 35% sur la surface du silicium. Le dépôt d'une couche anti réfléchissante à la surface et une texturisation de la face avant de la cellule permet de diminuer ces pertes. [2] p2

L'objectif principal de notre étude est de voir l'intérêt de la texturisation sur les performances d'une cellule solaire à base du silicium cristallin.

Le travail présenté dans ce mémoire est présenté de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, va présenter des généralités sur les cellules photovoltaïques, quelques définitions sur l'énergie renouvelable. Les différences structurent des cellules photovoltaïques et finalement les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Dans le second chapitre, va défini le silicium comme matière de base, les techniques de fabrication des cellules solaires à base de Silicium ainsi que les propriétés physico-chimiques de couches minces, Finalement nous avons expliqué de façon globale de fonctionnement des cellules photovoltaïques.

Le troisième chapitre nous exposerons les résultats de la simulation des paramètres de la cellule solaire en fonction de son rendement et les valeurs optimisées

Chapitre I :

Généralités sur les cellules
photovoltaïques

I.1 Introduction :

Ce chapitre introduit le cadre dans lequel s'inscrit ce travail : le domaine photovoltaïque. Après une brève présentation de l'élément énergétique essentiel que constitue le rayonnement solaire, nous aborderons le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, ses caractéristiques, son architecture et ses limitations. Puis nous nous intéresserons à l'utilisation du matériau silicium dans le domaine photovoltaïque.

I.2 L'énergie renouvelable :

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. 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. [3]

I.2.1 La place des énergies renouvelables :

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 %. [3]

I.2.2 Les forme énergies renouvelables :

➤ **L'énergie éolienne :**

C'est un principe vieux comme les moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort (15 km/h minimum), les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité. C'est le même principe que celui de notre bonne dynamo de vélo. Il existe deux grandes catégories d'éoliennes : les aérogénérateurs domestiques de faible puissance qui fournissent en électricité des sites isolés, pour des besoins individuels ou de petits réseaux collectifs ; et les éoliennes de grandes puissances raccordées aux réseaux nationaux, dont les plus grandes ont une puissance aujourd'hui de 2500 kW.

➤ **L'énergie hydraulique :**

Son principe ressemble à celui de l'éolienne. Simplement, ce n'est plus le vent mais l'énergie mécanique de l'eau qui entraîne la roue d'une turbine qui à son tour entraîne un alternateur. Ce dernier transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La puissance disponible dépend de deux facteurs : la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau. Deux types de solutions sont possibles, selon la configuration du site, Sur les grands fleuves ou au bas des montagnes, on construit un barrage. Il retient l'eau (c'est le fameux lac de barrage). L'eau s'engouffre au bas du barrage, passe dans une sorte de galerie au bout de laquelle se situent les turbines. Le passage de l'eau fait tourner les hélices qui entraînent un alternateur. C'est ce dernier qui produit le courant. Sur les petites rivières, on met en place des microcentrales qui ne barrent pas le cours d'eau : un petit canal est construit, où une partie de l'eau s'engouffre et va faire tourner les turbines de la centrale au fil de l'eau.

➤ **L'énergie solaire :**

Il existe deux types d'énergie solaire : le photovoltaïque et le solaire thermique. Décrit par le physicien français Antoine Becquerel (le grand-père du découvreur de la radioactivité), l'effet photovoltaïque est simple dans son principe. Les panneaux solaires se composent de photopiles constituées de silicium, un matériau semi-conducteur qui abrite donc des électrons. Excités par les rayons du soleil, les électrons entrent en mouvement et produisent de l'électricité. L'énergie solaire photovoltaïque est surtout utilisée pour la fourniture d'électricité dans les sites isolés :

électrification rurale et pompage de l'eau (50%), télécommunications et signalisation (40%), applications domestiques (10%). À la différence du solaire photovoltaïque, le solaire thermique ne produit pas d'électricité mais de la chaleur. Grâce à de grands panneaux sombres dans lesquels circulent de l'eau, on récupère la chaleur du soleil pour chauffer l'eau. Cela permet notamment d'alimenter des chauffe-eau solaires.

➤ **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 épiluchures 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.

➤ **La géothermie :**

Dans certaines roches et à certaines profondeurs circule de l'énergie, sous forme de vapeur et d'eaux chaudes. Ces eaux puisées à leur source ou récupérées lorsqu'elles surgissent des geysers, sont collectées puis distribuées pour alimenter des réseaux de chauffage urbains. La Maison de la Radio, à Paris, est ainsi chauffée. Mais dans certaines conditions, d'autres utilisations sont également possibles. Sur le bien nommé site de Bouillante, en Guadeloupe, une centrale de production d'électricité géothermique a été construite. Un forage permet de

recupérer l'eau chaude (à 160°C) ainsi que de la vapeur. Grâce à ces grandes quantités de vapeur, l'on fait tourner des générateurs qui alimentent le réseau électrique guadeloupéen. [3]

I.3 L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KW/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

✓ L'énergie solaire thermique :

Qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

✓ L'énergie solaire photovoltaïque :

Qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon. [4]

I.3.1 Le spectre solaire :

La répartition spectrale du rayonnement solaire est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K. La figure (I.1) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est définie comme une puissance reçue par unité de surface pour une longueur d'onde donnée et s'exprimée en (W/m².nm). Le soleil se comporte approximativement comme un corps noir de 5900 K. Ces Spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de 200 nm à 1000nm comme suite :

Ultraviolet UV : $200 < \lambda < 380 \text{ nm}$; 6.4%.

Visible : $380 < \lambda < 780 \text{ nm}$; 48.0%.

Infrarouge IR : $780 < \lambda < 1000 \text{ nm}$; 45.6%

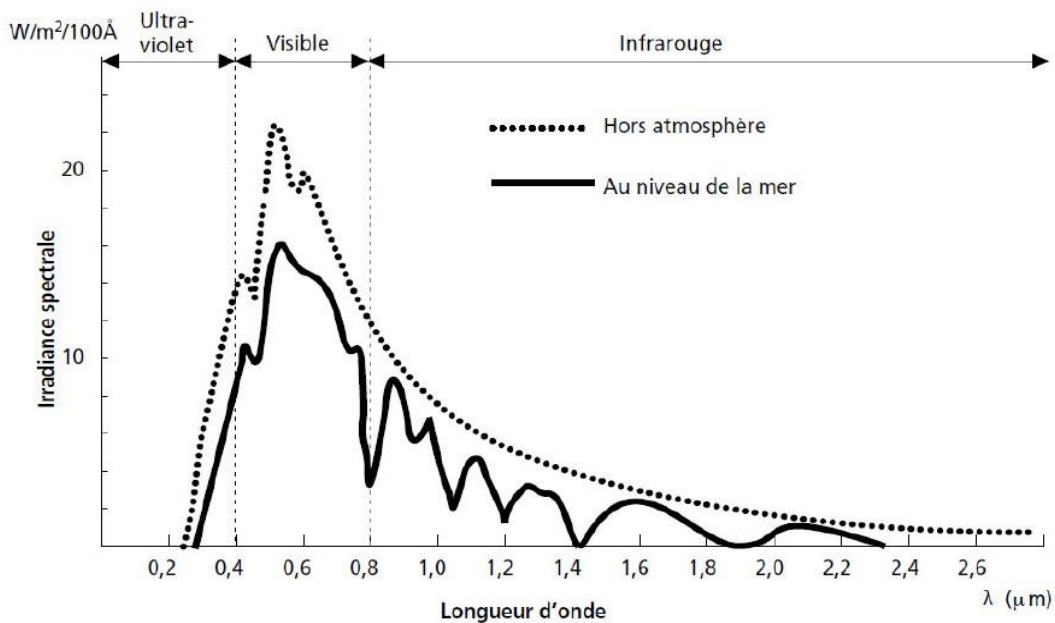


Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire. [4]

I.4 Généralités sur le soleil :

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de $1,39 \cdot 10^9$ m, à distance moyenne de $1,49 \cdot 10^{11}$ m de la terre. Comme vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide ; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 jours aux régions polaires.

Il est considéré comme un corps noir avec une température effective de 5777 K, et rayonne. Principalement dans le visible et le proche infrarouge (de 300nm à 1200nm) avec un maximum aux environs de 500nm.

Cette énergie est produite par les réactions de fusion dans le soleil et est filtrée par l'atmosphère. Le rayonnement solaire apporte sur terre une énergie de 2000 à 2500 KWh/m² Par an, ce qui est supérieur à la totalité des ressources fossiles jamais découvertes.

La quantité d'énergie exploitable de ces ressources malheureusement "non renouvelables" ne représente que 0,5 % de ce que nous recevons chaque année par rayonnement solaire. [5]

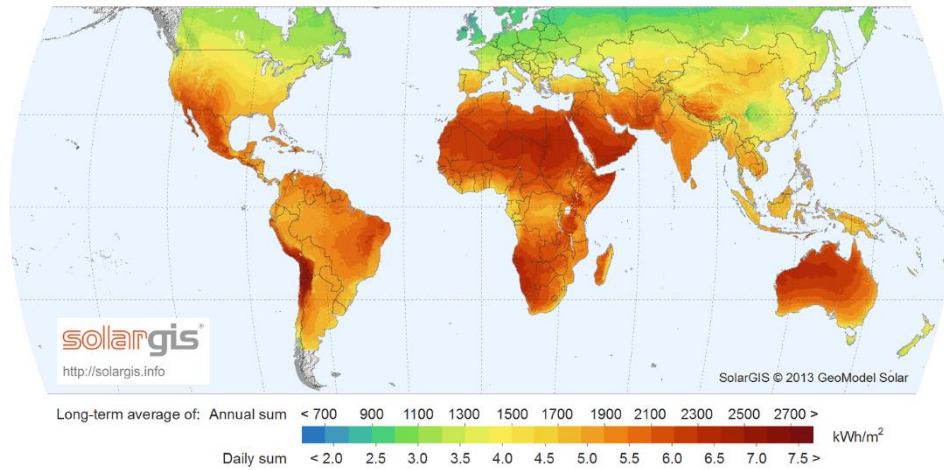


Figure I.2 : Carte du monde de l’irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal. [6]

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci-dessous ;

Diamètre (km)	1,39. 10⁵
Mass (kg)	2. 10 ³⁰
Surface (km ²)	6,09. 10 ¹²
Volume (km ³)	1,41. 10 ¹⁸
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2,5. 10 ¹⁷

Tableau I.1 : Caractéristiques principales de la sole [5].

I.4.1 Position du soleil :

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l’énergie, la projection de cette énergie dépend de l’orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d’énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d’orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale. [5]

I.4.2 Les coordonnées du soleil :

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l’année par deux systèmes de coordonnées différents :

- ✓ Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial)
- ✓ Par rapport au plan horizontal de la terre (repère horizontale). [7]

I.4.2.a. Coordonnées équatoriales :

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ , H). [5]

I.4.2.a.1. Déclinaison solaire δ :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, on adopte la convention de compter positivement les latitudes de l'hémisphère Nord (compris entre 0° à l'équateur et $+90^\circ$ au pôle Nord), et négativement celle de l'hémisphère Sud (compris entre 0° à l'équateur et -90° au pôle Sud), et variée tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes $\pm 23.45^\circ$. Les lois du mouvement relatif terre-soleil permettent de calculer les variations de la déclinaison au long de l'année. Pour la pratique, une formule d'approximation est suffisante, elle est donnée par l'équation (I-1). [7]

$$\delta = 23.45 \sin \theta \left(\frac{360}{365} (J - 80) \right) \quad (\text{I-1})$$

Ou avec plus de précision :

$$\delta = \arcsin \left(0.389 \sin \left(\frac{360}{365} (J - 80) \right) + 2 \sin \left(\frac{360}{365} (J - 2) \right) \right) \quad (\text{I-2})$$

J : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c'est à dire il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

δ : varie entre deux valeurs extrêmes : $-\delta_0 \leq \delta \leq +\delta_0$ avec $\delta_0 = 23,45^\circ$. La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure (I.3).

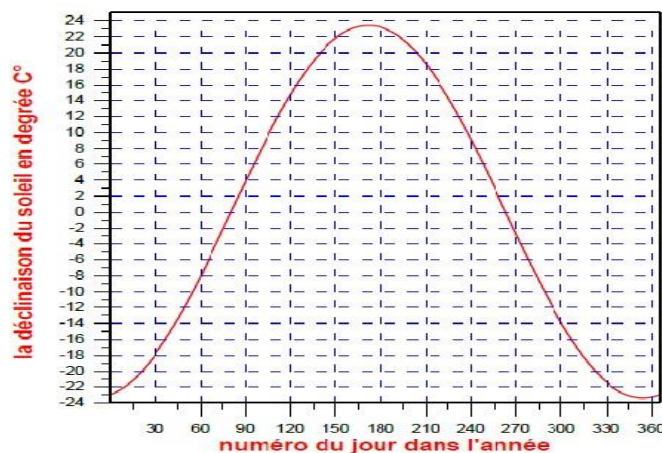


Figure I.3 : Variation annuelle de la déclinaison du soleil. [7]

➤ $\delta = 0$ (Equinoxes) : Les équinoxes représentent les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial, l'équinoxe automnal, le 23 septembre, marquant le début de la chute de la durée de la journée, et l'équinoxe vernal le 21 mars, marquant le début de l'accroissement de la durée du jour

➤ $\delta = 23,45^\circ$ (au Solstice été) : Le solstice d'été (au 21 juin), nous observons que le soleil est à son point le plus élevé dans le ciel. Elle marque le début de l'été dans l'hémisphère nordique

➤ $\delta = -23,45^\circ$ (au Solstice hiver) : Il coïncide avec le 21 décembre.

I-4-2-a-2 Angle horaire du soleil H :

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$H = 15(TSV - 12) \quad (\text{I-3})$$

Avec :

$$TSV = TI - TU + \left(\frac{\Delta t + 47}{60}\right) = TL - \left(TU - \frac{\lambda}{15}\right) + \frac{\Delta t}{60} \quad (\text{I-4})$$

$$\Delta t = 9.87 \sin\left(\frac{360}{365}(J - 81)\right) - 7.35 \cos\left(\frac{360}{365}(J - 81)\right) - 1.5 \sin\left(\frac{360}{365}(J - 81)\right) \quad (\text{I-5})$$

- TSV (Temps Solaire Vrai) : Temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi
- TU (Temps Universel) : Le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich
- TL (Temps Légal) : Temps donné par une montre.
- Δt : Correction de l'équation du temps
- λ : longitude du lieu.
- L'angle horaire H varie de -180° à $+180^\circ$. On prend :
 - $H > 0$ après midi.
 - $H < 0$ le matin
 - $H = 0$ midi TSV. [7]

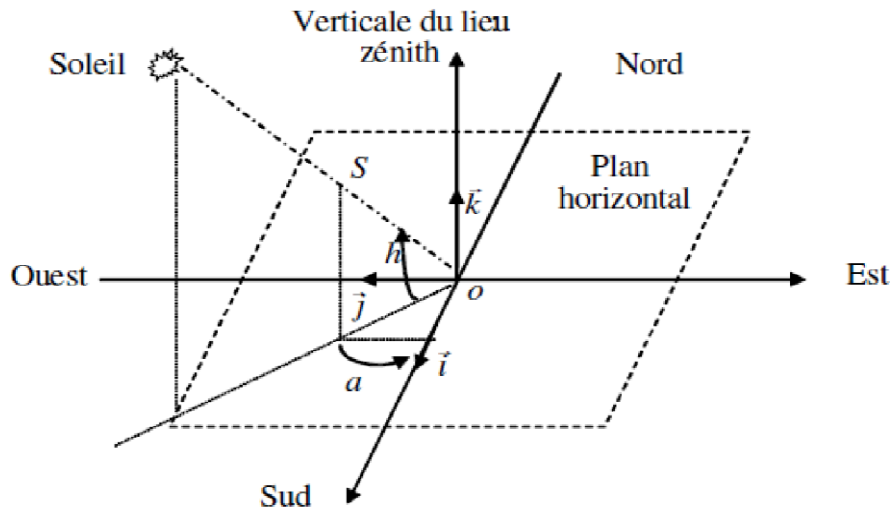


Figure I.4 : Variation de l’angle horaire en fonction de temps solaire vrai. [7]

I.4.3. Coordonnées horizontales :

Le repère horizontal est formé par le plan de l’horizon astronomique et vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l’azimut a . Figure (I.5). [8]

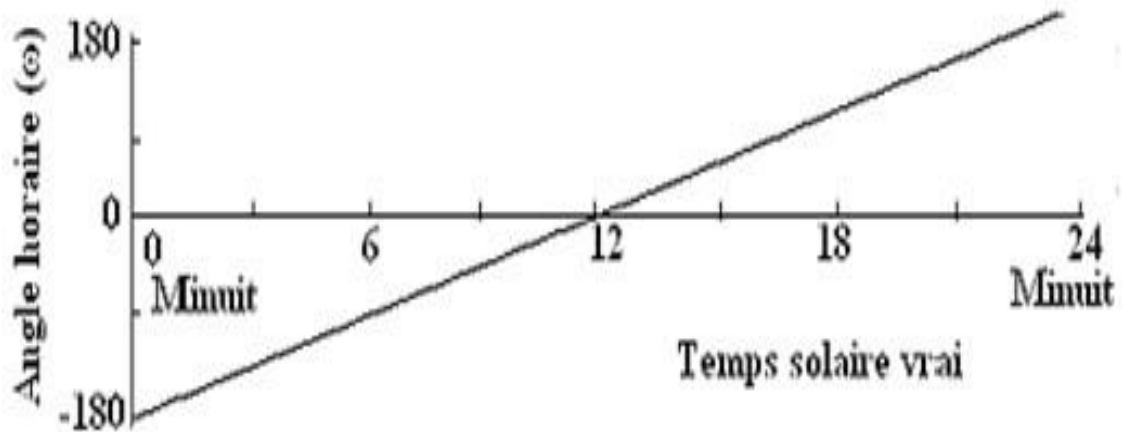


Figure I.5 : Repère horizontal

I.4.3.a La hauteur du soleil h :

C’est l’angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l’année selon la relation suivante :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(H) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) \tag{I-6}$$

Avec :

H : varie entre -90° à $+90^\circ$.

On prend : $h > 0$ le jour, $h < 0$ la nuit et $h = 0$ aux lever et coucher. [8]

I.4.3.b Azimut du soleil a :

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(H)}{\cos(h)} \quad (\text{I-7})$$

Avec :

a : varié entre -180° à $+180^\circ$

On prend : $a > 0 \Rightarrow$ vers l'ouest, $a < 0 \Rightarrow$ vers l'est et $a = 0 \Rightarrow$ direction du sud.

I.5 Coordonnées terrestres :

La Terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord et le pôle Sud. Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point ainsi que par son altitude, figure (1.6).

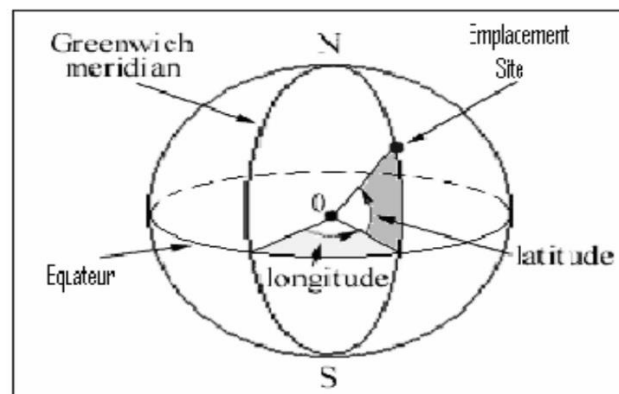


Figure I.6 : Coordonnés terrestre.

I.5.1 Longitude :

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé.

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest

La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre -180° et $+180^\circ$, à tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. La longitude sera désignée ici par la lettre λ_0

- Longitude OUEST $\lambda_0 < 0^\circ$
- Longitude EST $\lambda_0 > 0^\circ$

I.5.2 La latitude :

La latitude d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. La latitude est comptée de 0° à $+90^\circ$ dans l'hémisphère nord

La latitude a aussi un effet important : les journées estivales s'allongent à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, et le soleil est plus bas au midi solaire. [8]

Les journées d'hiver sont plus courtes, et le soleil encore plus bas qu'à l'équateur. Autrement dit, l'intensité maximale (à midi) et la quantité totale de rayonnement solaire (G) sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'augmente la latitude, figure (I.7).

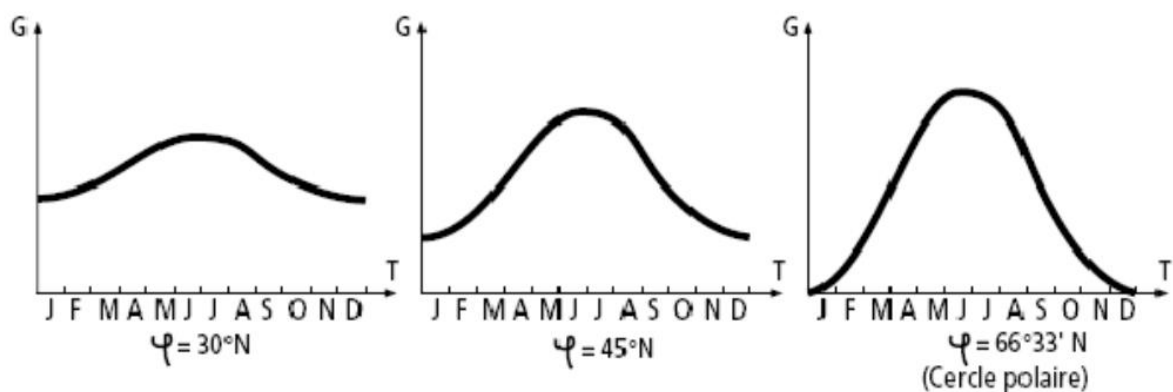


Figure I.7 : Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes.

I.5.3 L'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre.

I.6 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 μm environ).

L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de $340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ Figure (I.8). Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre et atmosphère, environ $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre. [8]

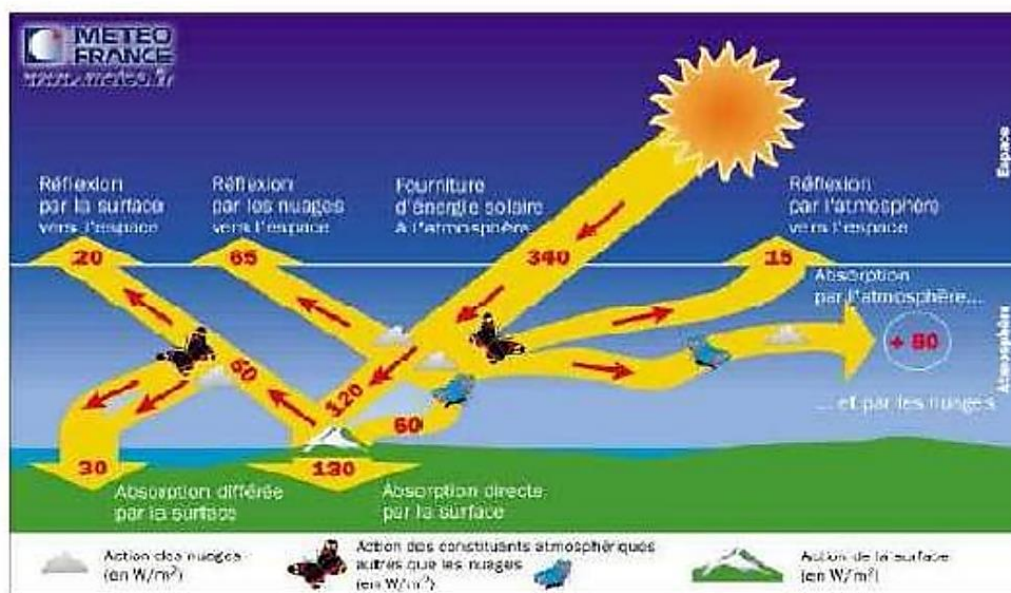


Figure I.8 : Rayonnement solaire transmis à la terre.

La figure (I.8), publiée par Météo France, montre que près du quart de cet éclairement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages ($65 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), le reste ($15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc ($180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers ($120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) se font directement, le reste ($60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) s'effectuant par diffusion vers le bas. [8]

Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et la réflexion. Sur les (180 W. m^{-2}) incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ (50 W. m^{-2}). En fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard et s'ajoute partiellement aux ($180-50 = 130 \text{ W. m}^{-2}$) de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Bien que l'absorption du rayonnement solaire soit un phénomène continu, on peut simplifier la compréhension du processus précédent en supposant que les (50 W. m^{-2}) réfléchis par la surface du globe se répartissent entre (20 W. m^{-2}) définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire et (30 W. m^{-2}) qui reviennent à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Cette énergie s'ajoute aux (130 W. m^{-2}) initialement non réfléchis pour constituer approximativement les (160 W. m^{-2}) qu'absorbe la surface terrestre.

I.6.1 composantes du rayonnement solaire :

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses déperditions du fait de son absorption par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Donc, on distingue trois composantes :

I.6.1.a Rayonnement direct :

Le rayonnement direct c'est le rayonnement reçu directement de soleil sans diffusion par l'atmosphère.

I.6.1.b Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus c'est le rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, le rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (les molécules d'air, les gouttelettes d'eau, les poussières, ...) et à sa réflexion par les nuages. [8]

I.6.1.c Rayonnement réfléchi :

Le rayonnement réfléchi c'est le rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant sur sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol (environnement du site), et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neiges, eau, etc.). Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur des plans inclinés. Donc, le rayonnement global est la contribution de diverses composantes du rayonnement solaire. [8]

I.6.1.d Le rayonnement global :

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un Solari mètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis.

Rayonnement global = rayonnement direct + rayonnement diffus + rayonnement réfléchi. [8]

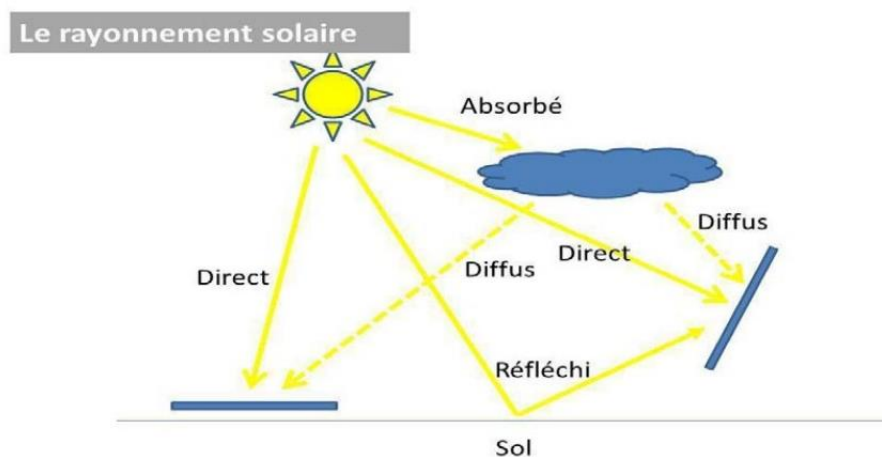


Figure I.9 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal. [8]

I.7 Temps solaire :

I.7.1 Temps universel TU :

Il correspond au temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore GMT (Greenwich Mean Time) :

$$\mathbf{TU} = \mathbf{TSM} - \left(\frac{\lambda}{15} \right) \quad \mathbf{(I-8)}$$

Où : λ : est la longitude.

$\lambda > 0$; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$\lambda < 0$; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

TU = TSM ; pour le méridien de Greenwich. [5]

I.7.2 Temps solaire moyen :

Puisque la vitesse de la terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année, on définit donc un temps solaire moyen pour avoir un temps qui " s'écoule " à vitesse constante (celui mesuré par les horloges) :

$$\mathbf{TSM = TSV - \left(\frac{Et}{60}\right)} \quad \mathbf{(I-9)}$$

I.7.3 Temps solaire vrai (TSV) :

Le temps mis par le soleil entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu (direction Nord-Sud) a été nommé temps solaire vrai, on note TSV. Le temps solaire vrai est donc un temps local puisqu'il est lié directement à la rotation de la terre sur elle-même.

$$\mathbf{TSV = 12 + \left(\frac{\omega}{15}\right)} \quad \mathbf{(I-10)}$$

I.7.4 Equation du temps :

On appelle équation du temps (Et), la différence entre l'heure vraie, telle qu'elle résulte du temps solaire, et l'heure moyenne, telle est déterminée par le temps moyen.

Équation du temps = Temps solaire moyen - Temps solaire vrai

$$\mathbf{Et = TSM - TSV} \quad \mathbf{(I-11)}$$

L'équation du temps est la résultante de deux effets :

- a. l'équation du centre due à l'excentricité de l'orbite terrestre (la trajectoire de la terre est une ellipse que l'on veut ramener à un cercle sur la sphère céleste
- b. la réduction à l'équateur due à l'obliquité de l'écliptique (la terre ne tourne pas dans son plan équatorial autour du soleil) puisque l'on mesure le passage du soleil au méridien du lieu par rapport au plan équatorial terrestre dans lequel il faut donc le ramener. Ainsi, l'équation du temps donne le nombre de minutes après le midi moyen pour que l'on soit au midi vrai, par exemple : si l'équation du temps est égale à +8 minutes, alors il sera midi vrai à 12h 8mn du temps moyen.

Ainsi la variation de ET durant l'année est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{Et = 0.258 \cos x - 7.416 \sin x - 3.648 \cos 2x - 9.228 \sin 2x} \quad \mathbf{(I-12)}$$

Avec

$$x = \frac{360(N-1)}{365.25} \quad (\text{I-13})$$

Où l'angle x est défini en fonction du numéro du jour n . Le décompte commence à partir du 1^{er} janvier où $N=1$.

I.7.5 Numéro du jour de l'année :

Le calcul de numéro du jour dans l'année à ajouter le numéro du jour dans le mois (quantième) au numéro caractéristique de chaque mois (j) varie de 1(1 janvier) à 365 (31 décembre) ou 366 pour une année bissextile. Le tableau ci-dessous donne les numéros caractéristiques de chaque mois. [5]

I.8 Historique de cellule Photovoltaïque :

Le mot photovoltaïque vient de mot grec "photos" qui signifie la lumière et voltaïque du physicien italien "Alessandro volta". 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 des laboratoires Bell aux USA. Cette première cellule photovoltaïque était en silicium [9].

Quelques dates :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre. Mondiale, le phénomène reste encore une découverte anecdotique

1954 : Trois chercheurs américains, "Chapin", "Pearson" et "Prince", mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001. [9]

I.9 La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs, son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque.

En effet, une cellule solaire est constituée essentiellement d'une jonction N/P Figure (I.10) de deux couches minces et dopées différemment :

- Pour la couche N, apport d'électrons périphériques
- Pour la couche P, déficit d'électrons. [10]

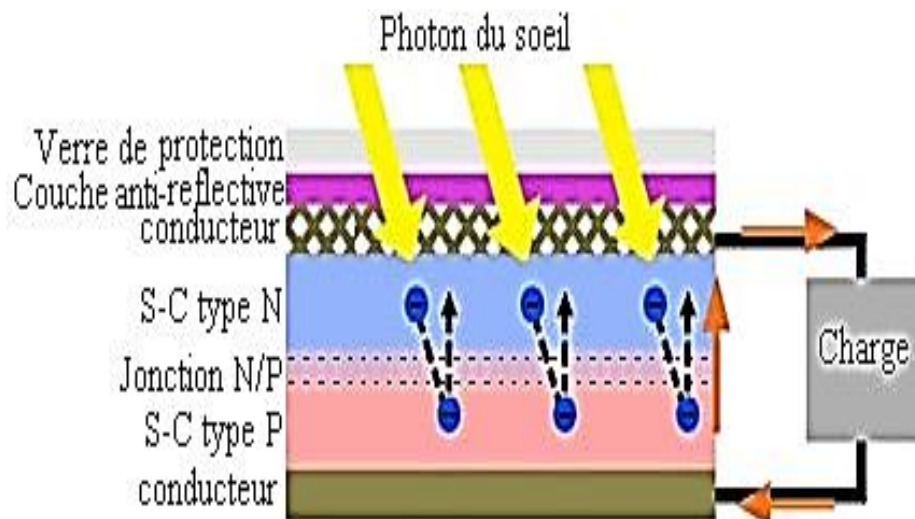


Figure I.10 : Schéma d'une cellule solaire élémentaire

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche n) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur.

L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée et un verre de protection (totalement transparent). [10]

I.10 Les différents structurent des cellules photovoltaïques :

On a utilisé différents matériaux et structures pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques et augmenter le rendement. On distingue plusieurs types de cellules solaires selon leurs structures.

I.10.1 Les cellule à base de silicium :

Les premiers panneaux photovoltaïques ont été fabriqués avec du silicium cristallin. La production photovoltaïque mondiale actuelle est à base de silicium cristallin (mono-Si 36,3% et mc-Si : 44%). En effet, cette filière reste la plus avancée sur le plan technologique et industriel, car la technologie du silicium est arrivée presque à sa maturité et le silicium est un matériau abondant sur terre, parfaitement stable et non toxique. Les programmes actuels de recherche et de développement de l'industrie photovoltaïque revêtent une extrême importance aux nouveaux procédés de croissance du silicium cristallin, à la réduction de l'épaisseur des cellules qui représente 60% du coût final du module photovoltaïque. [11]

I.10.1.a Les cellule monocristal :

Ce sont les photopiles de la première génération, le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles.

Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes. Les techniques principales pour produire le silicium cristallin sont la méthode de Czochralsky (CZ) et la technique de la zone flottante (ZF). Figure (I.11) [12]

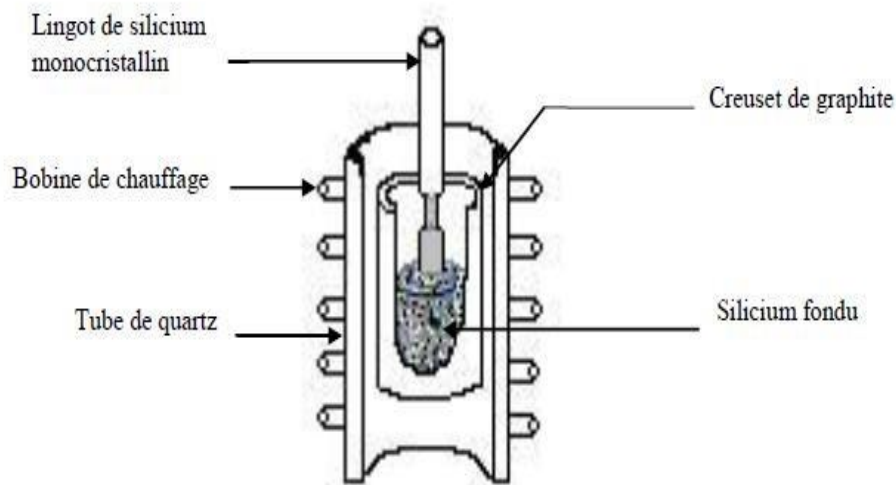


Figure I.11 : schéma de la méthode CZ. [12]

I.10.1.b Les cellule poly cristallines :

Sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Les cellules à base de silicium poly-cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly-cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly-cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.

I.10.1.c Les cellules amorphes :

Le silicium amorphe a été le premier matériau utilisé pour réaliser une cellule solaire en couche mince grâce à sa forte absorption. Cependant, le rendement de conversion reste médiocre à cause du taux de recombinaison élevé qui caractérise la structure amorphe, il est situé entre 8% et 10%. Le silicium amorphe a été d'abord utilisé pour des applications «portables » de faible puissance pour des produits électroniques comme les calculettes ou les montres à quartz.

L'amélioration des performances joint au cout inférieur au silicium cristallin lui ont permis de pénétrer le marché des panneaux salaires dans certaines applications où le cout importe plus que le rendement. Les recherches actuelles se concentrent sur l'amélioration des performances

des cellules et la mise au point de techniques de dépôt plus rapides pour développer des cellules multi-jonctions. [12]



Figure I.12 : Des cellules solaires. [13]

I.10.2 Les cellule photovoltaïque en couche mince :

On distingue plusieurs technologies parmi lesquelles

- Cuivre-indium-di sélénium (CIS) ou cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS) : leur rendement est égal à 11 % (17.1 % au laboratoire). 99 % d'absorption, dégradation minime, mais fabrication très délicate.
- Cadmium-tellure (CdTe) : rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire). Haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique.
- Gallium Arsenic (GaAs) : leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire. Ces cellules, dont le prix est très élevé, sont très appréciées dans l'aérospatiale. Leurs principaux avantages sont :
 - ✓ Une absorption très élevée. Ces cellules ne pas épaisses, ce qui traduit un gain en volume et en masse pour les sondes sur lesquelles le moindre gramme superflu est traqué.
 - ✓ Leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par les augmentations de température que les sondes peuvent rencontrer. [14]

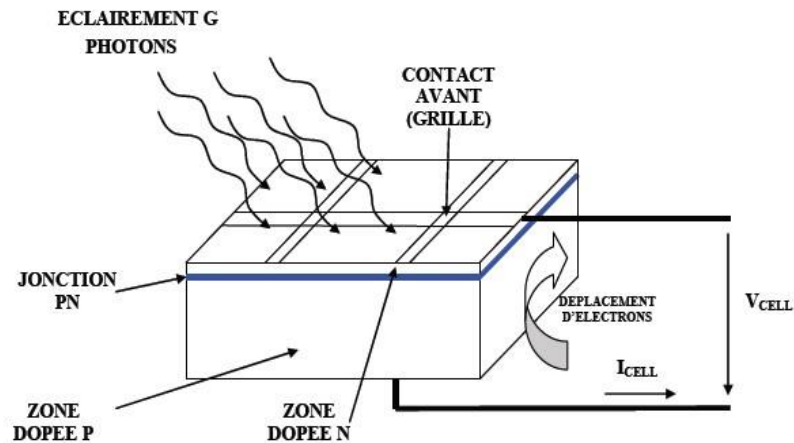


Figure I.13 : Structure schématique d'une cellule solaire. [15]

I.11 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Figure I.14 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule :

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_p) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [15]

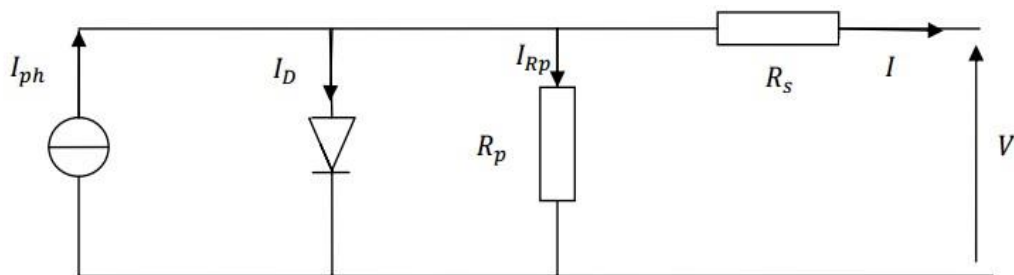


Figure I.14 : Schéma équivalent électrique de la cellule PV

A partir du circuit équivalent de la figure I.14, on peut écrire :

$$I_{ph} = I_D + I + I R_p \tag{I-8}$$

Le courant qui passe dans la résistance R_p est donné par :

$$I_{Rp} = \frac{V + I \times R_s}{R_p} \quad (\text{I-9})$$

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_{\text{sat}} \left[e^{\frac{V + I \times R_s}{nV_t}} - 1 \right] \quad (\text{I-10})$$

Avec I_{sat} : courant de saturation de la diode

$\frac{kT}{e}$: Tension thermique à la température T

Donc l'expression de la caractéristique I(V) est :

$$I_{pv} = I_{\text{ph}} - I_{\text{sat}} \left[e^{\frac{e(V + I \times R_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V + I \times R_s}{R_p} \quad (\text{I-11})$$

Où :

- e : charge de l'électron ($1.609 \times 10^{-19} \text{C}$)
- K : constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
- n : facteur de non idéalité de la jonction
- T : température effective de la cellule en degré Kelvin
- I_{ph} : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur
- V_{ph} : est la tension aux bornes de cette même cellule
- I_{ph} : est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température

ou bien courant de (court-circuit)

- R_p : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction
- R_p : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions. [15]

I.12 paramètre de la cellule solaire :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres, extraits de la caractéristique courant-tension. Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- Courants de court-circuit I_{cc}
- Tension de circuit ouvert V_{co}

- Le facteur de forme **FF**
- Rendement de conversion **η** . [16]

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension I(V) Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe I-V vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie. [17]

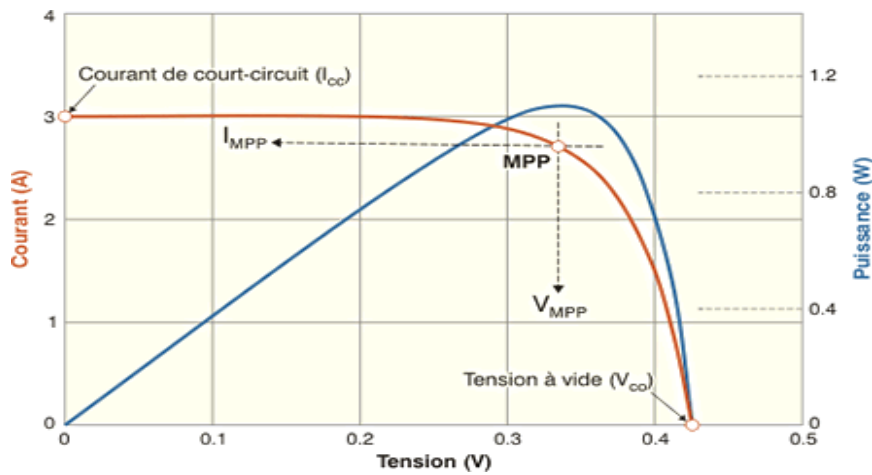


Figure I.15 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque

I.12.1 courants de court-circuit I_{cc} :

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle. [16]

$$I_{cc} = I_{ph} / \left[1 + \left(\frac{R_s}{R_{sh}} \right) \right] \tag{I-11}$$

Où :

I_{ph} : Photo-courant [A], proportionnel à l'irradiance F, avec correction selon T.

R_s : Résistance série [W].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [W]

I.12.2 Tension de circuit ouvert V_{co} :

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle – sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle.

Dans le cas idéal, elle est déterminée à partir de l'équation de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque par l'expression :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right] \quad (\text{I-12})$$

Avec :

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

K : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

I_0 : courant de saturation. [16]

I.12.3 Le facteur de forme FF :

Le facteur de forme FF indique le degré d'idéalité de la caractéristique courant-tension, donc c'est le rapport entre la puissance de sortie maximale et la puissance idéale. [18]

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{I-13})$$

I.12.4 Rendement de conversion η :

Le rendement de la conversion est la propriété la plus importante d'une cellule PV. Il est défini comme rapport entre la puissance générée par la cellule et la puissance radiative incidente sur la surface de cette dernière.

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_c}{P_i} \quad (\text{I-14})$$

P_i Est la puissance radiative incidente. [18]

I.13 Association de cellules photovoltaïques :

Dans la condition standard, la puissance maximale pour une cellule au silicium de 10 cm² serait d'environ 1,25 W. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de très faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. Ces groupements sont appelés modules, puis panneaux. [19]

Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres existant dans un réseau de photopiles en fonctionnement. En effet, bien que choisies théoriquement identiques, les nombreuses cellules qui constituent le générateur présentent des caractéristiques différentes du fait des dispersions de construction inévitables, mais aussi d'un éclairage et d'une température non uniformes sur l'ensemble du réseau.

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant pour une même tension.

I.13.1 Montage série :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné Figure I.16.

$$\mathbf{I = I_1 = I_2 = \dots = I_n} \quad \mathbf{(I-15)}$$

$$\mathbf{U = U_1 + U_2 + \dots + U_n} \quad \mathbf{(I-16)}$$

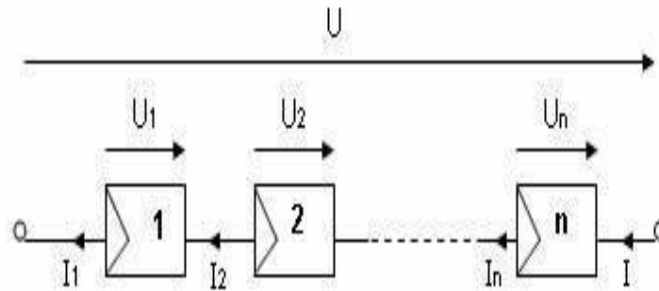


Figure I.16 : association série de cellules photovoltaïques

I.13.2 Montage parallèle :

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent :

La caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée Figure I.17.

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \tag{I-17}$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \tag{I-18}$$

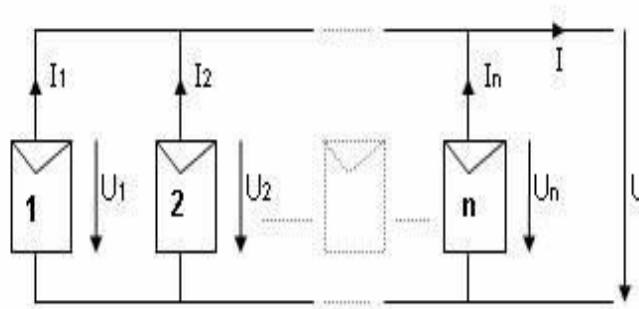


Figure I.17 : association parallèle de cellules photovoltaïques.

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V.

I.13.3 Montage mixte série-parallel :

Dans le cas d'un montage série-parallel, il faut associer en dérivation des ensembles de panneaux montés en série ou bien associer en série des ensembles de panneaux montés en dérivation. [19]

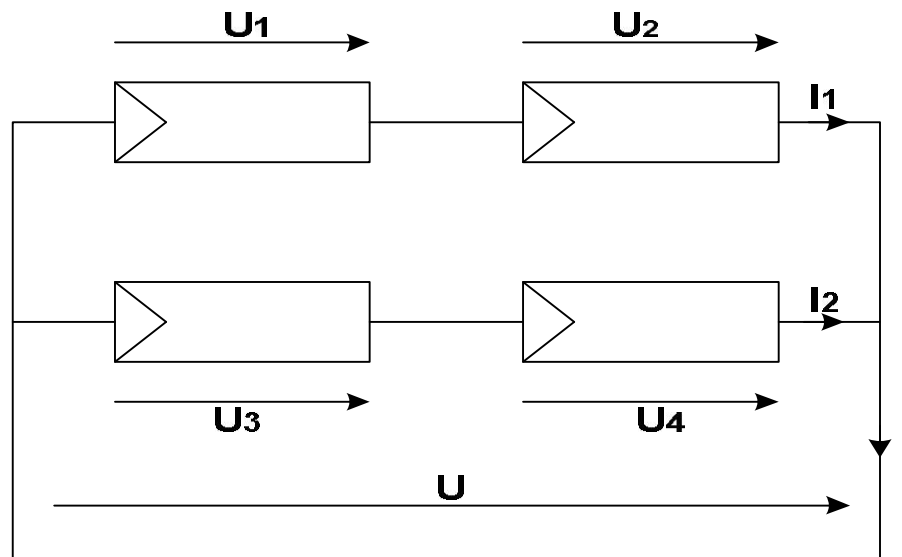


Figure I.18 : association mixte de cellules photovoltaïques. [19]

I.14 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.14.1 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, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

1.14.2 Avantages :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- 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. [20]

I.15 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le gisement solaire, rayonnement solaire, types de rayonnements solaires et les coordonnées terrestres. Nous nous sommes ensuite focalisé sur la généralité des cellules photovoltaïques, ainsi que leurs caractéristiques principales.

Finalement, nous avons décrit les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque, son secteur d'application et son avenir.

Chapitre II :

Technologie d'une cellule
photovoltaïque

II.1. Introduction :

Le silicium fut découvert en 1824 en Suède, c'est l'élément le plus abondant de la terre après le carbone, non toxique, on le trouve généralement sous forme de silicate dans de nombreuses roches, argiles et terres.

Il est possible de le produire avec un haut degré de pureté. Comme matériau de base, ce dernier reste le mieux placé pour un développement des cellules photovoltaïques à large échelle, beaucoup d'efforts sont investis actuellement dans l'augmentation des capacités et de production de silicium de qualité électronique. Pour atteindre ce but nous devons en premier lieu faire une étude élargie sur ce matériau exploité. [21]

II.2. Le silicium comme matière de base d'une cellule photovoltaïque :**II.2.1. Le silicium :**

Les semi-conducteurs sont classés selon leur composition chimique, il y a des semi-conducteurs élémentaires tels que le diamant (C), le silicium (Si), le germanium (Ge) qui appartiennent tous au groupe IV du tableau périodique.

Il existe également des semi-conducteurs composites, binaires, ternaires, quaternaires, voire quinaires, respectivement constitués de deux, trois, quatre ou cinq espèces chimiques différentes.

Le silicium est un élément métal pur de couleur gris foncé avec des reflets métalliques bleutés. Élément de la série chimique des métalloïdes, du groupe des cristallogènes dans le tableau périodique des éléments

Terme créé par l'Anglais Sir Humphry Davy, en 1808, à partir du mot silice, silice, oxyde de silicium. On peut aussi combiner deux différents groupes semi-conducteurs IV pour obtenir un matériau composé tel que le Sic (carbure de silicium). Élément chimique de numéro atomique 14, de masse atomique 28,086. [22]

Tableau périodique des éléments chimiques. Le silicium (Si) est entouré d'un cercle rouge.

Figure II.1 : Table périodique des éléments chimiques.

Après l'oxygène, c'est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Le silicium sur terre se trouve essentiellement sous forme minérale, il forme avec le quartz et les silicates, plus de 90 % de la croûte terrestre. Le silicium a été isolé pour la première fois en 1823 par Jöns Jacob Berzelius, son utilisation dans l'industrie est variée, par exemple :

- Verrière, le verre est fabriqué depuis la protohistoire à partir de la silice
- Composant des céramiques
- Composants électroniques, pour ses propriétés de semi-conducteur
- Synthèse des silicones (environ 40 % de la consommation)
- Semi-conducteur, pour la fabrication de cellules solaires photovoltaïques. [22]

II.2.1.a. Réduction de la silice :

On réalise une électrolyse dans un four à arc pour atteindre une température assez élevée pour faire fondre la silice. La silice est mélangée à du carbone. Réaction principale :



Le silicium obtenu a une pureté de 98%, il faut encore le purifier pour obtenir un matériau de qualité électronique. [23]

II.2.1.b. Purification du silicium :

La purification chimique consiste à faire une distillation à partir de SiHCl_3 (trichlorosilane) liquide à température ambiante.



Le rendement de la réaction est égal à 90%, c'est une première purification car des précipités chlorés ne se mélangent pas au trichlorosilane. Puis SiHCl_3 (qui a une température d'ébullition faible : 31.8°C) est purifié par distillation fractionnée, il est plus volatil que les chlorures des principales impuretés. Ce trichlorosilane purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium.



Après la distillation, les impuretés actives sont réduites, le silicium est alors de bonne qualité électronique, donc le silicium obtenu est pur (intrinsèque) et doit maintenant subir un double traitement à la fois d'enrichissement en matériau dopant afin d'en faire du silicium extrinsèque de type p ou n comportant une proportion d'une impureté connue, et d'obtenir de plus un monocristal convenablement orienté. En effet, le silicium précédemment obtenu était polycristallin ; il y a nécessité de le transformer en monocristallin pour améliorer sa conductivité. Cette opération est réalisée dans un four à tirage selon la procédure de Czochralski [23].

II.2.3 Le silicium dans la nature :

On obtient le silicium à partir de la silice que l'on trouve notamment dans le sable Figure II.2 et le quartz Figure II.3. La silice, dont le nom chimique est « dioxyde de silicium », est un assemblage d'un atome de silicium et de deux atomes d'oxygène (SiO_2). Le raffinage du silicium consiste à séparer ces atomes dans un four, étape fortement consommatrice d'énergie. Elle permet d'obtenir du silicium liquide qualifié de « métallurgique ». [22]



Figure II.2 : Sable hollandais (grains 0,2 à 0,6 mm).



Figure II.3 : Quartz de la mine de La Gardette, Bourg d'Oisans, Isère, France.

Aujourd'hui, plus de 99% des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base. Ce dernier se présente sous différentes formes, les plus répandues étant le silicium monocristallin, le silicium poly cristallin et le silicium amorphe.

Le silicium offre de nombreux avantages. Présent en abondance dans la croûte terrestre c'est un matériau non toxique. Outre ses propriétés semi-conductrices, le silicium présente un oxyde naturel SiO_2 qui trouve de nombreuses applications en microélectronique. [22]

Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le bore ou le phosphore.

Propriété physique	Numéro atomique	Poids atomique ($\mu.a$)	Rayon atomique (nm)	Emissivité à 300 K	Densité à 293K ($kg.m^{-3}$)	Gap à 300K (eV)
		14	28,0855	0,117	0,58	2329
Propriété thermique	Température °C		Chaleur spécifique ($J kg^{-1}K^{-1}$)		Chaleur latente (kJ/kg)	
	Fusion	Ebullition	25°C	1414 °C	Fusion	Vaporisation
	1414	3265	700	1000	1800	13700

Table II.1 : Propriétés physiques et thermiques du silicium. [22]

II.3 Différents types du silicium :

Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quel que soit sa forme. Comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température ambiante sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin (monocristallin ou multi-cristallin). [10]

II.3.1. Le Silicium monocristallin :

Le silicium monocristallin a été le premier matériau de base à être utilisé dans la fabrication des cellules solaires ; il présente deux avantages principaux :

- absence des joints de grain.
- présence d'une seule orientation cristallographique

Les atomes du silicium sont arrangés de façon périodique dans la structure diamant (zinc blende) avec une distance interatomique $d = 2,35 \text{ \AA}$. Le gap de ce matériau est indirect, il est de l'ordre de 1,12 eV à la température ambiante.

Le silicium monocristallin est obtenu généralement par la méthode de Czochralski (méthode de tirage vertical en bain fondu). [19]

II.3.1.a. Elaboration du silicium monocristallin par la méthode de Czochralski « CZ » :

La croissance du silicium monocristallin CZ se fait sous vide, les principales étapes sont :

- faire fondre dans un creuset le silicium poly-cristallin en présence d'un gaz inerte.
- stabiliser la température du bain à une température supérieure à celle de la fusion du silicium.
- amener un germe monocristallin au contact du bain (pour faciliter la nucléation sur ses sites cristallographiques des atomes provenant du bain de silicium).
- élever verticalement le germe à une vitesse bien définie avec une rotation autour de son axe sans casser l'interface liquide-solide.
- refroidir lentement le germe durant sa levée pour le solidifier sans casser l'interface solide-liquide.

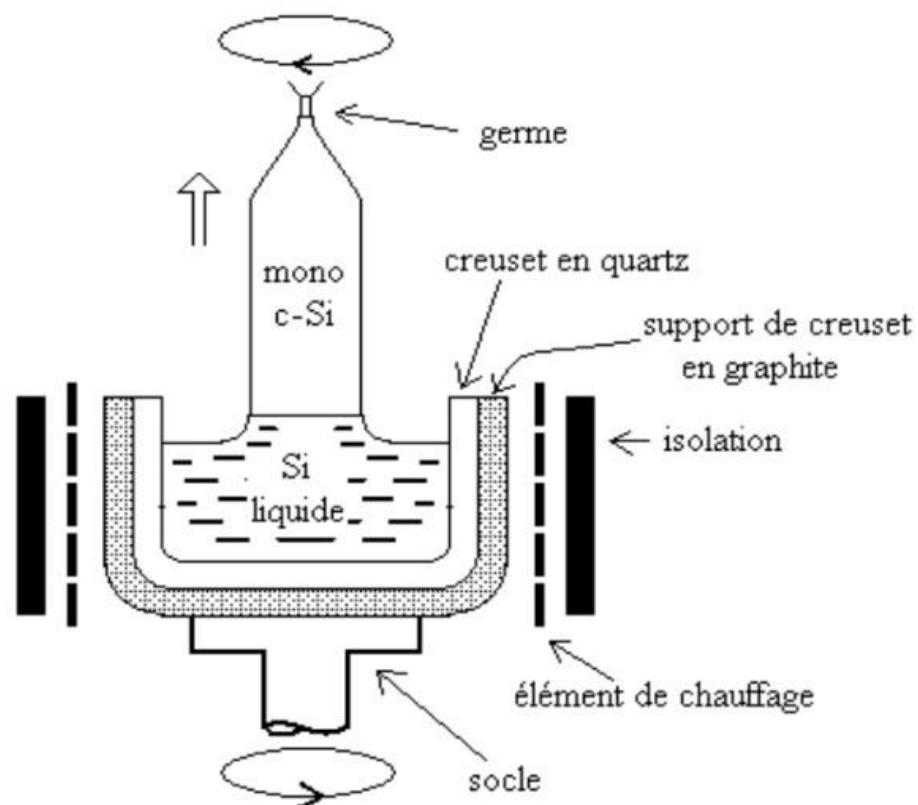


Figure II.4 : Technique de Czochralski pour la fabrication de Si monocristallin. [19]

Lors de ces opérations, le silicium peut être soit intrinsèque soit dopé grâce à l'introduction de dopants (bore ou phosphore) dans le bain de fusion.

II.3.2 Le silicium multi-cristallin :

Le silicium multi-cristallin est composé de monocristaux (grains) qui ont une taille de l'ordre du millimètre voire plus. Chaque grain a une taille et une orientation cristallographique différente de celle de son voisin. Les monocristaux sont séparés les uns des autres par des zones perturbées appelées joints de grains.

Le silicium multi-cristallin est obtenu notamment par la méthode de solidification directionnelle ; cette technique permet la croissance du silicium multi-cristallin en assurant la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux qui limitent les effets néfastes des joints de grains. [19]

II.3.2.a Elaboration du silicium multi cristallin par la méthode de solidification directionnelle :

La solidification directionnelle est une méthode qui consiste à faire croître un lingot de silicium multi-cristallin avec des grains colonnaires, c'est à dire une croissance des monocristaux du bas vers le haut du lingot. Ceci est basé sur la création d'un gradient de température à l'intérieur d'un four du type HEM (Heat Exchange Methode) où se trouve un creuset qui contient un bain de feedstock (silicium poly cristallin + chutes de silicium monocristallin) [19].

II.3.3 Le silicium poly-cristallin :

On peut réaliser d'un seul coup un lingot de grandes dimensions par refroidissement directionnel d'une masse de silicium en fusion. Le lingot obtenu est composé de plusieurs gros cristaux, séparés par des joints de grain. Ce matériau, moins homogène que le silicium monocristallin, a de ce fait un rendement énergétique légèrement moins bon dans le commerce, mais sa fabrication est plus facile. Ces lingots de silicium multi-cristallin doivent être coupés en tranches de 200 à 400 mm

II.3.4 Le silicium amorphe :

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin. Une fine couche de 0,3 mm est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible.

Dans cette technologie, le silicium est produit directement sur une plaque de verre à partir du gaz silane SiH_4 . En fait, les plaques de verre sont placées dans une enceinte chauffée où l'on fait le vide, puis du silane est injecté et décomposé par une décharge radiofréquence ; le silicium libéré se dépose alors sur les plaques. La présence d'hydrogène est également nécessaire pour la qualité du matériau (il limite le nombre de défauts en saturant les liaisons pendantes de silicium présentes à cause de la structure désordonnée). L'adjonction des dopants est réalisée par ajout de gaz la phosphine (PH_3) ou le diborane B_2H_6 au silane.

Avec ce type de matériau peu coûteux par rapport aux autres formes de silicium, on a de faibles rendements et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement quand on l'expose au soleil et aux intempéries [10].

II.4 La fabrication des cellules photovoltaïques :

II.4.1 Cellule, module et système :

Nous allons décrire brièvement les différentes étapes de fabrication des capteurs photovoltaïques, du minerai (matière première) au système utilisé par le consommateur (produit final). [23]

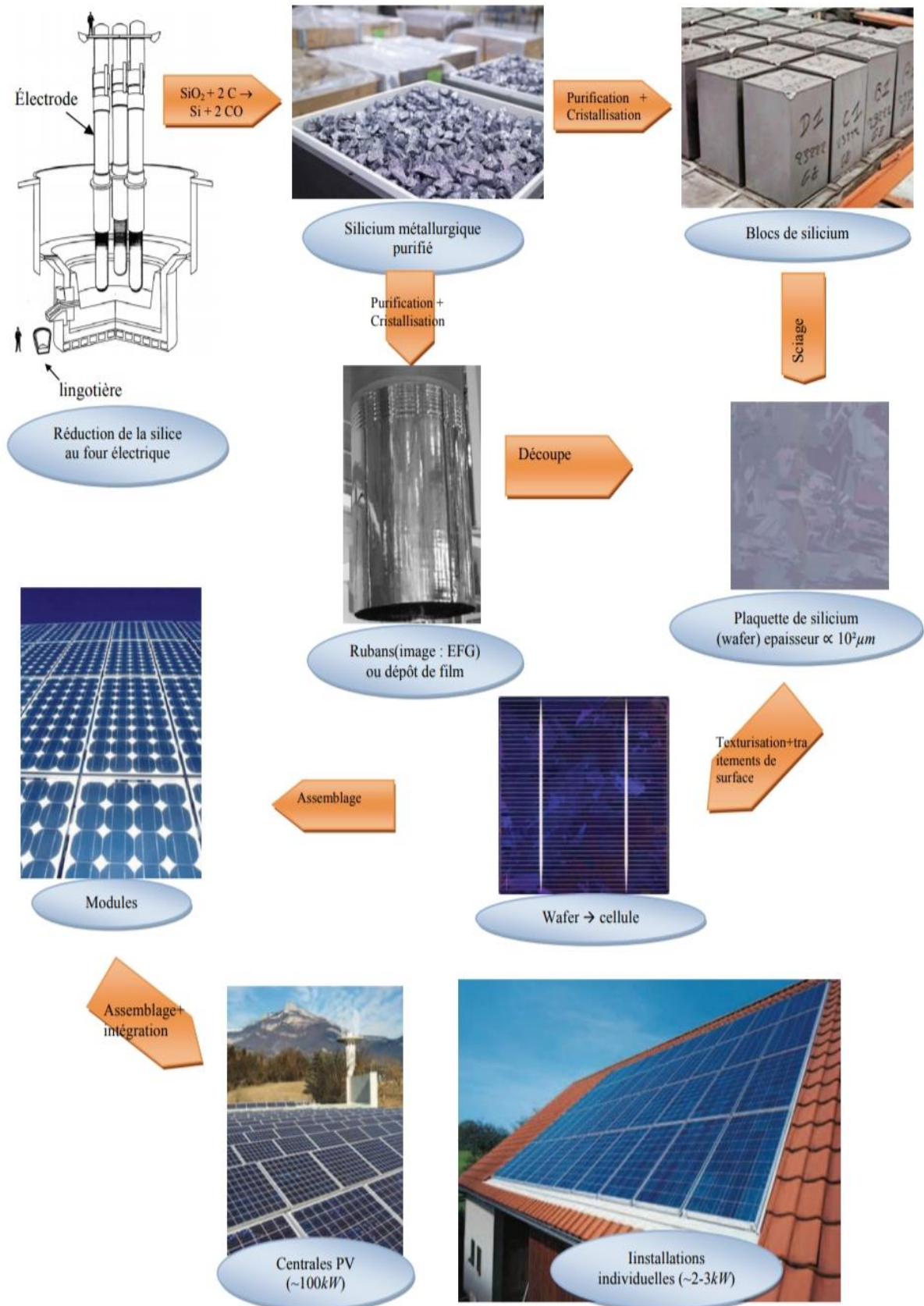


Figure II.5 : Différentes étapes d'élaboration de la cellule, du silicium brut au système solaire photovoltaïque. [23]

Le processus d'élaboration du minerai au système photovoltaïque est décrit sur la Figure II.5 :

- Le silicium existe dans la nature sous formes d'oxyde SiO_2 (silice). Afin d'en extraire l'élément silicium, on réduit la silice brute avec du carbone dans un four à arc électrique. Le produit obtenu est appelé 'silicium métallurgique', pur à 98%.
- Le silicium métallurgique est d'abord purifié, puis fondu et recristallisé selon divers procédés pour obtenir des plaquettes de silicium ou wafers de faible épaisseur ($\sim 300\mu\text{m}$) et de dimensions variant entre (101×101 et $150\times 150\text{mm}$). La cellule est obtenue après le processus de dopage, texturisation, revêtement et impression de bandes collecteurs du wafer.
- Plusieurs cellules sont alors connectées entre elles dans un circuit pour constituer un panneau solaire encore appelé module photovoltaïque. Les modules font en général entre 1 et 1,5m de long et 0,46 et 0,66m de large [Photo watt International, 2007].
- Les modules sont à leur tour assemblés pour former un système capable de fournir une puissance électrique suffisante pour le fonctionnement des applications visées. Le système de panneaux solaires délivre du courant continu qu'on peut soit utiliser sur place (off-grid) soit convertir en courant alternatif grâce à un onduleur afin de l'injecter dans le réseau de distribution d'électricité (grid-connected). [23]

II.4.2 Production des plaquettes (wafers) :

Les lingots cristallisés, que ce soit pour le mono ou le multi-cristallin, sont ensuite découpés dans le sens de la hauteur pour former des minces plaquettes d'environ $150\text{-}300\ \mu\text{m}$ (Figure II.6). L'opération est faite par des scies à disques diamantés arrosés d'abrasif et d'eau pour éviter l'échauffement. Le procédé de découpe laisse des défauts considérables en surface. Par conséquent, les faces de la plaquette sont traitées par un polissage mécanique et chimique. Le sciage des plaquettes engendre une perte de matière d'environ 50 %. [24]

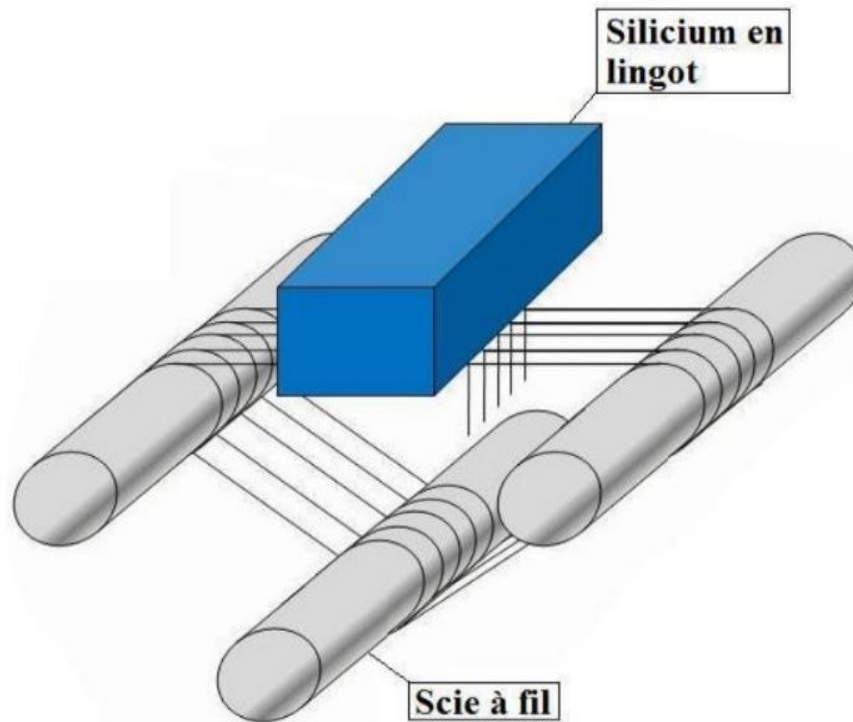


Figure II.6 : Découpage du lingot. [24]

II.4.3 Nettoyage :

Cette étape consiste à éliminer les composés abrasifs et les contaminants par des solvants et de l'eau dés ionisée.

II.4.4 Attaque chimique des plaquettes :

Lors des différentes étapes, il s'est formé, en surface des plaquettes, un oxyde natif contenant des impuretés. Ces impuretés sont soit métalliques et sont éliminées par une solution acide, soit organiques et éliminées par une solution basique :

- ❖ solutions acides : HNO_3 , CH_3COOH ,
- ❖ solutions basiques : KOH . On n'utilise pas de soude (NaOH) car le sodium est un polluant violent pour les oxydes, plus particulièrement pour les oxydes de grille des transistors MOS.

L'oxyde natif est finalement attaqué par une solution d'acide fluorhydrique (HF). On obtient alors une surface chimiquement neutre avant un polissage "miroir".

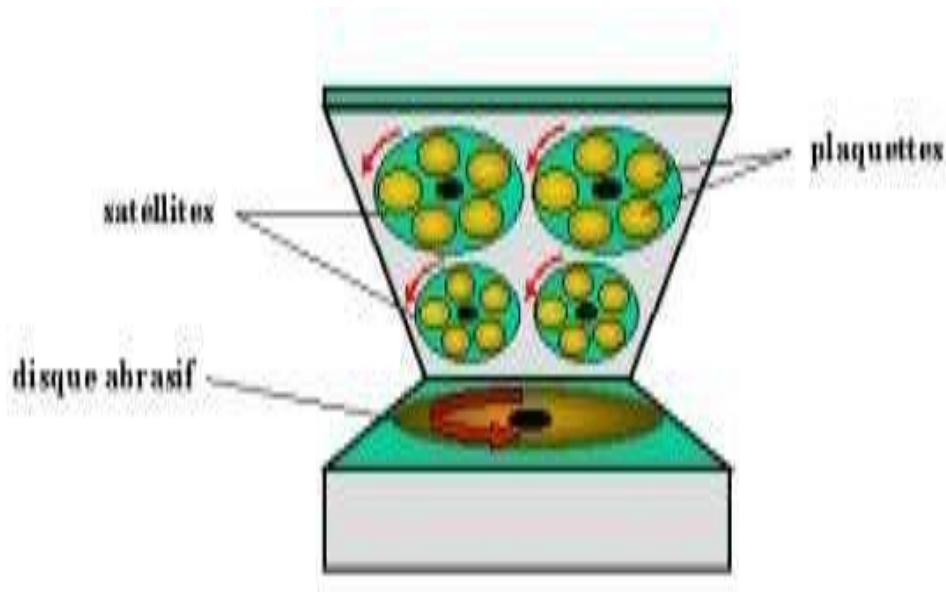


FIGURE II.7 : Nettoyage chimique des plaques [25].

II.4.5 Nettoyage des substrats et plaquettes :

L'opération de nettoyage est indispensable avant chaque étape technologique principale et correspond elle aussi à une longue suite d'opérations élémentaires. En effet, si une plaquette ou un substrat a attendu entre deux étapes majeures, il faut procéder à un dégraissage et un décapage de la surface en éliminant l'ensemble des impuretés ainsi que l'oxyde natif du silicium qui se forme automatiquement s'il n'est pas recouvert d'une couche protectrice.

- 3 min dans un bain de trichloréthylène chaud (dégraissage),
- 3 min dans un bain d'acétone (pour enlever le trichloréthylène),
- 3 min dans de l'alcool éthylique (pour enlever l'acétone),
- 5 min dans de l'eau dés ionisée,
- 10 min dans la solution basique SC1 ($3 \text{ NH}_4\text{OH} + 7\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}_2$) à ébullition (élimine les impuretés organiques en régénérant l'oxyde natif),
- 5 min dans de l'eau dés ionisée,
- 10 min dans la solution acide ($\text{HCl} + 6 \text{ H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2$) à ébullition (élimine les impuretés métalliques en régénérant l'oxyde natif),

- 5 min dans de l'eau dés ionisée,
- 1 min dans de l'acide fluorhydrique (élimination de l'oxyde natif)
- 5 min dans de l'eau dés ionisée.

Cet ensemble d'opérations est renouvelé autant que nécessaire au cours du procédé complet de fabrication [25].

II.5. Elaboration de la cellule solaire en silicium monocristallin de type n :

L'architecture et le procédé général de la fabrication d'une cellule photovoltaïque pour les deux types (p et n) sont analogues. Comme, on l'a énoncée dans l'introduction, la technologie de la fabrication des cellules « type p » est beaucoup plus maîtrisée contrairement à celle de «type n » qui est en cours de développement. Nous allons dans ce qui suit, décrire les techniques de ces deux procédés.

II.5.1. Procédé standard de réalisation d'une cellule solaire en silicium monocristallin de type p :

La figure (Figure II.8) présente la structure générale d'une cellule solaire à substrat de type p et qui est composée des éléments suivants :

- La base qui est un substrat de type p (en général, dopé au bore)
- L'émetteur n^+ (en général, sur dopé au phosphore) formant la jonction $n^+ p$ avec la base
- La couche de passivation (en général d'oxyde de silicium SiO_2)
- La couche antireflet (CAR) en face avant (en nitrure de silicium SiN_x), qui joue également un rôle supplémentaire de passivation
- Le champ de surface arrière (BSF : Back Surface Field), sur dopé p^+ (en général à l'aluminium)
- Les contacts en face avant (argent Ag) et en face arrière (aluminium Al) permettant la collecte des porteurs de charge et la mise en module. [24]

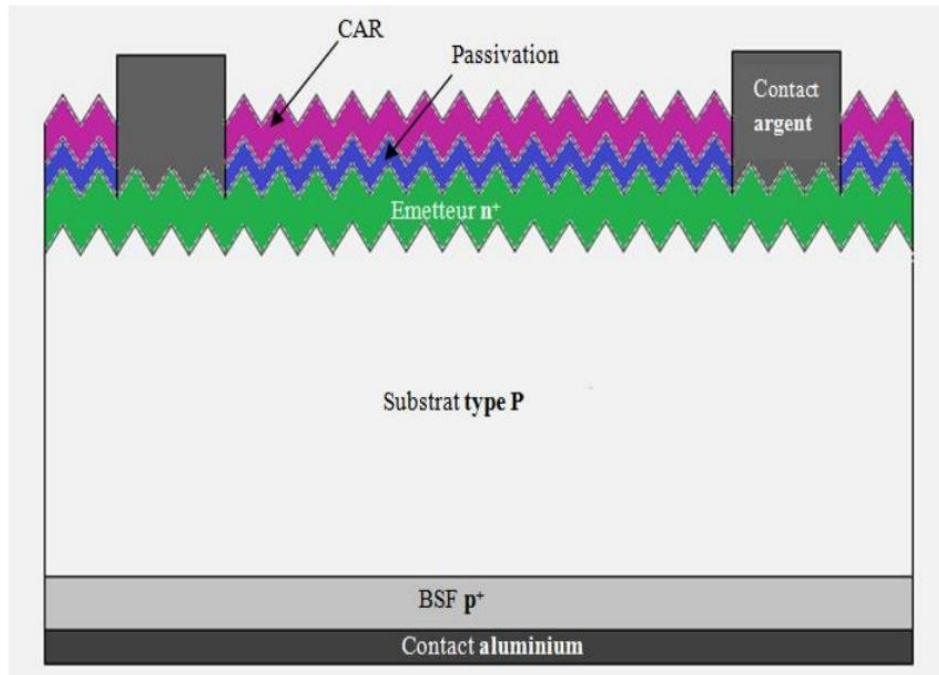


Figure II.8 : Structure générale d'une cellule solaire de type p. [24]

II.6 Structure des cellules solaires :

II.6.1 Éléments de base :

On considère que la cellule photovoltaïque de base est constituée d'une ou plusieurs couches actives entourées par des électrodes. La cellule photovoltaïque est le siège de la photo-excitation, de la création d'excitons et du transport de charges aux électrodes. Pour ne pas nuire à l'un de ces mécanismes, chaque couche de l'empilement doit vérifier certains critères. La première chose à vérifier est que la lumière incidente ne soit pas absorbée dans les premières couches avant d'atteindre la couche active. La cellule solaire à homo jonction à base de silicium est formée de plusieurs couches :

- Une grille collectrice avant ;
- Une couche de Si dopée N ;
- Une couche de Si dopée P ;
- Une couche conductrice.

La figure suivante (figure II.9) montre le schéma de principe d'une cellule solaire

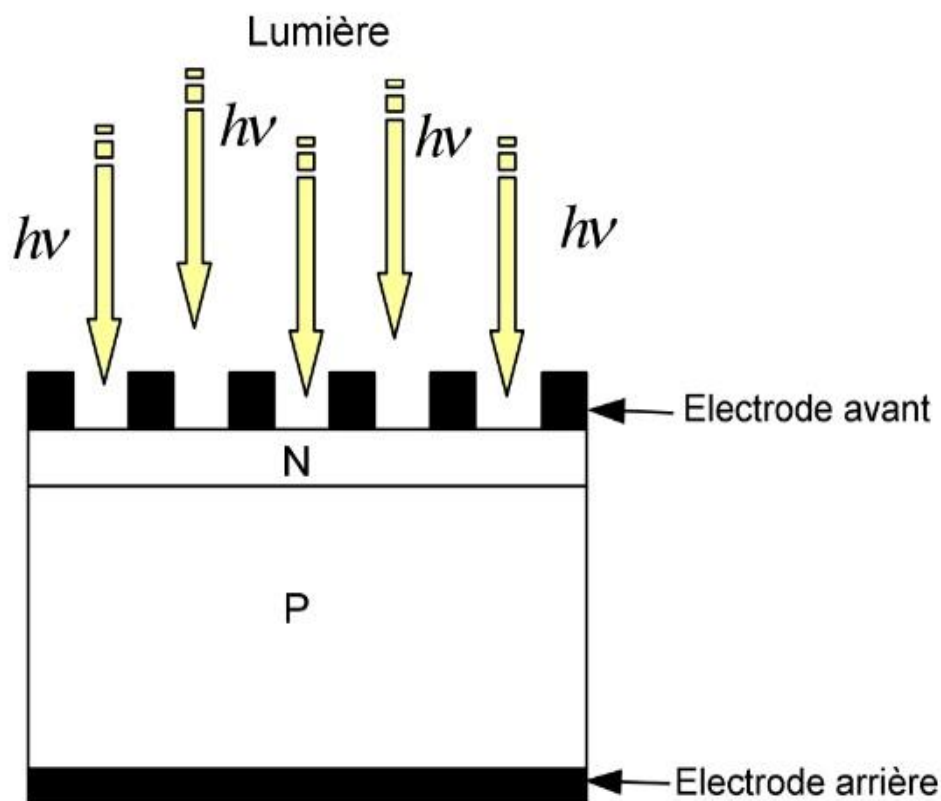


Figure II.9 : Schéma de principe d'une cellule solaire. [26]

II.7 Les Techniques pour diminuer des pertes de rayonnements :

II.7.1 Texturation (ou texturisation) :

Toute rugosité de la surface réduit la réflectivité en favorisant les chances pour la lumière de se réfléchir sur le matériau. L'opération de texturisation vise à développer en surface un relief micrométrique (typiquement 5-10 μm), permettant des réflexions multiples (Figure II.10).

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. Par exemple, un rayon arrivant en incidence normale par rapport au plan de la cellule est réfléchi sur la face d'une « pyramide » adjacente, diminuant ainsi le coefficient de réflexion de R à R^2 (Figure II.12). De plus, le rayon transmis dans la cellule l'est avec un angle de réfraction différent de 0° , augmentant son parcours au sein du silicium par rapport au cas d'une surface plane. La probabilité d'absorption des photons en est donc améliorée (c'est une partie du but de cette manuscrite). [27].

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation) permet de réduire

drastiquement la réflexion du rayonnement incident (Figure II.10). Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface du wafer de silicium. La forme généralement pyramidale du relief multiplie les réflexions et donc les chances pour la lumière de pénétrer dans le matériau.

En effet, le rayonnement incident est constitué de longueurs d'onde inférieures aux dimensions des structures réalisées (quelques μm). Les techniques industrielles de texturation se font le plus souvent par voie chimique alcaline (KOH, NaOH, l'hydroxyde de tétraméthylammonium : TMAH). Cependant, les voies acide, sèche et par laser font l'objet d'un intérêt croissant en particulier pour les matériaux polycristallins ou en couches minces [28].

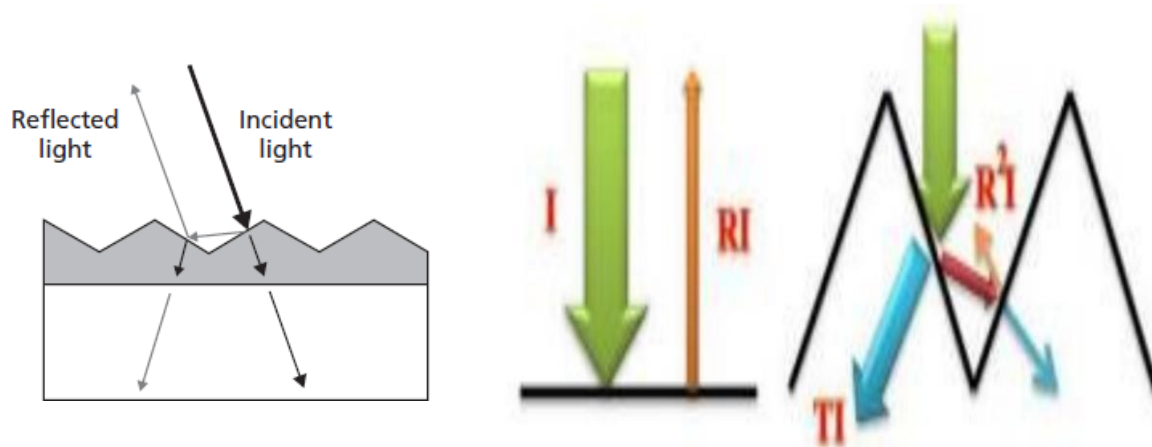


Figure II.10 : Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée. [27-28].

Enfin, la texturisation de la face arrière entraîne un piégeage plus important de la lumière au sein de la cellule [27].

I est l'intensité lumineuse incidente,

R est le coefficient de réflexion,

T celui de transmission.

On peut citer différentes méthodes de texturisation, par exemple les attaques chimiques. Elles sont très utilisées dans l'industrie photovoltaïque basée sur le silicium. La texturisation basique par des solutions telles que la soude (NaOH) va entraîner la formation de pyramides à la surface du silicium. Son coût relativement faible fait que cette solution est encore utilisée par

bon nombre d'industriels. Une technique plus adaptée est la texturisation acide qui présente l'avantage d'attaquer la surface de façon isotropique.

D'autres techniques, comme la texturation mécanique (laminage à froid sous un peigne dentelé) ou la gravure plasma (RIE pour Reactive Ion Etching), la gravure par laser, peuvent également être utilisées.

Intérêt de la texturisation :

- provoque des réflexions multiples à la surface de la cellule
- augmente le trajet parcouru par le faisceau optique avant de ressortir de la cellule

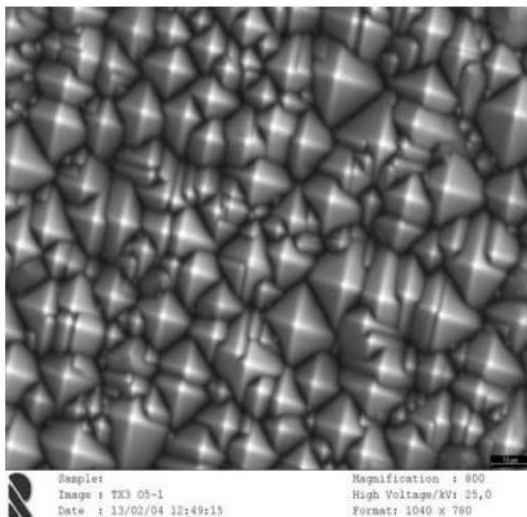


Figure II.11 : Texturisation alcaline

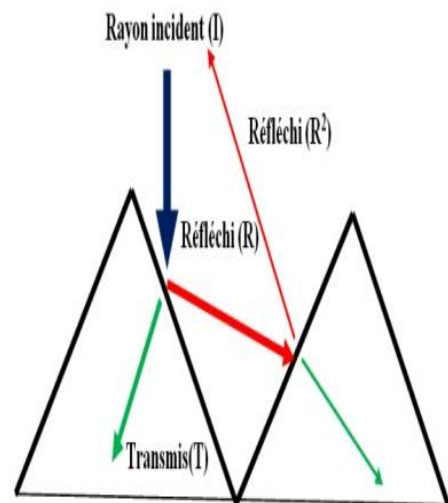


Figure II.12 : Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant surface texturée. [24]

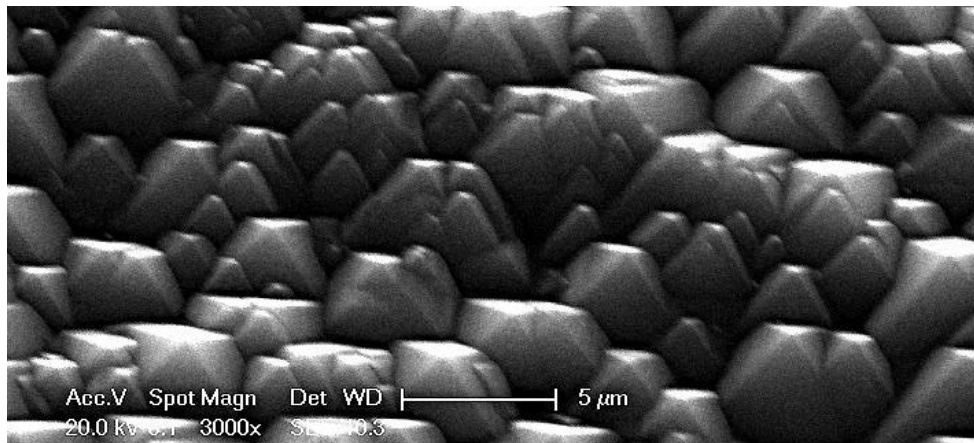


Figure II.13 : Texturation de la surface d'un substrat de silicium, observée au MEB Zeiss Ultra+ du CIME Nanotech. [29]

Une autre approche de la texturation est l'utilisation de nanostructures qui part de l'idée de fabriquer des cellules au silicium à base de nanofils de silicium, en formant des jonctions radiales. Un exemple est donné dans la figure II.14, où les colonnes de silicium sont réalisées dans une plaquette de silicium par attaque chimique sélective. Les colonnes sont ensuite recouvertes d'une couche de silicium n^+ servant d'émetteur et d'une couche de contact [28].

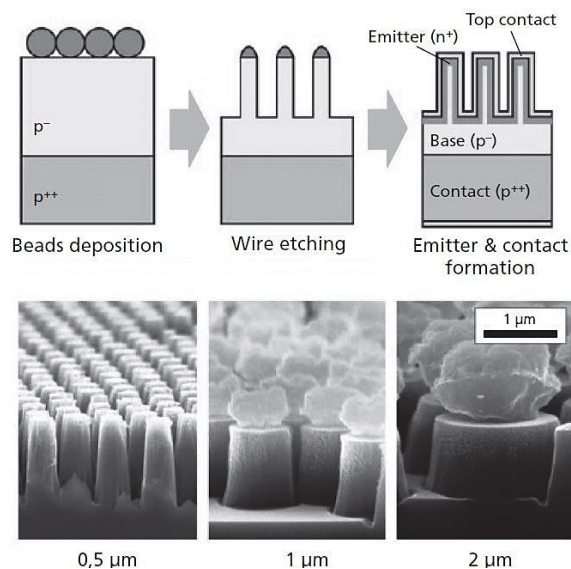


Figure II.14 : Prototypage de formation de cellules au silicium à partir de nanocolonnes. Dans ce cas, les nanocolonnes sont faites par attaque chimique en milieu liquide sur des billes de catalyseurs. [28]

II.7.1.a Les types des texturisations :

Parmi les différentes méthodes de texturisation, on distingue deux types : chimique et physique.

Les attaques chimiques sont particulièrement utilisées dans l'industrie photovoltaïque basée sur le silicium. La texturisation basique, à l'aide de solutions telles que la soude (NaOH), va entraîner la formation de pyramides à la surface du silicium. Cependant, elle est fortement anisotrope, la gravure des plans (100) étant cinquante fois plus rapide que celle des plans (111). La forte disparité de l'orientation des grains à la surface du silicium multi cristallin a pour résultat une efficacité de texturisation d'environ 50%.

Néanmoins, son coût relativement faible fait que cette solution est encore utilisée par bon nombre d'industriels.

Une technique plus adaptée est la texturisation acide qui présente l'avantage d'attaquer la surface de façon isotrope. Un exemple est une solution dénommée AFN, en référence à ses constituants : acides acétique (CH_3COOH), fluorhydrique (HF) et nitrique (HNO_3). Le premier permet d'augmenter la mouillabilité de surface et le deuxième décape l'oxyde formé par le dernier. Cette combinaison permet d'obtenir une surface de silicium multi cristallin poreuse et homogène, indépendamment de l'orientation cristallographique, et donc une réflectivité plus faible. Les vitesses d'attaque varient selon les proportions des différents acides et sont accélérées par la présence de défauts en surface (dislocations). Cependant, un contrôle rigoureux de la réaction (exothermique) est nécessaire engendrant une opération plus lente et moins reproductible que la texturisation basique [27].

Les texturisations à base de KOH ou NaOH sont économiques et simples à réaliser mais ils présentent comme principal inconvénient de polluer la surface du silicium avec leurs ions alcalins (K^+ , Na^+). En microélectronique, ces ions dégradent les systèmes et il est probable qu'ils aient le même effet sur les cellules photovoltaïques. Parmi les solutions alternatives, le Tetra Methyl Ammonium Hydroxide ($(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$, TMAH) présente de nombreux avantages. Cette solution est largement utilisée en microélectronique et dans les MEMS car elle combine une vitesse de gravure élevée et un ratio d'anisotropie variable. Elle est de plus compatible avec le travail en salle blanche, peu toxique (à faible concentration), facile à utiliser et altère peu les diélectriques comme le SiO_2 et le SiN_x . De nombreuses études ont été réalisées à partir du

TMAH pour obtenir des surfaces très lisses pour les MEMS. YOU développa une solution de gravure à base de TMAH dilué (5- 20%) et caractérisa les couches obtenues à l'aide d'une mesure de réflectivité sous incidence normale sans sphère intégrante. Encanailla quant à lui, s'est intéressé à l'uniformité de la texturisation. D'après son article, le TMAH dilué permet d'obtenir des surfaces uniformément recouvertes de pyramides uniquement après dissolution préalable de silicium dans la solution. Cette dissolution de silicium peut être réalisée en gravant préalablement des postiches dans la solution, méthode qu'il a utilisée, ou en ajoutant de la poudre de silicium.

D'autres techniques, comme la texturation mécanique (physique) (laminage à froid sous un peigne dentelé) ou la gravure plasma (RIE pour Réactive Ion Etching), la gravure par laser, peuvent également être utilisées.

II.7.1.b Les méthodes expérimentales de la texturisation :

Les différentes étapes de la réalisation de la texturisation sont comme suivantes :

Avant texturisation, les plaquettes de silicium subissent un cycle de nettoyage classique comme suit :

- Dégraissage au trichloroéthane et à l'acétone à chaud, puis rinçage à l'eau dés ionisée et séchage au jet d'azote.
- Désoxydation à l'HF et rinçage à l'eau dés ionisée et séchage au jet d'azote.

Les solutions acides attaquent uniformément le silicium dans toutes les directions cristallographiques avec le même taux. Elles consistent en un mélange d' HF , HNO_3 et CH_3COOH ou H_2O et sont utilisées pour attaquer et polir chimiquement les surfaces de silicium. Les plaquettes de silicium sont disposées horizontalement dans la solution d'attaque. Vu que la solution est exothermique, le processus d'attaque est réalisé à température ambiante (21 à 25 °C). [27]

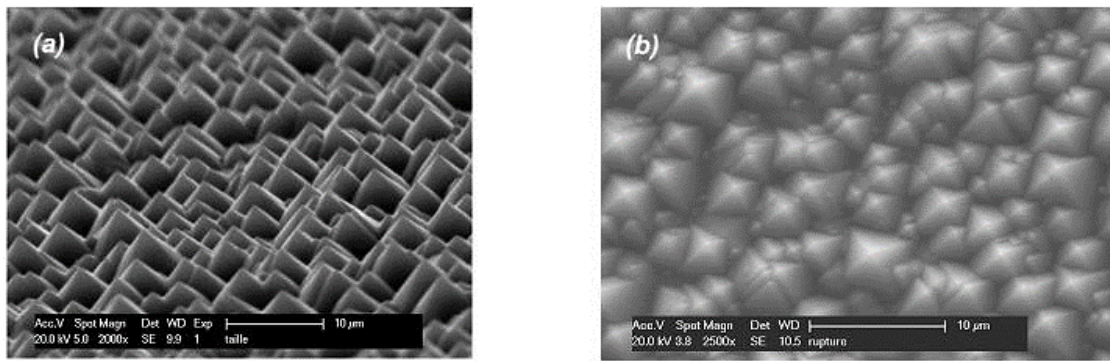


Figure II.15 : Images MEB de substrats de silicium monocristallin (100) texturisés (a) au TMAHet (b) à la soude. [27]

II.7.2. Les contacts face avant et face arrière :

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photo générés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts, c'est à dire entraînant une forte résistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré.

II.7.3. La couche antireflet :

La texturisation de la surface de la cellule permet de limiter les réflexions en face avant. Pour réduire encore plus la réflexion, une couche antireflet est ajoutée. L'indice et l'épaisseur de cette couche sont ajustés pour obtenir une lame quarte d'onde, l'objectif étant de minimiser le coefficient de réflexion de la cellule en créant des interférences destructives. [28]

II.7.4. La couche active :

Elle est constituée de deux semi-conducteurs de types différents (N) et (P), pour créer la jonction PN qui est le principe de base de la cellule solaire. La création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur permet de séparer les électrons et les trous qui sont générés par l'absorption de lumière dans le matériau. Lors de la formation de la jonction, les électrons diffusent vers la zone P et les trous vers la zone N, afin de tendre vers un équilibre thermodynamique. [26]

II.8. Les couches minces

II.8.1 Le retour des couches minces sur la scène internationale :

Après plus de 20 années de recherche et développement, les cellules solaires à couches minces suscitent de plus en plus l'intérêt des chercheurs car elles pourraient révolutionner le monde du photovoltaïque par leur moindre coût à la production, leur très bonne résistance aux augmentations de température, et leur application dans des structures souples et légères. [30]

II.8.2. Notions sur les couches minces :

La technique des couches minces permet de déposer plusieurs couches semi conductrices ou métalliques de quelques nanomètres aux micromètres d'épaisseur, sur un substrat peu coûteux

II.8.3. Techniques de dépôts de couches minces :

Le dépôt est formé à partir d'espèces constituantes (atomes, molécules, particules solides, particules liquides...). Ces espèces viennent d'une source et sont par la suite transportées vers un substrat au travers divers milieu du type :

Milieu passif	Milieu actif
Vide	Plasma
Basse pression	Gaz réactif
Air à pression atmosphérique	Liquide
Atmosphère inerte	

Tableau II.2 : Différents milieux de dépôt de couches minces. [30]

Un dépôt élaboré par PVD (dépôt physique) ou CVD (dépôt chimique) est un revêtement mince (de quelques nanomètres à environ 10 micromètres d'épaisseur), réalisé à basse pression dans une enceinte sous vide partiel ($< 10^{-1}$ mbar). D'une façon générale, cette technologie fait appel à trois composantes :

1. Une source :

Il s'agit de l'endroit où le matériau est déposé (ou l'un de ses composants) est concentré : creuset, plaque métallique, bouteille de gaz. C'est le siège du phénomène physique de base : la dispersion de cet élément sous forme d'atomes, d'ions, et plus généralement de vapeur.

2. Un substrat :

Il s'agit de la pièce à revêtir. C'est ici qu'intervient le phénomène de condensation : la matière issue de la source, pure ou recombinaison, vient s'y fixer pour former des germes qui vont se développer jusqu'à conduire à la formation de la couche.

3. Un milieu :

Il s'agit de tout ce qui est compris entre la source et le substrat. C'est le siège du phénomène de transfert de matière. Cela peut être aussi le siège de réactions chimiques intervenant entre les atomes du matériau à déposer et un gaz (dépôts réactifs)

On différencie les Dépôts Chimiques en Phase Vapeur (CVD) des Dépôts Physiques en Phase Vapeur (PVD) par le moyen utilisé pour produire la vapeur ; CVD : elle résulte d'une réaction chimique ou de la décomposition d'une molécule ; PVD : elle est produite par un phénomène purement physique (évaporation thermique, pulvérisation, ...), nous citerons quelques méthodes :

II.8.4.a Méthodes physiques :

- L'évaporation sous vide ;
- L'ablation Laser ;
- La pulvérisation cathodique ;
- Les procédés par arcs ;
- La pulvérisation par faisceau d'ion ...

II.8.4.b Méthodes chimiques :

- Dépôt chimique en phase vapeur ;
- L'épitaxie en phase vapeur ;
- MOCVD (Métal Organique Chemical Vapor Déposition) ;
- Epitaxie en phase liquide ;
- Dépôt électrolytique ou électrodéposition ;
- CBD (Chemical Bath Déposition)...

Les méthodes résumées dans la Figure II-16, sont souvent capables de produire des films minces, soit 1 pm ou moins et films définis films épais, c'est à dire 1 µm ou plus. Cependant, il existe des techniques qui sont seulement capables de produire des films épais [30].

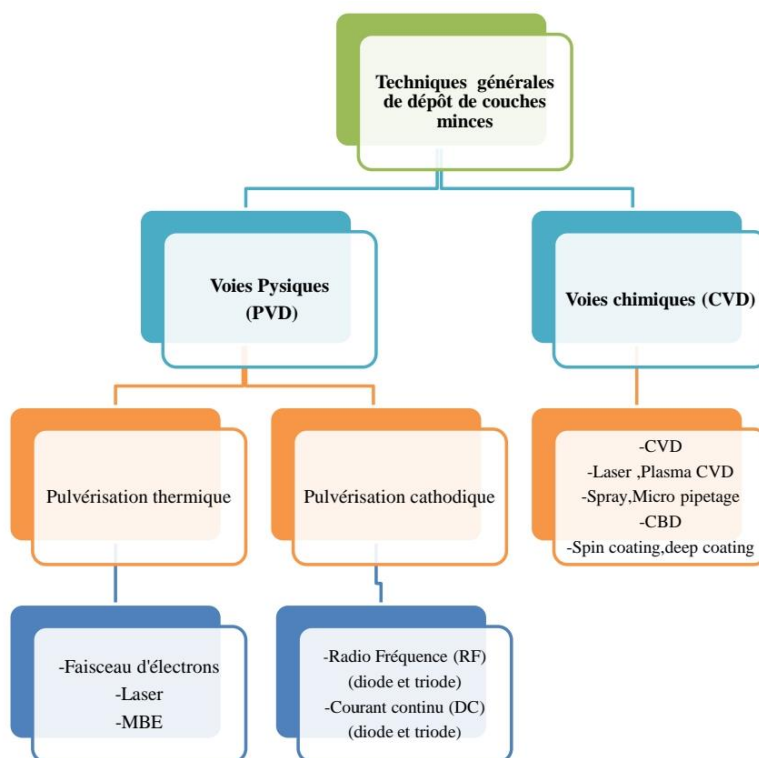


Figure II.16 : Différentes techniques de dépôt des couches minces. [30]

II.9 Différentes générations du photovoltaïque :

Le parc photovoltaïque mondial représente actuellement 27,76 GW produisant une énergie de 100,4 TWh par an selon l'agence internationale de l'énergie (AIE). Bien que l'apport du photovoltaïque dans l'énergie mondiale reste relativement faible vu les problèmes rencontrés lors de la conversion énergétique, les coûts de productions et le stockage d'énergie. C'est pourquoi de nombreuses études et recherches se font pour améliorer et essayer de résoudre ce genre de désagrément et pour cela nous allons voir brièvement les technologies actuelles disponibles pour mieux appréhender l'importance des recherches sur les nouveaux matériaux semi-conducteurs. [30]

A l'heure d'aujourd'hui, on distingue trois générations de cellules photovoltaïques en fonction de leurs technologies :

II.9.1 Première génération :

Cette génération est la plus répandue dans le marché des panneaux photovoltaïques et largement commercialisée, elle est basée sur l'utilisation de plaquettes en silicium cristallin

sciées à partir de Lingots de silicium. On obtient ces lingots après divers processus de purification permettant au matériau de contenir 99.99999% de Silicium.



Figure II.17 : Cellule Si monocristallin (sc. Si)



Figure II.18 : Cellule Si polycristallin(Mc-Si)

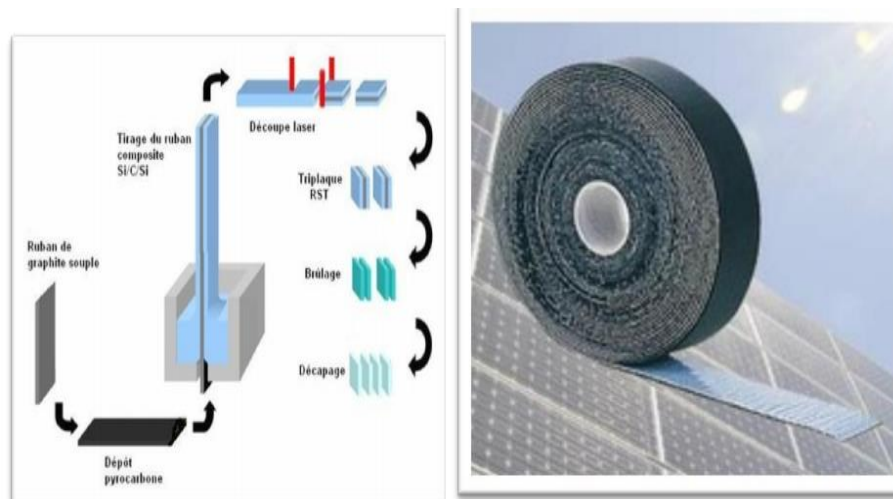


Figure II.19 : Cellule Si ruban (c-Si) tiré de la technologie RST

❖ Les cellules monocristallines :

Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire) ; Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très onéreuse ; technologie qui demande beaucoup d'énergie pour obtenir un cristal pur.

❖ **Les cellules poly-cristallines :**

Coût de production moins élevé ; Procédé nécessitant moins d'énergie ; Rendement 11-13% (18% en Laboratoire).

❖ **Les cellules ruban :**

Cette technologie RST (Rapid Storage Technology) combine les étapes de cristallisation et de mise en forme du silicium, et présente l'avantage de minimiser la perte de matière. Les essais et résultats obtenus de caractérisation sur cellules à partir des plaquettes sont aujourd'hui en termes de rendement de conversion d'ores et déjà autour de 15%. [30]

II.9.2 Deuxième génération :

Cellules CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin :

Après vingt années de recherches et de développement cette génération de cellules solaires qui repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (thin film) commence à prendre de plus en plus de place sur le marché des panneaux photovoltaïques, vu sa consommation moins énergivore que celle de la première génération. Cependant, les cellules à base de Silicium apportent plus de rendement.

Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition), CBD (Chemical Bath Deposition, Sol Gel, Spary, Spin Coating... etc.) sur un substrat léger et peu coûteux. L'épaisseur de la couche varie de quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération. Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement, on distingue :

CdTe : Telluride de Cadmium (Cadmium Telluride), rendement de 16,7% en laboratoire.

CIS : Cuivre Indium Selenium (Copper-Indium-Selenide)

CIGS : Cuivre Indium Gallium Sélénium (Copper-Indium-Gallium-Diselenide), rendement de 20,3% en laboratoire. Silicium amorphe **a-Si** et microcristallin **μc-Si**, rendement de 12,2% en laboratoire.

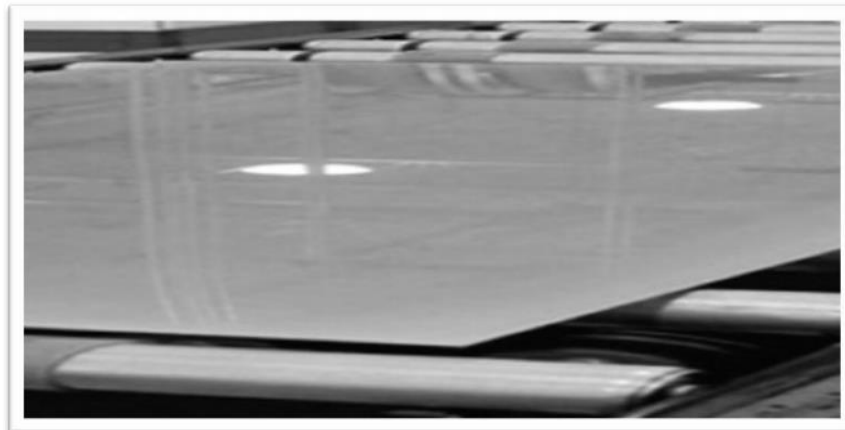


Figure II.20 : Modules verre en CdTe efficacité de 18 ,7%



Figure II.21 : Cellule CIS d'efficacité de 20%

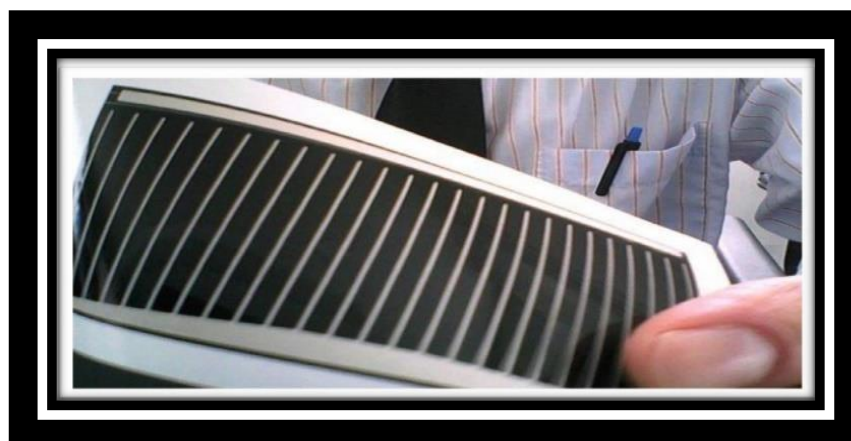


Figure II.22 : Cellule en CIGS, efficacité de 8,5%

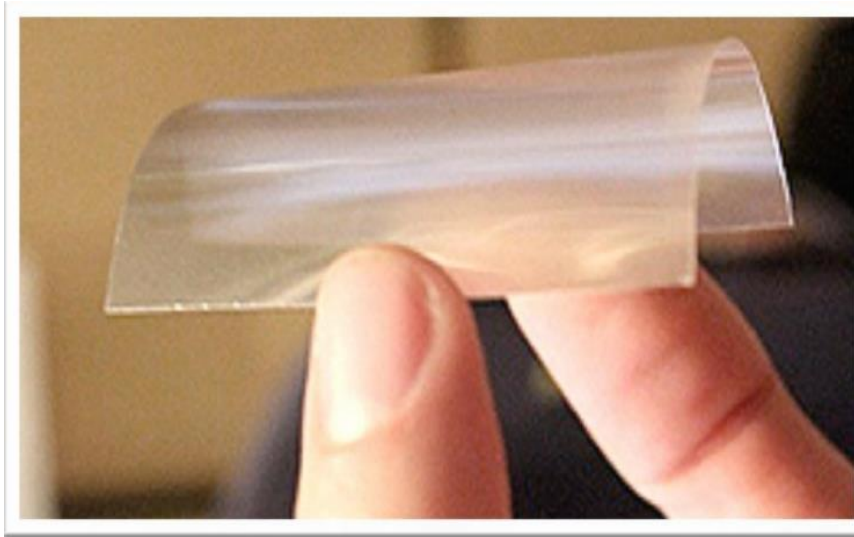


Figure II.23 : Film PV transparent avec un rendement de 10 %

II.9.3 Troisième génération

➤ **Cellules CPV, DSSC, organiques, nouveaux concepts innovants :**

Après divers recherches et développement les cellules photovoltaïques de la troisième génération introduisent de nouvelles notions et technologies encore plus novatrices parmi elles :

➤ **Cellules photovoltaïques à concentration (CPV) :**

Un système qui utilise des dispositifs optiques tels que des miroirs ou lentilles où les cellules en multi jonction semi conductrices captent du plus petit au plus grand rayonnement solaire.

➤ **Cellules à colorant (DSSC-Dye-sensitized solar cells) :**

Cellules solaires à colorant utilisent, la photo électrochimie ; des cellules solaires, qui sont basées sur des structures semi-conductrices formées entre une anode et une photo- sensibilisée électrolyte. Dans un DSSC typique, les semi-conducteurs nano cristaux servent antennes qui récoltent la lumière du soleil (photons) et la molécule de colorant est responsable de la séparation des charges photo courant.

➤ **Cellules organiques :**

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types : cellules photovoltaïques organiques moléculaires ; cellules photovoltaïques organiques en

polymères. L'efficacité des modules commercialisés est de 4% à 5 % et ceux en expérimentation de 6% à 8 %.

➤ **Cellules aux concepts innovants :**

Ce sont les cellules qui utilisent la nanotechnologie puisque à cette échelle nanométrique, les propriétés des matériaux changent. Les physiciens tentent d'en tirer profit et de réaliser des structures de plus en plus efficaces et à moindre coût. [30]



Figure II.24 : Centrale solaire à Concentration (CPV), puissance 19,9 GW, Seville



Figure II.25 : Cellule dye sensitized solar celle panel.

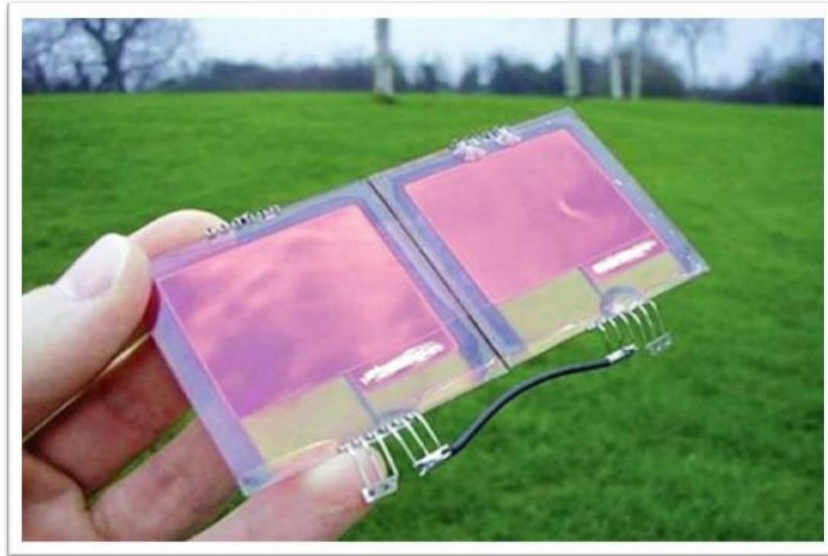


Figure II.26 : Cellule photovoltaïque organique

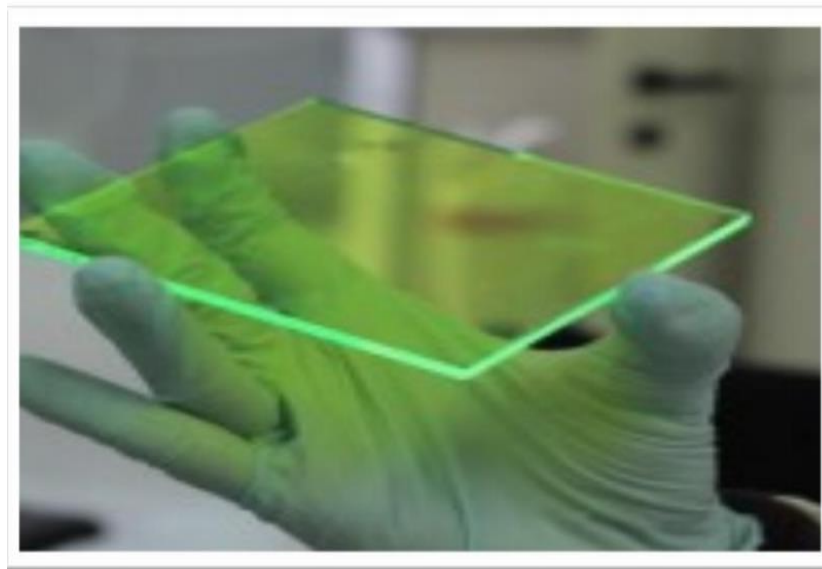


Figure II.27 : Cellule solaire à base de nanoparticule. [30]

II.10 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par E. Becquerel en 1839, il découvrit 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 il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium d'un rendement de 4,5%. Nous présentons ici les mécanismes de la génération de porteurs électroniques au sein d'un semi-conducteur sous l'impact de photons. [31]

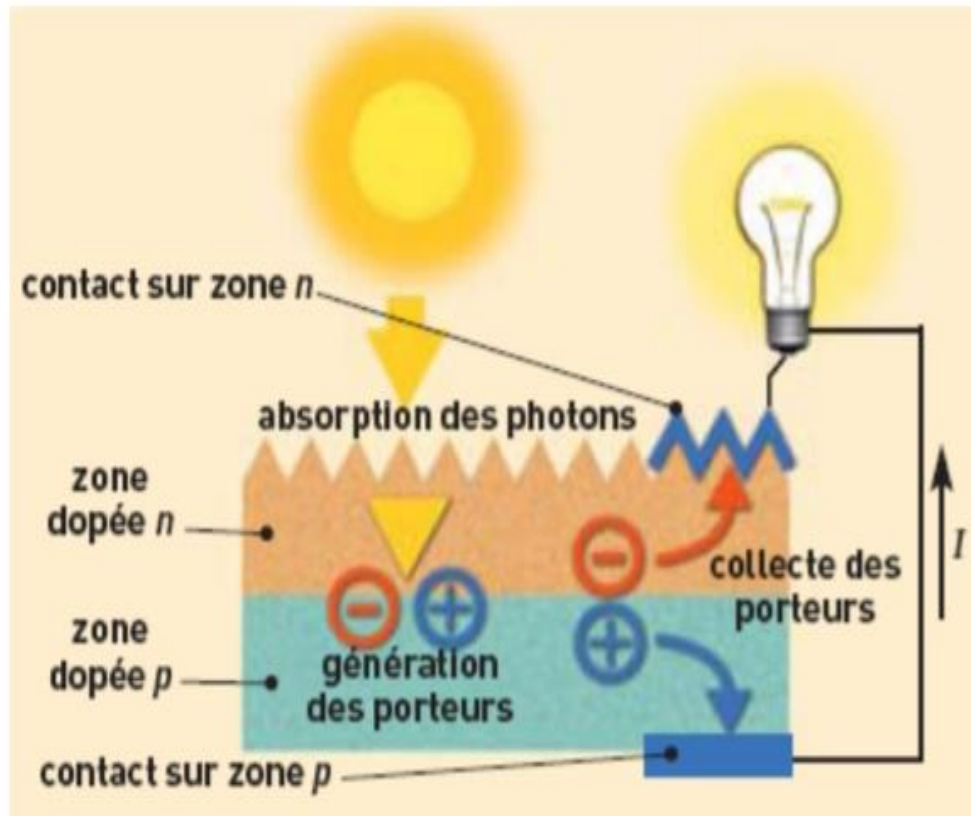


Figure II.28 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

II.10.1. L'interaction photon/semi-conducteurs

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure II.29 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.29 (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs 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-29 (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). [31]

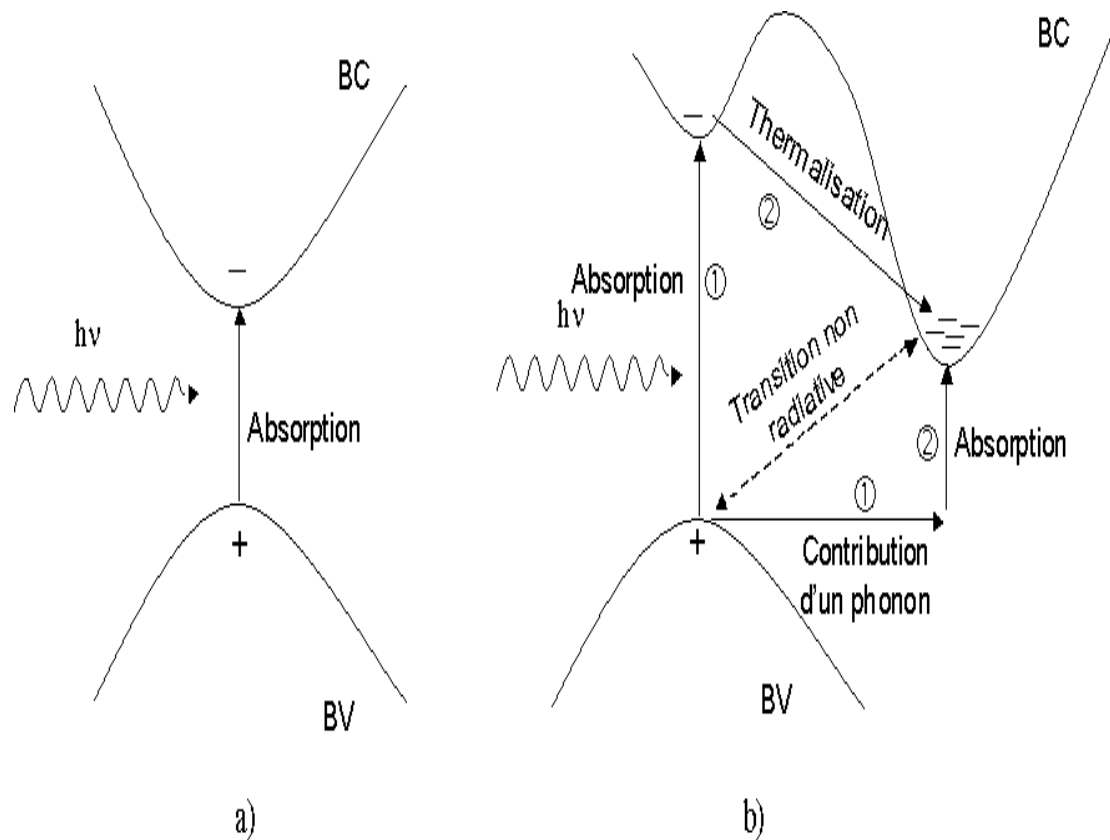


Figure II.29 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect.

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur 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-29 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.

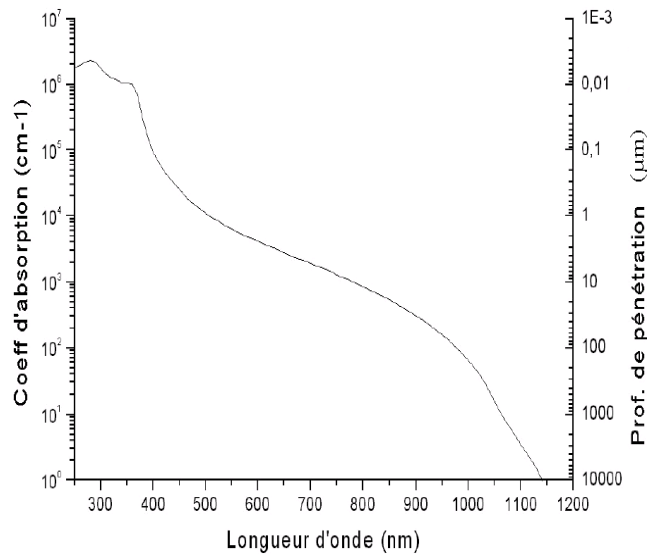


Figure II.30 : Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde.

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur 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 photo générés 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. [31]

II.10.2 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 semi-conducteur ;
- 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 semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / 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-31 :

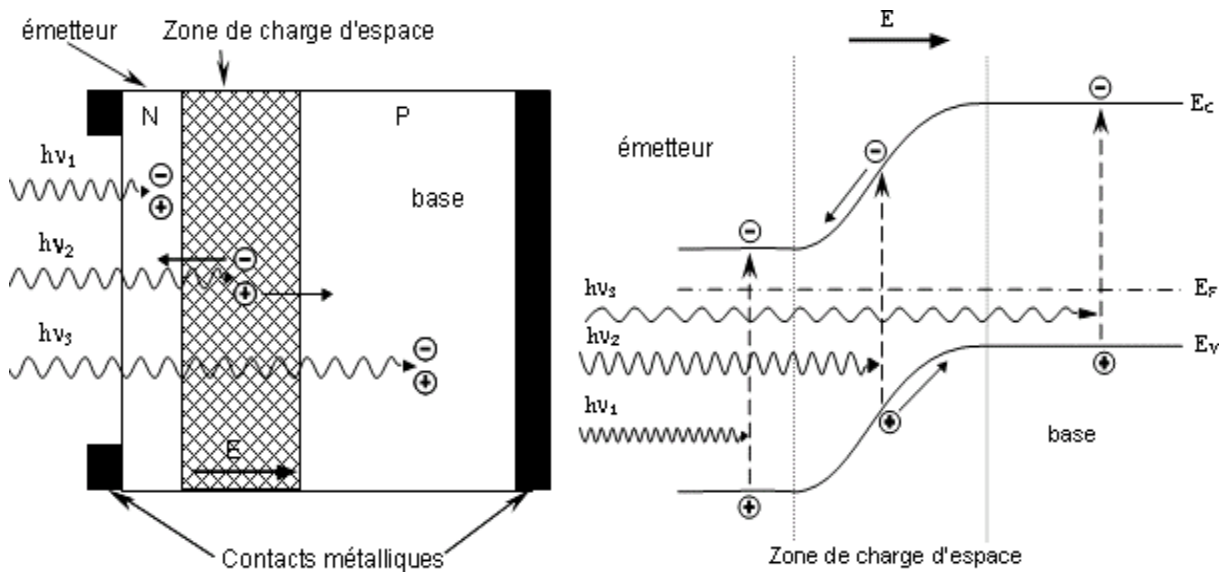


Figure II.31 : Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs 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 phot courant de diffusion ;
- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / 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 phot courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un phot courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse. [31]

II.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les étapes de fabrication du silicium, les technologies du système photovoltaïque, les différents types de dopage du silicium, une définition de la texturisations et les types de cette texturisations et ainsi l'architecture d'une cellule photovoltaïque.

Finalement nous avons expliqué de façon globale de fonctionnement des cellules photovoltaïques.

Chapitre III :

Présentation du logiciel PC1D
et Résultats des simulations

III.1 Introduction :

En principe, n'importe quel programme numérique capable de résoudre les équations de base des semi-conducteurs peut être employé pour modéliser les photopiles solaires à couches minces. Parmi ces programmes de simulation, le PC1D a une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque, il a été développé à l'université « New South Wales de Sydney » en Australie ; il est l'un des pionniers dans ces domaines. Son utilisation est très pratique, il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...). Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

III.2 Le PC1D :

Le PC1D a été développé en 1985 (première version) et 1988 deuxièmes versions, ADEPTF et AMPS. Les équations de base sont l'équation de Poisson, reliant la charge au potentiel électrostatique, et les équations de continuité pour les électrons et les trous. Cependant, plusieurs options additionnelles doivent être réunies dans le programme quand on veut simuler des photopiles solaires à couches minces. Il devrait être capable de prendre en compte la présence de plusieurs couches dans la cellule ; le phénomène de recombinaison à l'interface des couches, introduit par les discontinuités dans les bandes d'énergie (E_c et E_v). Il devrait aussi, traiter correctement le problème de recombinaison et les centres de génération-recombinaisons dans les états profonds dans le volume des couches. Il devrait être aussi capable de calculer et simuler des mesures électro-optiques effectuées généralement sur les piles solaires à couches minces, non seulement la caractéristique $I(V)$, mais également la réponse spectrale et les mesures de capacité $C(V)$ et $C(f)$. En fin, il devrait fournir la convergence au moins pour les structures les plus communes des cellules à couches minces. [10]

III.2.1 Aperçu du logiciel :

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure III.1

Pour visualiser les résultats de la simulation, il faut d'abord introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation, et ensuite exécuter le programme de la simulation, ce qui permet de visualiser les résultats sous forme de données ou de graphes.

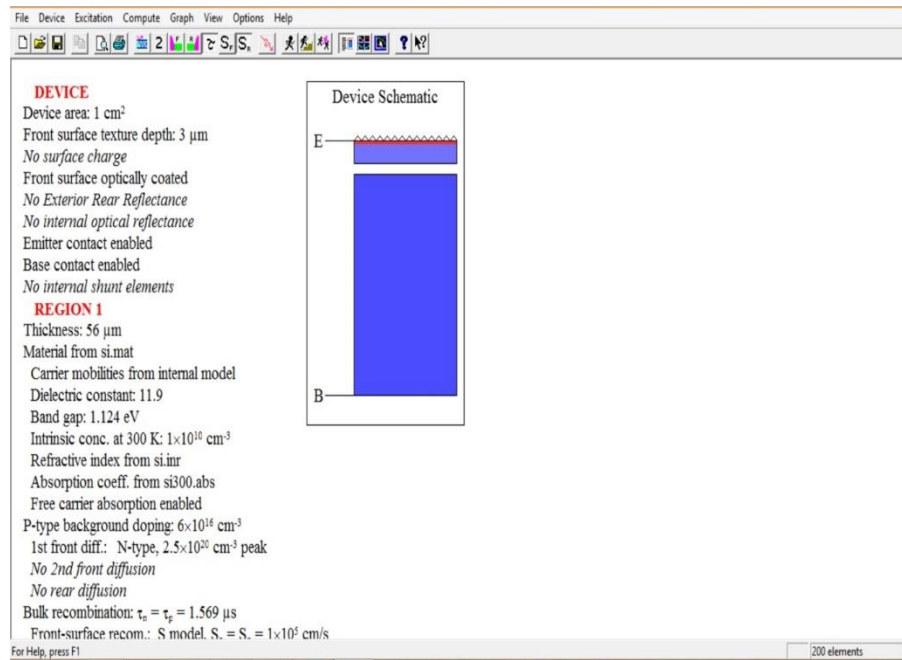


Figure III.1. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

III.3 Les paramètres du dispositif (Device) :

- Aire du dispositif (Device) : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur la photo courant d'une manière appréciable. On peut choisir par exemple une surface de 1 cm² .
- Surface texturée : les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur (depth) 3 μm et d'angle facial 54,74°. La texturisation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident. On peut texturer seulement la face avant, si 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.
- Les couches antireflets, elles sont généralement de la silice (SiO₂), elle peut être remplacée par d'autres matériaux qui sont transparent au spectre solaire et qui sont donnée dans le logiciel sous forme de fichiers.
- Réflectance optique interne : elle est négligée dans notre simulation, nous considérons que les surfaces qui sont spéculaires et non diffuses.
- Par défaut, l'émetteur et la base sont connectés au circuit, tandis que le collecteur est déconnecté.

- Quatre résistances shunt peuvent être introduites, 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. [10]

III.4 Les paramètre des régions :

- L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium elle varie sur un intervalle compris entre 0,1 μm et 2,5 μm .
- Le matériau utilisé : les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat), ils sont fourni avec le logiciel dans une diskette.
- Type et concentration de dopage : de type n ou p, la concentration maximale est de 10^{19}cm^{-3} Ce logiciel présente quatre profil de dopages : le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erfc.
- Les recombinaisons en volume : le modèle utilisé est basé sur la statistique de Read Shockley-Hall décrivant les recombinaisons par pièges, situées dans la bande de valence.
- Les recombinaisons face avant et arrière.

III.5 Les Paramètres d'excitation :

- Deux fichiers intégrés dans le logiciel permettent de simuler la caractéristique courant tension et autre caractéristiques en utilisant le fichier « One-Sun.exc », ou la réponse spectrale en utilisant le fichier « Scan-ge.exc ». Deux fichiers intégrés dans le logiciel permettent de simuler la caractéristique courant tension et autre caractéristiques en utilisant le fichier « One-Sun.exc », ou la réponse spectrale en utilisant le fichier « Scan-ge.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 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 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 peut être désactivée, dans le cas où la face arrière n'est pas éclairée.

III.6 Visualisation des résultats :

Les résultats que nous pouvons visualiser en utilisant le fichier d'excitation « One-Sun.exc » du PC1D sont :

- ❖ La valeur de courant de court-circuit.
- ❖ La valeur de tension à circuit ouvert.
- ❖ La valeur de puissance maximale
- ❖ Rendement.

III.7 Le fonctionnement du PC1D :

Après l'introduction de toutes les données nécessaires au matériau étudié, ainsi que la configuration de la cellule solaire, le simulateur permet d'obtenir des résultats. Le fonctionnement du PC1D nécessite plusieurs critères à respecter :

1. Le choix des gammes de valeurs des différents paramètres n'est pas aléatoire, elles doivent être réalisables par la technologie.
2. Pour des considérations numériques, les valeurs à introduire, doivent être comprises dans des intervalles bien déterminés.
3. Pour une convergence rapide, il est indispensable de minimiser au maximum la taille des éléments finis, et choisir un nombre adéquat des itérations.
4. Le bon choix des paramètres numériques.
5. Une initialisation convenable des différents paramètres de la simulation.

Ces critères sont nécessaires dans chaque simulation, mais ils ne sont pas suffisants.

Plusieurs fichiers externes sont aussi obligatoires pour exécuter le programme, nous citons, à titre d'exemple, la sélection des fichiers caractérisant chaque matériau, tels que celui du coefficient d'absorption (*.abs), et celui de l'indice de réfraction (*.inr).

Le choix des fichiers d'excitation (*.exc) sont aussi nécessaires avant l'exécution, ces fichiers spécifient l'étude à faire, soit en obscurité (dark-iv-exc), ou bien sous illumination, dans le dernier cas on trouve deux fichiers (one-sun.exc, scan-qe.exc).

La sélection du fichier (one-sun.sxc) permet le calcul des caractéristiques (I-V, P-V) on obtient également le rendement η et le facteur de forme FF. Le fichier (scanqe. exc) permet le calcul de la réponse spectrale.

Ils existent plusieurs spectres solaires standards, chacun d'eux spécifie l'endroit de l'étude, par exemple, dans les études spatiales on choisit le spectre AM0, l'air masse AM1.5 pour les applications terrestres. [10]

Le PC1D utilise trois spectres différents (am0.spc, am1.5g.spc, am1.5.spc).

III.8 Simulation d'une cellule solaire à base de Silicium :

- **Cellule solaire de type n+ / p avec et sans texturation :** Paramètres utilisés après optimisation et résultats de simulation

DEVICE

Device area : 1 cm²

Front surface texture depth : 3 μm

No surface charge

Front Surface optically coated

No Exterior Rear Réflectance

No internal optical reflectance

Emitter contact enabled

No internal shunt éléments

REGION 1

Thickness : 56 μm

Material from : si.mat

Carrier mobilities from internal model

Dielectric constant : 11.9

Band gap : 1.124eV

Intrinsic conc. at 300 K : $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Refractive index from si.inr

Absorption coeff. from si300.abs

Free carrier absorption enabled

P-type background doping : $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

1 st front diff.: N-type, $2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peak

No 2nd front diffusion

No rear diffusion

Bulk recombination $\tau_n = \tau_p = 1.569 \text{ μs}$

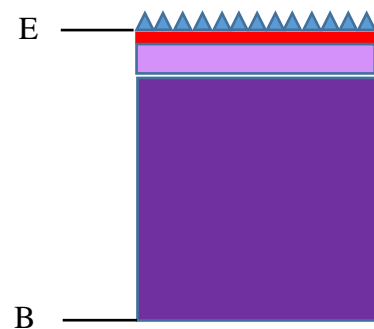


Figure III -2 Cellule solaire de type n/p avec texturation.

Front-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1 \times 10^5$ cm/s

No Rear-surface recombination

REGION 2

Thickness : 525 μm

Material from : si.mat

Carrier mobilities from internal model

Dielectric constant : 11.9

Band gap : 1.124eV

Intrinsic conc. at 300 K : 1×10^{16} cm^{-3}

Refractive index from si.inr

Absorption coeff. from si300.abs

Free carrier absorption enabled

P-type background doping : 7.355×10^{18} cm^{-3}

No front diffusion

No rear diffusion

Bulk recombination : $\tau_n = \tau_p = 1.569$ μs

No Front-surface recombination

Rear-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1 \times 10^5$ cm/s

EXCITATION

Excitation from one-sun.exc

Excitation mode : Transient, 16 timesteps

Température : 25°C

Base circuit : Sweep from -0.8 to 0.8 V

Collector circuit : Zéro

Primary light source enabled

Constant intensity : 0.1 W cm^{-2}

Spectrum from aml5g.spc

Secondary light source disabled

RESULTS

Short-circuit I_b : -0.0317 amps

Max base power out : 0.162 watts

Open-circuit V_b : 0.6170 volts

III.8.1 Présentation de la cellule étudiée :

-La structure :

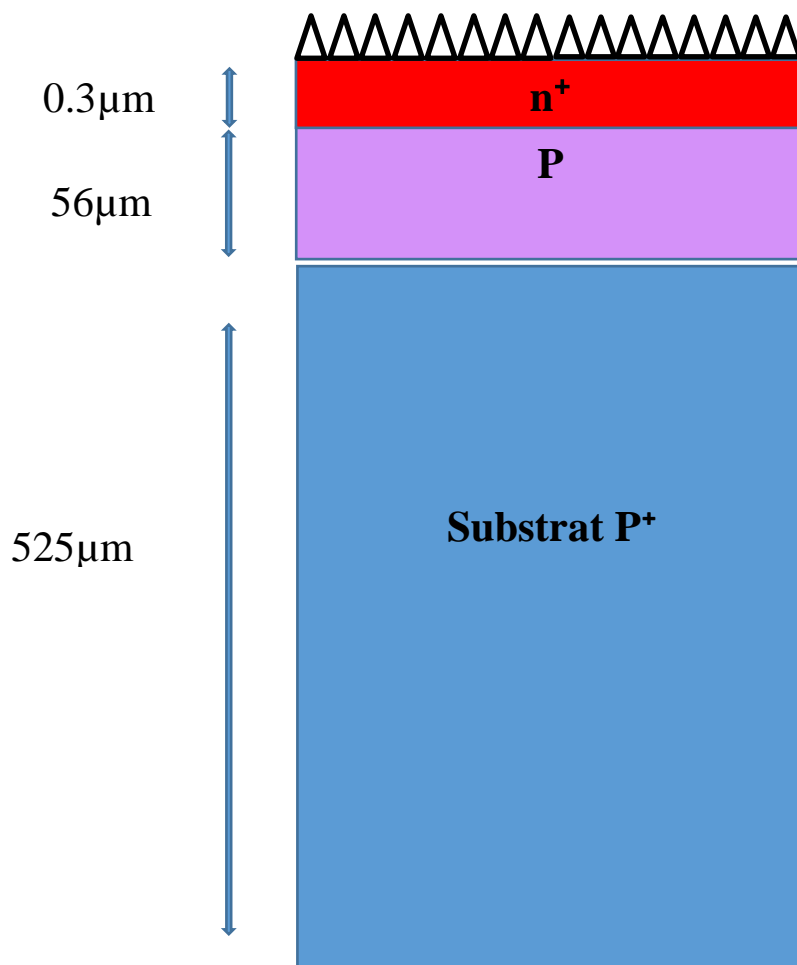


Figure III.3 : Structure de la cellule de référence simulée

III.8.2 Paramètres de la cellule à étudier :

Les paramètres de la cellule de référencé sont donnée dans les tableaux :

	Paramètre de la cellule	Les valeur
Emetteur n⁺	Dopage (cm ⁻³)	2.5*10 ²⁰
	Epaisseur (μm)	0.3
Base P	Dopage (cm ⁻³)	6*10 ¹⁶
	Epaisseur (μm)	56
	Durée de vie (μs)	1.569
Substrat P⁺	Dopage (cm ⁻³)	7.355*10 ¹⁸
	Epaisseur (μm)	525
	Durée de vie (μs)	1.569
Texturisation face avant	Angle	54.74°
	Epaisseur (μm)	3
Couche anti reflet	Indice de réfraction	2.01
	Epaisseur (μm)	75
Vitesses de recombinaison [cm/s]	face avant	1*10 ⁵
	Face arrière	1*10 ⁵

Tableau III.1 : Paramètre de la cellule de référence.

III.9 Résultat de simulation :

Dans ce travail nous allons voir l'influence de la texturisation sur le rendement de la cellule photovoltaïque ainsi que l'influence la texturisation sur les caractéristiques d'une cellule solaire à base d'un matériau semi-conducteur en couches minces

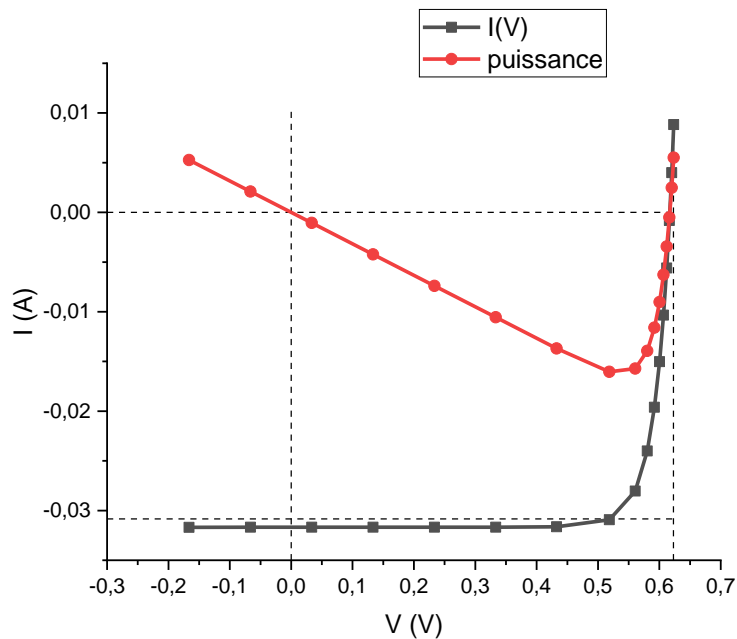


Figure III.4 : Caractéristique courant-tension et le rendement de la cellule solaire (avec texturisation)

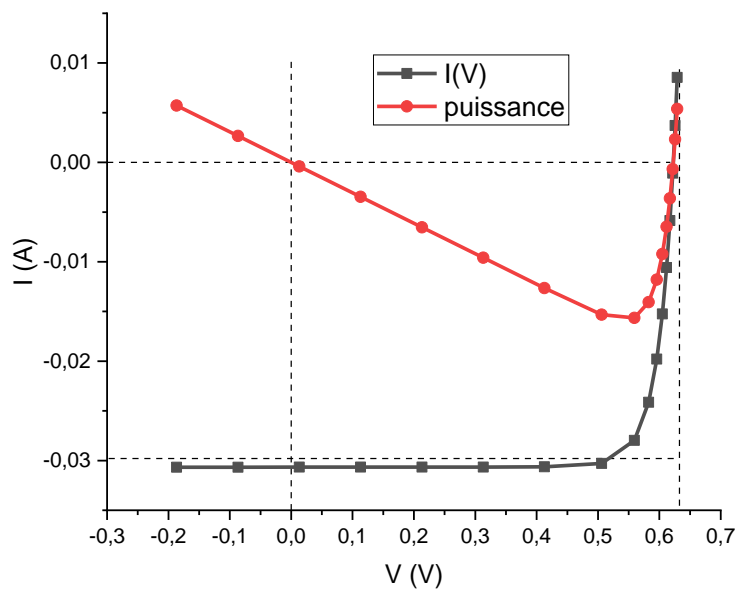


Figure III.5 : Caractéristique courant-tension et le rendement de la cellule solaire (sans texturisation)

Facteur de forme FF et rendement en puissance η_m :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée par la cellule $P = V.I$ et la puissance du rayonnement solaire incident P_0 .

On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximal $P_{\max} = V_m \cdot I_m$ et la puissance P_0 :

$$\eta_m = \frac{V_m \cdot I_m}{P_0} \quad (\text{III.1})$$

La valeur de P_0 est de 0.1W par cm^2 de surface de la cellule (P_0 est une donnée du logiciel PC1D).

Le facteur de forme FF traduit l'effet de la forme de la courbe de la caractéristique I(V) sur le rendement de la cellule, plus la courbe est proche du rectangle, plus FF est proche de 1.

FF est donné par la relation

$$\text{FF} = \frac{P_{\max}}{P_1} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{III.2})$$

Ce qui donne

$$\eta_m = \frac{V_m \cdot I_m}{P_0} = \text{FF} \cdot \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_0} \quad (\text{III.3})$$

	RESULTATS (avec texturation)	RESULTATS (sans texturation)
Courant court-circuit I_{cc}	-0.0317 amps	-0.0307 amps
Tension circuit-ouvert V_{co}	0.6170 volts	0.6227 volts
Rendement η	16.2 %	15.8 %
Le facteur de forme FF	0.828	0.826

Tableau III.2 : Résultat de la cellule étudiée avec et sans texturation

On remarque une légère amélioration de la puissance maximale pour une cellule de 1 cm^2 qui peut être plus grande si on augmente la surface. La face avant (face éclairée) est texturée en pyramides inversées, cette texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule.

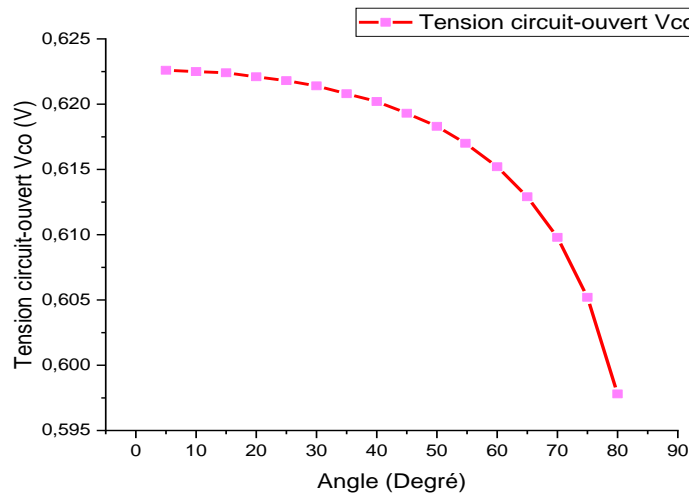


Figure III.6 : Variation de Tension V_{co} en fonction d'angle de la texturisation

Figure (III.6) représente la variation du Tension V_{co} en fonction d'angle. Nous remarquons que le Tension circuit-ouvert V_{co} à diminué Plus la valeur de texturisation est élevée

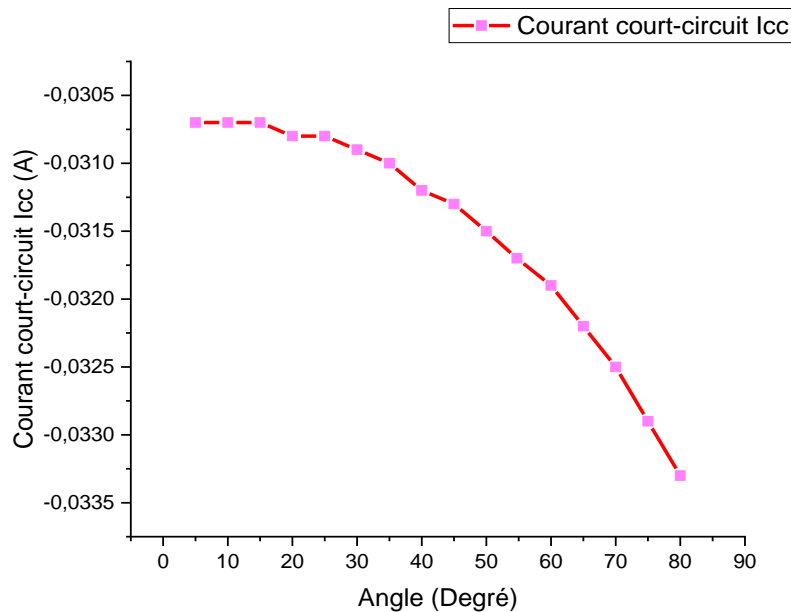


Figure III.7 : Variation de courant I_{cc} en fonction d'angle de la texturisation

La figure(III.7) représente la variance du courant par rapport au l'angle de la texturisations. On remarque que le courant diminue à mesure que l'on augmente l'angle de la texturisations.

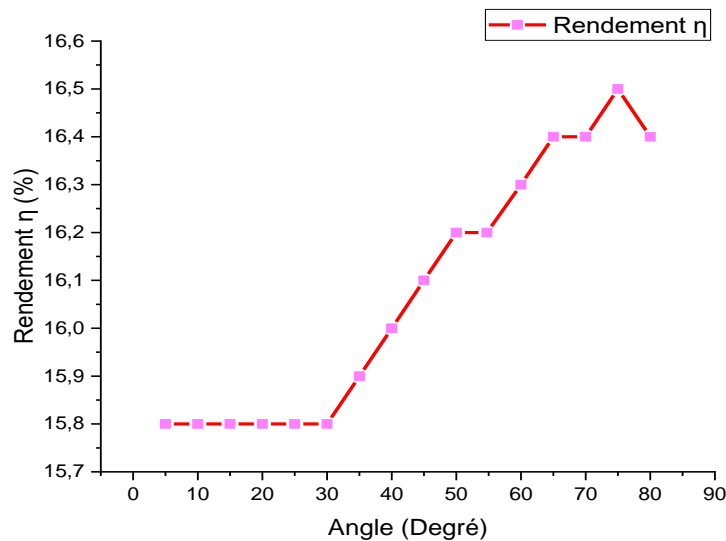


Figure III.8 : Effet de l'angle de la texturisation sur le rendement.

Cette figure montre l'évolution du rendement en fonction de la composition

Notez que plus la valeur de texturisation n'est élevée, plus la valeur du rendement n'est élevée

III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel PC1D, qui peut être considéré comme l'un des simulateurs puissants qui ont joué un rôle indéniable dans la compréhension des dispositifs photovoltaïques, afin de mieux comprendre les phénomènes physiques internes existants dans une cellule solaire. Le logiciel PC1D est capable d'offrir des informations sur le comportement de ces composants et de décrire les nombreux mécanismes qui interviennent dans une cellule solaire.

Tous les paramètres physiques et géométriques de cellule solaire au silicium ont été donnés dans ce chapitre.

Enfin, nous avons tracé la variation des principaux paramètres d'une cellule photovoltaïque (I_{cc} , V_{co} et η), en fonction de l'illumination.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Dans la filière des cellules solaires de silicium cristallin en couches minces, l'idée de base est de réaliser une couche de Silicium de très haute qualité structurale et électronique de faible épaisseur (10-50 μm) sur un substrat bas-coût qui est notamment être utilisé pour remplacer les plaquettes de silicium massif.

Plusieurs pertes viennent influencer le rendement d'une cellule photovoltaïque, parmi les, il y a les pertes par réflexion. La solution consiste à introduire une texturisation sur la face avant de la cellule solaire.

Pour parvenir à cet objectif, la simulation à l'aide du logiciel PC1D a été choisie pour démontrer l'importance et le rôle que joue la texturisation sur la face avant des cellules solaire pour améliorer leurs performances.

Nous avons simulé sous PC1D une structure de cellule solaire de type $n^+/p/p^+$, sur une surface de 1cm^2 à base du silicium cristallin en couches minces de $56\ \mu\text{m}$ déposé sur un substrat silicium d'une épaisseur de $525\ \mu\text{m}$.

Les résultats obtenus montrent que la simulation sur cette structure sans texturisation nous à donner : un rendement η de l'ordre de 15.8% et un courant de court-circuit I_{cc} qui vaut 30.7 mA et une tension de circuit ouvert V_{co} proche de 617 mV. Avec texturisation un rendement η de l'ordre de 16.2% et un courant de court-circuit I_{cc} qui vaut 31.7 mA et une tension de circuit ouvert V_{co} proche de 622.7 mV.

En conclusion, la texturisation est un paramètre essentiel pour minimiser les pertes par réflexion, piéger les rayons solaires et augmenter l'absorption au cœur de la cellule solaire et par suite obtenir des cellules à un rendement plus élevé.

Bibliographie

- [1] **Amer HAMZAOUI** «Effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium poly cristallin ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas – Sétif. (2012)
- [2] **Louardi REMACHE** « Silicium poreux passivé par des nitrures et des oxydes de silicium. Application aux revêtements antiréfléchissants. » Thèse De Doctorat. Université MENTOURI – CONSTANTINE. (2011)
- [3] **HAFIAN Hicham.** « Etude et conception d'un émulateur d'énergie solaire piloté par dSPACE1103». Mémoire de MAGISTER. Université Hadj Lakhdar Batna. (2013)
- [4] **DJAAFRI houssin** «Etude et Simulation d'un système photovoltaïque appliqué machine asynchrone ». Mémoire de Master, Université Ahmed Daria Adrar. (2018)
- [5] **YOUNSI Ahmed** «Etude de l'influence de l'illumination sur les performances d'une cellule photovoltaïque ». Mémoire de Master, Université Ibn-khaldoun– Tiaret-Annexe sougueur. (2019)
- [6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Irradiation_solaire
- [7] **HADJISSI Oum ELKHEIR** «Étude expérimentale d'un panneau solaire photovoltaïque dans la région de m'sila ». Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - m'sila. (2017)
- [8] **HELALI KAMELIA** «Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative». Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. (2012)
- [9] **Djedid Meriem** « Etude expérimentale de l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement d'une cellule PV». Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi –Oum el Bouaghi. (2019)

- [10] **BEDDA NAIMA** « Etude des propriétés physiques des semi-conducteurs : Si, GaAs et GaALAs, Simulation des cellules solaire à base de Si et GaAs». Mémoire de Magister. Université El-Hadj Lakhdar – Batna. (2011)
- [11] **LAHOUEL Asma**« Influence de la température sur les caractéristiques d'une cellule solaire à base d'InGaN ». Mémoire de Master. Université Abou Bekr belkai – Tlemcen. (2016)
- [12] **ATEK Mourad** « Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS » Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas de Sétif. (2012-2013)
- [13] **NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari** « Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque ». Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945 – Guelma. (2019)
- [14] **SALAHEDDINE BENSALÉM**« Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas – Sétif. (2011)
- [15] **BOUCHAKER Amir et Abderaouf BENBRINIS Mouad** «Structure et Commande d'une installation photovoltaïque en site isolé ». Mémoire de Master. Université Badji Mokhtar - Annaba (2018)
- [16] **Rahmani Abderrahmane et Selmani kada** «Etude des performances d'une cellule photovoltaïque à hétérojonctions ». Mémoire de Master. Université Dr. Moulay Tahar-Saida. (2016-2017)
- [17] **Melle Arras Aida** «Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si». Mémoire de Master. Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen. (2018)
- [18] **Amer HAMZAOUI** «Effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium poly cristallin ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas – Sétif. (2012)

- [19] **Mr ALLEM Hocine** «Etude de l'influence de la couche d'oxyde interfaciale sur les paramètres d'une cellule solaire à conversion photovoltaïque du type MIS. ». Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. (2009)
- [20] **Zaiem Kamar** « Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit ». Mémoire de Master. Université Badji Mokhtar –Annaba. (2019)
- [21] **ABDI Zohir** « Etude comparative par simulation numérique des cellules photovoltaïques à simple jonction à base de silicium» Mémoire De Master. Université Abou bakr Belkaïd – Tlemcen 2017
- [22] **Rouabah Amina et Zine Aldjia** « Etude et modélisation du procédé d'élaboration du silicium polycristallin pour la fabrication des cellules photovoltaïques». Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf - m'sila. (2018/2019)
- [23] **Fatoumata Bintou SANTARA** « Cristallisation du silicium photovoltaïque sous induction électromagnétique : étude d'une vanne de rétention et de la ségrégation sous brassage » Thèse De Doctorat. Université de Grenoble. (2010)
- [24] **MEKEMEICHE Abdelkader.** « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes». Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. (2017)
- [25] **NEKOUS Mohamed.** « Elaboration du silicium à partir du sable du désert Algérien ». Mémoire de magister. Université «Mohamed BOUDIAF des Sciences et de la Technologie d'Oran. (2013)
- [26] **Djedjiga LALAM** « Etude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS». Mémoire de Master. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou(2016)

- [27] **ZIADA chahira et MAHDJOUBI zeyneb** «Étude de l'apport des couches antireflets et de la texturisation aux performances des cellules solaires en silicium cristallin» Mémoire de Master. Université d'ADRAR(2016)
- [28] **Omar Ibrahim Elmi** « Nouvelles structures de cellules solaires à base de silicium : Texturation, passivation et association de réseaux de nanostructures métalliques avec une couche Down-Conversion». Thèse de Doctorat, L'université de Lille 1 Sciences et Technologies
- [29] Céline Ternon, Anne Kaminski, Delphine Constantin, Lionel Claudon, Fabien Volpi, Loïc Vincent, Quentin Rafhay, Ahmad Bsiesy «Simulation, élaboration et caractérisation de cellules photovoltaïques»
- [30] **BENGHABRIT Siham** «Elaboration et caractérisation de couches minces CdS par bain chimique CBD pour application photovoltaïque». Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran« Mohamed BOUDIAF »(2015)
- [31] **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)

Résumé :

Dans le contexte mondial de diversification de l'utilisation des ressources naturelles, l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier le solaire photovoltaïque, est en augmentation.

Dans ce travail de simulation, nous utilisons un simulateur PC1D pour étudier les performances des cellules solaires. La simulation a été choisie par le logiciel PC1D pour voir les performances de la cellule solaire par la présence et l'absence de la structure

Cette étude examine le rôle de la texturisation a joué sur les performances des cellules solaires en silicium à couches minces

Abstract :

In the global context of diversification of the use of natural resources, the use of renewable energies, in particular solar photovoltaic, is increasing.

In this simulation work, we use a PC1D simulator to study the performance of solar cells. The simulation was chosen by the PC1D software to see the performance of the solar cell by the presence and absence of the structure

This study examines the role of texturing played on the performance of thin-film silicon solar cells

ملخص

في السياق العالمي لتنويع استخدام الموارد الطبيعية، تزداد قوة استخدام الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

في هذه الدراسة، نستخدم برنامج المحاكاة PC1D لدراسة أداء الخلايا الشمسية. تم اختيار المحاكاة بواسطة برنامج PC1D لمعرفة أداء الخلية الشمسية من خلال وجود الشكل الهندسي (هرم) وغيابه

نستعرض في هذه الدراسة الدور الذي لعبه الشكل الهندسي على أداء الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة من السيليكون