



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologies

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Électrotechnique*

Spécialité : *Energies Renouvelables*

Par : **BENSAHA Zoubida**

Thème

ETUDE COMPARATIVE DE DIFFERENTES
TECHNOLOGIES DES PANNEAUX SOLAIRES
PHOTOVOLTAÏQUES A OUAD NECHOU - GHARDAIA

Soutenu publiquement le : 19/09/2017

Devant le jury :

Mr : AKERMI Fouzi	MAA	Univ. Ghardaïa	Président
Mr : FERKOUS Khaled	MAA	Univ. Ghardaïa	Examineur
Mr : BENYELLOUL Kamel	MRA	URAER	Examineur
Mr : DJELLOULI Abdelkader	MAA	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2017/2018

Résumé

L'objectif de cette mémoire est de comparer les différentes technologies utilisées dans les panneaux solaires à la station Oued Nechou, en vue d'identifier la technologie appropriée pour cette zone.

Nous avons mené une étude comparative à travers les données réelles stockées au niveau de la station Oued Nechou (SKTM)

Dans notre étude, nous nous sommes concentrés sur la comparaison des rendements des panneaux solaires pendant quatre saisons de l'année 2016 et les facteurs affectent les caractéristiques des panneaux solaires comme la température et l'éclairement.

Mots clés : panneaux solaires photovoltaïques, température, éclairage, retours, données réelles, centrale électrique Oued Nechou (SKTM).

Abstract

The aim of this memory is to compare the different technologies used in solar panels at the Oued Nechou station, with a view to identifying the appropriate technology for this area.

We carried out a comparative study using the actual data stored at the Oued Nechou station (SKTM)

In our study, we focused on comparing solar panel yields over four seasons of the year 2016 and factors affect the characteristics of solar panels such as temperature and illumination.

Key words: photovoltaic solar panels, temperature, illumination, yield, actual data, Oued Nechou power station (SKTM).

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو المقارنة بين مختلف التكنولوجيات المستخدمة في الألواح الشمسية الموجودة بمحطة واد نشو وهذا بغرض معرفة نوع التكنولوجيا المناسبة لهذه المنطقة.

قمنا بدراسة مقارنة من خلال المعطيات الحقيقية المخزنة على مستوى المحطة.

ركزنا في دراستنا على مقارنة مردودية الألواح الشمسية خلال اربعة فصول من سنة 2016 والعوامل المؤثرة على خصائص الألواح الشمسية.

الكلمات المفتاحية: الألواح الشمسية الكهروضوئية، درجة الحرارة، المردود، المعطيات الحقيقية، محطة توليد الكهرباء في وادي نشو (SKTM).

Dédicace

A mon père ;

A ma mère ;

A mes sœurs et mes frères ;

A tous mes amis ;

A toute la famille BENSABA ;

A tous ceux qui me sont chers et proches ;

Je dédie ce travail.....

Mille mercis

BENSABA Zoubida

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent mémoire.

*A Monsieur Djellouli Abdelkader Qui a accepté d'encadrer et de diriger ce travail
Pour ses conseils précieux, son aide et sa grande patience Mes vifs remerciements,
Ma sincère considération.*

*J'adresse mes remerciements à Monsieur le Président de jury et
Messieurs les membres de jury d'avoir accepté de me faire l'honneur
De juger ce travail et de participer au jury de ce mémoire.*

*Je remercie enfin toute personne ayant contribué à l'élaboration de ce
travail.*

Sommaire générale

Résumé.....	
Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Sommaire Générale.....	III
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	IX
Nomenclature.....	X
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités Sur Les Matériaux Photovoltaïques

I.1 Introduction.....	3
I.2 Le soleil.....	3
I.3 Rayonnement solaire.....	6
I.3.1 Le rayonnement direct.....	6
I.3.2 Le rayonnement diffus.....	6
I.3.3 Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol.....	6
I.3.4 Le rayonnement global.....	6
I.4 La durée d'insolation.....	7
I.5 Les semi-conducteurs.....	7
I.5.1 Définition de semi-conducteur.....	7
I.5.2 La conductivité.....	8
I.6 Différents types de semi-conducteurs.....	9
I.6.1 Semi-conducteurs intrinsèques.....	9
I.6.2 Semi-conducteurs extrinsèques.....	10
I.7 Matériaux destinés à la conversion photovoltaïque.....	12
I.7.1 Hauteur de la bande interdite.....	13
I.7.2 Différents Matériaux destinés à la conversion photovoltaïque.....	15
I.8 Conclusion.....	16

Chapitre II : Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

II.1 Introduction.....	17
II.2 Techniques d'élaboration du Silicium.....	17
II.2.1 Raffinage du silicium.....	17
II.2.2 Purification du silicium métallurgique.....	21
II.2.3 Cristallisation du silicium.....	24
II.2.4 La production de wafer.....	26

Sommaire générale

II.2.5	Les Structures de Silicium	27
II.2.6	Quelque Propriété du silicium	30
II.2.7	Les différents types de silicium	31
II.2.8	Utilisations	31
II.3	Techniques d'élaboration des couches minces :	32
II.3.1	Notion de couche mince	32
II.3.2	Techniques de dépôts de couches minces	32
II.3.3	Le silicium amorphe	34
II.3.4	Le tellure de cadmium (CdTe)	36
II.4	Fabrication des cellules et assemblage du module photovoltaïque	37
II.4.1	Fabrication des cellules	37
II.4.2	Assemblage des modules	38
II.5	Conclusion	39

Chapitre III : Généralités sur les Cellules Photovoltaïques

III.1	Introduction	40
III.2	La cellule et l'effet photovoltaïque	40
III.2.1	Structure de La cellule PV	40
III.2.2	L'effet photovoltaïque	41
III.2.3	Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	42
III.3	Différentes caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque	43
III.3.1	Caractéristique courant-tension	43
III.3.2	Paramètres externes d'une cellule solaire photovoltaïque	44
III.3.3	Influence des résistances série et shunt	46
III.3.4	Influence de l'éclairement	47
III.3.5	Influence de la température	48
III.4	Générateur photovoltaïque (GPV)	48
III.4.1	La constitution d'un module photovoltaïque	48
III.4.2	Regroupement des cellules	49
III.4.3	Les panneaux photovoltaïques	51
III.5	Technologies des cellules photovoltaïques	52
III.6	Avantages et inconvénients d'une installation PV	52
III.6.1	Avantage	52
III.6.2	Inconvénients	53
III.7	Conclusion	54

Sommaire générale

Chapitre IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

<i>IV.1 Introduction</i>	55
<i>IV.2 Présentation de la centrale</i>	55
<i>IV.2.1 Coordonnées géographiques de Wilaya de Ghardaïa</i>	55
<i>IV.2.2 Localisation du site</i>	55
<i>IV.2.3 Le choix de localité</i>	55
<i>IV.2.4 Objectif</i>	56
<i>IV.2.5 Principe de fonctionnement de la centrale</i>	56
<i>IV.2.6 Schéma unifilaire</i>	61
<i>IV.2.7 Rendement Photovoltaïque</i>	62
<i>IV.2.8 Caractéristiques électriques des différentes technologies des Panneaux</i>	62
<i>IV.2.9 Onduleur photovoltaïque</i>	63
<i>IV.3 Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques</i>	64
<i>IV.4 Etude comparative expérimentale</i>	64
<i>IV.4.1 Données climatiques couvrant l'année de comparaison</i>	65
<i>IV.4.2 Comparaison mensuelle des rendements entre les différentes technologies</i>	66
<i>IV.4.3 Comparaison annuelle des rendements entre les différentes technologies</i>	74
<i>IV.4.4 Comparaison journalière des rendements entre les différentes technologies</i>	75
<i>IV.5 Conclusion</i>	79
<i>Conclusion Générale</i>	80
<i>Références Bibliographiques</i>	81
<i>Annexe</i>	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 :	<i>Vue en écorchée de solaire</i>	4
Figure I.2 :	<i>spectre solaire</i>	5
Figure I.3 :	<i>différents composants de rayonnement</i>	6
Figure I.4 :	<i>Tableau périodique des éléments de Mendeleïev</i>	7
Figure I.5 :	<i>le bilan électronique pour un semi-conducteur intrinsèque</i>	9
Figure I.6 :	<i>Les semi-conducteurs extrinsèques type N</i>	10
Figure I.7 :	<i>Les semi-conducteurs extrinsèques type P</i>	11
Figure I.8 :	<i>le bilan électronique pour un semi-conducteur extrinsèque</i>	11
Figure I.9 :	<i>Jonction PN</i>	12
Figure I.10 :	<i>Niveaux d'énergie au voisinage de la jonction</i>	12
Figure I.11 :	<i>Bande interdite en fonction du paramètre de maille cubique pour différents semi-conducteurs</i>	13
Figure I.12 :	<i>Diagrammes de bandes d'énergie d'un isolant, un semi-conducteur et un conducteur</i>	13
Figure I.13 :	<i>Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2013</i>	14

Chapitre II

Figure II.1 :	<i>Silicium métallurgique</i>	17
Figure II.2 :	<i>Production de la cellule solaire</i>	18
Figure II.3 :	<i>Matière première de la silice</i>	19
Figure II.4 :	<i>Four-à arc</i>	20
Figure II.5 :	<i>Four de production de silicium métallurgique</i>	20
Figure II.6 :	<i>Silicium métallurgique en fusion</i>	21
Figure II.7 :	<i>Cycle de distillation du composé de silicium chloré</i>	23
Figure II.8 :	<i>Schéma d'un réacteur CVD pour la production de silicium de qualité électronique à partir de SiHCl₃</i>	23
Figure II.9 :	<i>Procédé Elkem</i>	24
Figure II.10 :	<i>La méthode de cristallisation</i>	24
Figure II.11 :	<i>Principe du procédé Czochralski</i>	25
Figure II.12 :	<i>a) Image d'un lingot pendant la fusion de zone, b) schéma de principe de la fusion de zone</i>	26
Figure II.13 :	<i>Technique de découpe des wafers : « slurry-based » et « fixed abrasives »</i>	27
Figure II.14 :	<i>Structure électronique d'un atome de silicium</i>	28
Figure II.15 :	<i>Microphotographie du réseau cristallin du plan (111) par M.E.T</i>	28
Figure II.16 :	<i>Maille élémentaire de type diamant du silicium</i>	29
Figure II.17 :	<i>Structure de bande d'énergie du Silicium</i>	29
Figure II.18 :	<i>Différentes techniques de dépôt des couches mince</i>	34
Figure II.19 :	<i>(a) Structure cristalline du silicium, (b) Structure amorphe du silicium</i>	35

Liste des figures

Figure II.20 :	Schéma de dépôt PECVD dans une boîte à plasma d'un module à l'a-Si H	36
Figure II.21 :	Cubique, de groupe d'espace $3m$, la structure du CdTe	37
Figure II.22 :	Enchaînement des étapes de fabrication d'un système Photovoltaïque au silicium cristallin	38
<u>Chapitre III</u>		
Figure III.1 :	Structure Basique d'une cellule solaire	41
Figure III.2 :	Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements	42
Figure III.3 :	Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque	
Figure III.4 :	caractéristique et Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque	43
Figure III.5 :	Schéma d'une cellule élémentaire	46
Figure III.6 :	Influences des résistances séries et shunts	47
Figure III.7 :	Influence de l'éclairément	48
Figure III.8 :	Influences de la température	48
Figure III.9 :	Caractéristique courant tension de N_s cellule en série	50
Figure III.10 :	Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle	50
Figure III.11 :	Caractéristique résultante d'un groupement hybride de ($N_p + N_s$) cellules identiques	51
Figure III.12 :	Sous station formée d'un groupement de N_m modules séries et de N_{bp} branches parallèles	52
<u>Chapitre IV</u>		
Figure IV.1 :	Localisation de la centrale à la route nationale	56
Figure IV.2 :	Sous champs (1) : Technologie monocristallin sur structure motorisée	57
Figure IV.3 :	Sous champs (2) : Technologie Polycristallin sur structure motorisée	57
Figure IV.4 :	Sous champs (3) : Technologie Couche mince CdTe sur structure fixe	58
Figure IV.5 :	Sous champs (4) : Technologie couche mince a-Si sur structure fixe	58
Figure IV.6 :	Sous champs (5) : Technologie Monocristallin sur structure fixe	59
Figure IV.7 :	Sous champs (6) : Technologie Polycristallin sur structure fixe	59
Figure IV.8 :	Sous champs (7) : Technologie Monocristallin sur structure fixe	60
Figure IV.9 :	Sous champs (8) : Technologie Polycristallin sur structure fixe	60
Figure IV.10 :	Schéma unifilaire de la centrale d'oued nechou	61
Figure IV.11 :	Schéma de principe de la centrale photovoltaïque d'oued nechou Ghardaïa	61
Figure IV.12 :	l'onduleur solaire	63
Figure IV.13 :	Variation mensuelle de la température ambiante	65
Figure IV.14 :	Variation mensuelle du rayonnement solaire	65
Figure IV.15 :	Variation mensuelle du rayonnement solaire durant la période hivernale	66
Figure IV.16 :	Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au décembre 2015	66

Liste des figures

Figure IV.17 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au janvier 2016</i>	67
Figure IV.18 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au février 2016</i>	67
Figure IV.19 :	<i>Variation mensuelle du rayonnement solaire durant la période. Vernale</i>	68
Figure IV.20 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au mars 2016</i>	68
Figure IV.21 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques d'avril 2016</i>	69
Figure IV.22 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au mai 2016</i>	69
Figure IV.23 :	<i>Variation mensuelle du rayonnement solaire durant la période Estivale</i>	70
Figure IV.24 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au juin 2016</i>	70
Figure IV.25 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au juillet 2016</i>	71
Figure IV.26 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques d'aout 2016</i>	71
Figure IV.27 :	<i>Variation mensuelle du rayonnement solaire durant la période d'automnal</i>	72
Figure IV.28 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au septembre 2016</i>	72
Figure IV.29 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques d'octobre 2016</i>	73
Figure IV.30 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au novembre 2016</i>	73
Figure IV.31 :	<i>Evolution temporelle du rendement des différentes technologies des panneaux PV implantée par SKTM à oued nechou Ghardaïa</i>	74
Figure IV.32 :	<i>Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante du jour 16 décembre 2015</i>	75
Figure IV.33 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux solaires au jour 18 décembre 2015</i>	75
Figure IV.34 :	<i>Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante du jour 16 mars 2016</i>	76
Figure IV.35 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux solaires au 16 mars 2016</i>	76
Figure IV.36 :	<i>Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante du jour 18 Aout 2016</i>	77
Figure IV.37 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux solaires au jour 18 Aout 2016</i>	77
Figure IV.38 :	<i>Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante du jour 29 octobre 2016</i>	78
Figure IV.39 :	<i>Evolution temporelle du rendement des panneaux solaires au jour 29 octobre 2016</i>	78

Liste des tableaux

Chapitre I

<i>Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil</i>	<i>3</i>
<i>Tableau I.2 : Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température</i>	<i>14</i>

Chapitre II

<i>Tableau II.1 : Teneur en impuretés des matières premières</i>	<i>21</i>
<i>Tableau II.2 : Propriétés Physiques et Atomiques du Silicium</i>	<i>30</i>
<i>Tableau II.3 : Différents milieux de dépôt de couches minces</i>	<i>33</i>

Chapitre IV

<i>Tableau IV.1 : Répartition de la puissance de la Centrale par Sous-Champ</i>	<i>56</i>
<i>Tableau IV.2 : Les différentes technologies des Panneaux</i>	<i>62</i>
<i>Tableau IV.3 : Tableau comparatif des cellules photovoltaïques</i>	<i>64</i>

Nomenclature

Indice

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
<i>AM</i>	<i>Air Mass</i>	
<i>c</i>	<i>vitesse de propagation de la lumière dans le vide</i>	<i>m. s-1</i>
<i>D</i>	<i>coefficient de diffusion du matériau</i>	<i>m².s-1</i>
<i>E</i>	<i>énergie du photon,</i>	<i>eV</i>
<i>FF</i>	<i>facteur de forme de la cellule</i>	<i>%</i>
<i>G</i>	<i>taux de génération optique</i>	<i>m⁻³. s-</i>
<i>h</i>	<i>constante de Planck</i>	<i>eV</i>
<i>I₀</i>	<i>courant de saturation en inverse de la diode</i>	<i>A</i>
<i>I_{cc}</i>	<i>courant de court-circuit de la diode</i>	<i>A</i>
<i>ID</i>	<i>intensité reçue à la surface en</i>	<i>W. m⁻²</i>
<i>I_m</i>	<i>courant maximum</i>	<i>A</i>
<i>I_{obs}</i> ,	<i>courant d'obscurité</i>	<i>A</i>
<i>I_{ph}</i>	<i>photocourant</i>	<i>A</i>
<i>K</i>	<i>constante de Boltzmann</i>	<i>J. K-1</i>
<i>k</i>	<i>coefficient d'extinction</i>	<i>%</i>
<i>LD</i>	<i>longueur de diffusion</i>	<i>m</i>
<i>N</i>	<i>indice optique complexe</i>	<i>sans</i>
<i>n</i>	<i>facteur d'idéalité de la diode</i>	<i>sans</i>
<i>n</i>	<i>indice de réfraction</i>	<i>%</i>
<i>P_{inc}</i>	<i>puissance incidente</i>	<i>W .m-2</i>
<i>q</i>	<i>charge élémentaire</i>	<i>C</i>
<i>R</i>	<i>coefficient de réflexion</i>	<i>%</i>
<i>R</i>	<i>résistance parallèle</i>	
<i>R_s</i>	<i>résistance série</i>	
<i>S</i>	<i>surface de la cellule</i>	<i>m²</i>
<i>SR</i>	<i>réponse spectrale</i>	<i>sans</i>
<i>Sp</i>	<i>Surface spécifique</i>	<i>m²/m³</i>
<i>T</i>	<i>température</i>	<i>K</i>

Nomenclature

<i>T</i>	<i>coefficient de transmission</i>	<i>%</i>
<i>V</i>	<i>tension aux bornes de la jonction</i>	<i>Volt</i>
<i>V_m</i>	<i>tension maximum</i>	<i>A</i>
<i>V_{oc}</i>	<i>tension de circuit ouvert</i>	<i>Volt</i>
<i>Si</i>	<i>Silicium</i>	
<i>Ge</i>	<i>Germanium</i>	
<i>SC</i>	<i>Semi-conducteur</i>	
<i>Cdte</i>	<i>Tellure de cadmium</i>	
<i>a-Si</i>	<i>Amorphe</i>	
<i>GaAs</i>	<i>Arséniure de Gallium</i>	
<i>E_g</i>	<i>Energie de gap</i>	<i>eV</i>
<i>BV</i>	<i>La bande de valence</i>	
<i>BC</i>	<i>La bande de conduction</i>	
<i>GPV</i>	<i>Générateur photovoltaïque</i>	
<i>STC</i>	<i>Standard test condition</i>	
<i>Lettre grec</i>		
<i>σ</i>	<i>Conductivité électrique</i>	<i>S/cm</i>
<i>η</i>	<i>Le rendement d'une cellule PV</i>	<i>%</i>

*Introduction
générale*

Introduction générale

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés. [1]

Selon la majorité des prévisionnistes, la consommation primaire commerciale devrait doubler d'ici 2030, puis tripler aux environs de 2050. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables. De plus, ce type de production d'électricité est principalement responsable de la production de CO₂ rejet dans l'atmosphère engendrant le phénomène de l'effet de serre qui confronte la planète aux phénomènes de réchauffement climatique. [2]

Le rayonnement solaire constitue une ressource énergétique non polluante, la mieux partagée sur la terre et la plus abondante : La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque. [3]

Les panneaux solaires photovoltaïques sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. Chaque cellule convertit les rayons provenant du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Il existe plusieurs types de cellules qui se différencient par les matériaux utilisés pour les construire. Actuellement sur le marché, les quatre technologies majoritairement présentes et reconnues sont le monocristallin, le polycristallin, l'amorphe et CdTe. Parfois l'appréciation et le choix d'un type de panneaux pour un système photovoltaïque spécifique est difficile.

La production de l'électricité à partir de l'énergie solaire est devenue très importante ce qui conduit à développer les cellules photovoltaïques et améliorer leurs rendements. Le silicium est le matériau le plus largement utilisé pour la conversion photovoltaïque. [4]

Le but de notre travail est de faire une étude comparative entre les quatre technologies dans la centrale de l'Oued Nechou Ghardaïa (SKTM).

Nous avons cité quelques techniques de l'élaboration de matériaux semi-conducteurs, le silicium, les couches minces et les différents types des panneaux solaires utilisés (le monocristallin, le polycristallin, l'amorphe et CdTe), puis comparer le rendement de chaque technologie a fin de distinguer le mieux adapté aux conditions météorologiques de l'environnement du Ghardaïa.

Introduction générale

Le présent travail comporte quatre chapitres :

➤ Le premier chapitre donne des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques, L'énergie photovoltaïque ainsi que les semi-conducteurs et une étude sur le dopage et les caractéristiques de la jonction PN.

➤ Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les techniques d'élaboration le silicium Couche mince amorphe et CdTe.

➤ Dans le troisième chapitre présente la définition et le principe de fonctionnement de la Cellule photovoltaïque, son rendement, les différents types de cellules disponibles, la modélisation mathématique de la cellule, l'effet des variations climatiques, différents groupements possibles des cellules et des panneaux.

➤ Le quatrième chapitre est dédié à l'étude comparative des performances des quatre types de cellules photovoltaïques installées à Oued Nechou. La comparaison est effectuée par analyse expérimentale du système photovoltaïque pour définir le type de panneau photovoltaïque le mieux adapté à la région du Ghardaïa.

➤ Une introduction générale et une conclusion se rapportant au travail, complètent ce Mémoire.

*Chapitre I : Généralités Sur Les
Matériaux Photovoltaïques*

Sommaire

<i>I.1 Introduction</i>	3
<i>I.2 Le soleil</i>	3
<i>I.3 Rayonnement solaire</i>	6
<i>I.3.1 Le rayonnement direct</i>	6
<i>I.3.2 Le rayonnement diffus</i>	6
<i>I.3.3 Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol</i>	6
<i>I.3.4 Le rayonnement global</i>	6
<i>I.4 La durée d'insolation</i>	7
<i>I.5 Les semi-conducteurs</i>	7
<i>I.5.1 Définition de semi-conducteur</i>	7
<i>I.5.2 La conductivité</i>	8
<i>I.6 Différents types de semi-conducteurs</i>	9
<i>I.6.1 Semi-conducteurs intrinsèques</i>	9
<i>I.6.2 Semi-conducteurs extrinsèques</i>	10
<i>I.7 Matériaux destinés à la conversion photovoltaïque</i>	12
<i>I.7.1 Hauteur de la bande interdite</i>	13
<i>I.7.2 Différents Matériaux destinés à la conversion photovoltaïque</i>	15
<i>I.8 Conclusion</i>	16

I.1 Introduction :

L'énergie solaire est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers). Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergies : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique [5].

Cette évolution constante a été rendue possible grâce aux recherches fondamentales menées dans le domaine des matériaux photovoltaïques, mais aussi par l'amélioration progressive des dispositifs de gestion de cette énergie menée en parallèle. En effet, l'électricité photovoltaïque est une source d'énergie intermittente, à caractère non-linéaire et dépendante de nombreux paramètres comme l'irradiance et la température. Il a donc fallu adapter cette source d'énergie à notre mode de consommation, soit en stockant la production solaire dans des batteries ou dans tout autre moyen de stockage en cours de développement, soit en la renvoyant sur le réseau électrique public [6].

Ces dernières années, les matériaux semi-conducteurs ont reçu beaucoup d'attention à cause de leur efficacité dans diverses applications intéressantes, surtout en optoélectronique. Chaque matériau possède ses propres propriétés permettant de le caractériser. La connaissance des propriétés physiques et du comportement de ces matériaux est évidemment essentielle pour l'évaluation de leur domaine d'application. [6]

I.2 Le soleil :

Le Soleil est une étoile, c'est-à-dire un astre qui produit sa propre énergie. Cette étoile est particulièrement importante car elle fournit l'essentiel de l'énergie que les planètes du système solaire reçoivent. Néanmoins, elle reste relativement banale comparée à l'ensemble des autres étoiles. Il s'agit d'une étoile de classe G (figure 1.1), située sur la séquence principale, donc dans la phase principale de sa vie, Malgré son rayon de 7×10^5 km et sa masse de 2×10^{26} tonnes, le soleil est d'une taille modeste (Bételgeuse dans la constellation d'Orion a un rayon qui lui est 1100 fois supérieur). [7]

Le tableau suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil :

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil [7].

caractéristique	Valeur
Age	$4,5 \times 10^9$ ans
Durée de vie estimée	10^{10} ans
Distance à la Terre	150×10^6 km
Masse	$1,989 \times 10^{30}$ Kg
Diamètre	$1,392 \times 10^9$ m
Masse volumique moyenne	14^{10} Kg m ⁻³
Puissance rayonnée	$3,83 \times 10^{26}$ W
Température superficielle	5770 °K
Energie reçue par la Terre	1353 W.m ⁻²
Température au centre	15×10^6 °K
Champ magnétique global	1 à 2 Gauss

On distingue trois zones internes ; le noyau, La zone radiative, la zone de convection :

❖ **Le noyau** : Le noyau est la région la plus centrale du Soleil. C'est de là que provient toute l'énergie solaire, traversant toutes les couches jusqu'à la surface, puis l'espace interplanétaire. Le noyau est une zone particulièrement importante puisqu'il est le siège des réactions thermonucléaires donnant lieu à l'énergie dégagée par le Soleil sous forme de rayonnement [7].

❖ **La zone radiative** : La zone radiative entoure le noyau de 0,3 à 0,8 rayon solaire. Comme son nom l'indique, l'énergie émise par le noyau est transférée vers la surface sous forme de radiations électromagnétiques, c'est à dire sous forme de photons. Ces photons rentrent en collision avec les particules (atomes ionisés) du milieu. Ces collisions successives ont deux effets :

- ✓ Ralentir la sortie des photons (au lieu de 2,5 secondes, les photons mettent plus d'un million d'années pour atteindre la surface du Soleil),
- ✓ Changer l'énergie des photons (ils perdent peu à peu de l'énergie) [7]

❖ **La zone convective** : La zone de convection est la dernière couche de ce que l'on appelle l'intérieur du Soleil. La température décroît suffisamment (de 2×10^6 à 6×10^3 Kelvin) pour que des atomes se forment. La densité aussi décroît considérablement. L'énergie n'est plus transportée par rayonnement mais par convection vers la surface : le rayonnement chauffe la matière qui monte, se refroidit à proximité de la surface et se renforce alors. Cette convection est visible au niveau de la photosphère sous la forme de granulation. [7]

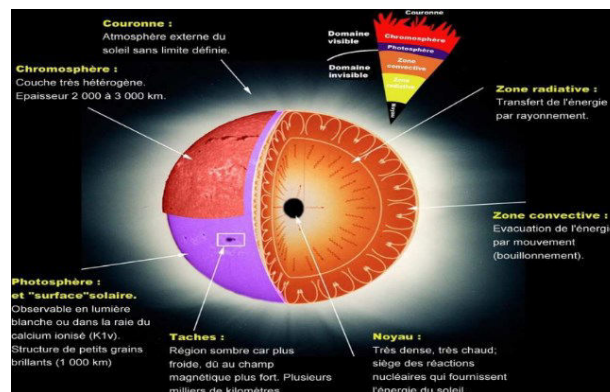


Figure I.1 : Vue en écorchée de soleil. [7]

On distingue aussi les couches externes du soleil qui constituent l'atmosphère ; La photosphère, La chromosphère, La couronne :

❖ **La photosphère** : La photosphère est la première couche de l'atmosphère solaire. C'est la partie "visible à l'œil nu" du Soleil. C'est une zone d'environ 500 km d'épaisseur où la température décroît avec l'altitude de 5800K à 4200K. 99% de la lumière émise par le Soleil provient de la photosphère. [3]

❖ **La chromosphère** : La chromosphère s'étend de 500 à 2000 km d'altitude. Visible comme un fin liseré rougeâtre autour du Soleil lors des éclipses totales de Soleil, la chromosphère peut être observée au-dessus du disque solaire grâce à des filtres spéciaux qui coupent l'intense lumière de la photosphère.

❖ **La zone de transition** : C'est dans cette région que commencent à être visibles les trous coronaux. Il s'agit de régions, parfois de très grande taille (avoisinant 50% de la surface solaire pour les plus grands), où les lignes de champ magnétique, au lieu de se refermer sur le Soleil, s'ouvrent vers l'espace, favorisant l'émission rapide de particules dans le milieu interplanétaire. La densité et la température y étant plus faibles, ces régions paraissent sombres. [7]

❖ **La couronne** : La couronne est le nom que l'on donne à l'ensemble de l'atmosphère extérieure du Soleil qui s'étend jusque dans le milieu interplanétaire. Du fait de sa très faible densité, la couronne solaire n'est observable en longueur d'onde visible qu'au cours d'une éclipse naturelle (le disque solaire est caché par la lune) ou artificielle (le disque solaire est caché par un masque mis devant un télescope). [7]

❖ Notre Soleil est donc une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. Il ne faut pas oublier non plus que les étoiles sont les usines qui créent tous les matériaux existant dans l'univers, à partir de l'hydrogène. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés, tel OH (radical hydroxyle), CH (radical méthylique) et aussi du titane, du plomb, du mercure, du chlore, du silicium, cuivre, calcium, indium, antimoine, zirconium, rhodium, etc... On trouve, par exemple, 9 atomes d'or pour 1000 milliards d'atomes d'hydrogène, soit la bagatelle de 10 millions de milliards de tonnes d'or (1.10^{16} tonnes). Outre les atomes, l'analyse du spectre solaire a permis de découvrir des molécules complexes (figure I.2). [8]

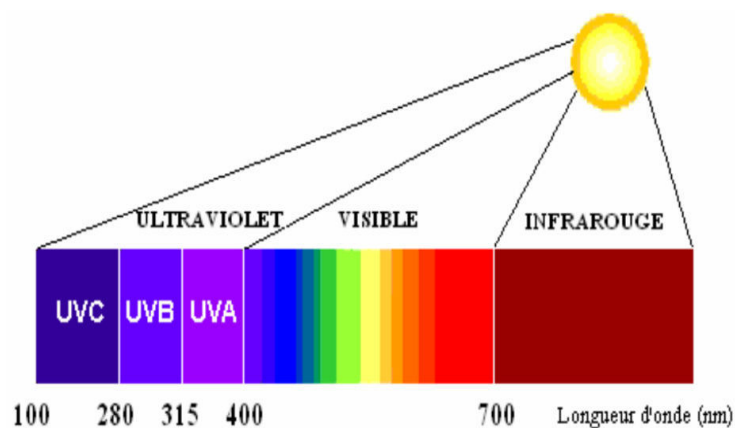


Figure I.2 : spectre solaire [8]

I.3 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et $4.10^{-6}m$.sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent.

I.3.1 Le rayonnement direct : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

I.3.2 Le rayonnement diffus : est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

I.3.3 Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol : est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

I.3.4 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 solarimètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis. [9.10]

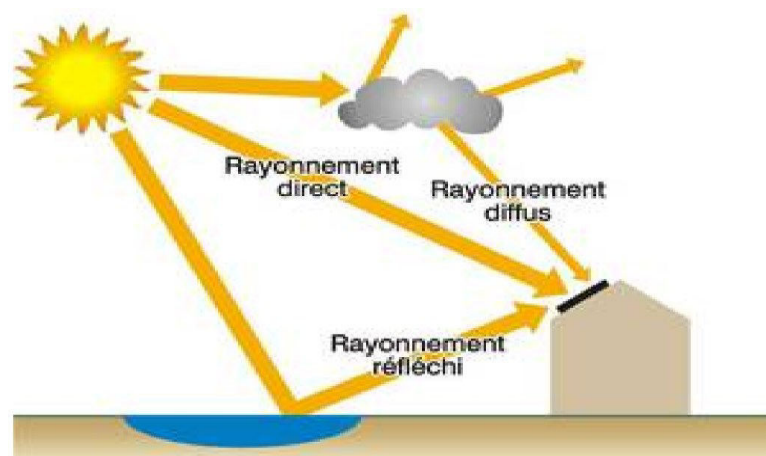


Figure I.3 : différents composants de rayonnement [11]

I.4 La durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qui elle-même dépend de la période de l'année considérée [12]

I.5 Les semi-conducteurs :**I.5.1 Définition de semi-conducteur :**

Les semi-conducteurs sont des éléments naturels. Sensibles à la lumière visible et invisible (rayon ultra-violet, infrarouge...) ; Ils conduisent le courant nettement moins bien que les métaux, mais d'autant mieux que la température est plus élevée (Exemples types : le silicium Si, le germanium Ge) La bonne conductivité électrique des métaux est due à la présence des électrons libres du gaz électronique qui parcourent tout le réseau métallique.

Le semi-conducteur est un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité (σ) des isolants sont comprises entre $1.e^{-11}$ et $1.e^{-19}$ S/cm et celles des conducteurs entre $6.e^7$ et $1.e^4$ S/cm. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre $1.e^3$ et $1.e^6$ S/cm, on les appelle des semi-conducteurs. [13]

Les types des semi-conducteurs et l'emplacement dans le tableau du Mendeleïev :

Les semi-conducteurs sont essentiellement constitués d'éléments de la colonne IV et des colonnes voisines du tableau périodique de Mendeleïev. On en distingue plusieurs types :

– les semi-conducteurs élémentaires sont des cristaux constitués d'un seul élément chimique. On rencontre des structures cristallines dites « simple » si l'élément constituant est de la colonne IV. Les deux éléments les plus importants pour l'électronique sont le silicium (Si) et le germanium (Ge), qui se cristallisent en engageant des liaisons covalentes. Le premier est l'élément le plus utilisé dans l'industrie des composants. Le germanium, quant à lui, a été largement utilisé lors de fabrication des premières diodes et des premiers transistors, mais a été ensuite remplacé par le silicium. Il est néanmoins utilisé dans quelques applications (détection infrarouge, hétéro-structures, . . .).

On rencontre également des semi-conducteurs dits « élémentaires complexes » comme le sélénium (Se, colonne VI), notamment employé pour ses propriétés photovoltaïques.

mixtes, quelques techniques d'implémentation peuvent être appliquées afin de minimiser les gradients et les transitoires thermiques autour des structures les plus sensibles [13] [14].

Les semi-conducteurs y occupent un grand intervalle car leur conductivité dépend sensiblement de la présence de petites quantités d'impuretés bien choisies. Dans un monocristal de silicium intrinsèque, à la température ambiante quelques électrons ($1,5 \cdot 10^{10}$ électrons pour $5 \cdot 10^{22}$ atomes dans un cm^3) sont excités thermiquement depuis la bande de valence vers la bande de conduction, et les électrons libres et les trous positifs ainsi créés contribuent ensemble à la conductivité du matériau mais celle-ci reste assez faible de la température, mais elle varie surtout très fortement en fonction

Le courant dans un semi-conducteur étant en général la somme de celui dû au déplacement des électrons libres, et de celui dû au déplacement des trous, la conductivité σ est reliée à la densité des porteurs n et p , et à leur mobilité μ par la relation

$$\sigma(T) = q(n\mu_n(T) + p\mu_p(T)) \quad (I.1)$$

q : est la charge de l'électron.

n et p : sont les densités des électrons et des trous,

μ : est le coefficient qui à une température donnée, relie la vitesse de dérive moyenne du porteur au champ électrique appliqué.

I.6 Différents types de semi-conducteurs :

I.6.1 Semi-conducteurs intrinsèques :

Sont des semi-conducteurs très purs et très bien cristallisés présentant un réseau cristallin parfaitement périodique et ayant un taux d'impuretés très faible (moins de 1 atome d'impureté pour 10^{13} atomes de l'élément semi-conducteur) Ils se comportent comme des isolants à très basse température et leur conductivité augmentent avec la température [15]. La figure ci-dessous donne un résumé global des semi-conducteurs intrinsèques du point de vu structure de bandes et distributions des charges.

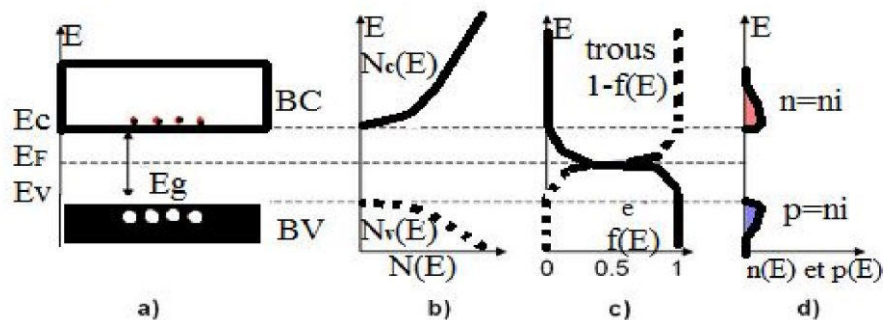


Figure I.5 : le bilan électronique pour un semi-conducteur intrinsèque.

a. Diagramme des bandes d'énergie b. Densités d'états énergétiques c. Distributions de Fermi-Dirac d. Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p) [15]

I.6.2 Semi-conducteurs extrinsèques :

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques, tout en gardant le degré de pureté initial nettement supérieur au taux du dopage, lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc...) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc...). [15]

A. Les semi-conducteurs extrinsèques dopés N :

En introduisant des atomes pentavalents tels que le phosphore P, l'arsenic As (dopage N) dans un cristal, certaines liaisons se casent laissant place à ces extra atomes qui ont cinq électrons de valence, ce qui comble les liaisons en laissant un électron libre dans le cristal peu lié au noyau ($E \approx 0.01\text{eV}$) et passe aisément dans la bande de conduction. Les atomes pentavalents ou donneurs deviennent des ions positifs après le passage des électrons excédentaires dans la bande de conduction. Figure (I.6)

Ceci qui augmente considérablement la conductivité du matériau dopé. Les charges négatives (électrons) sont dits majoritaires, comme on peut le voir dans la figure suivante [15]

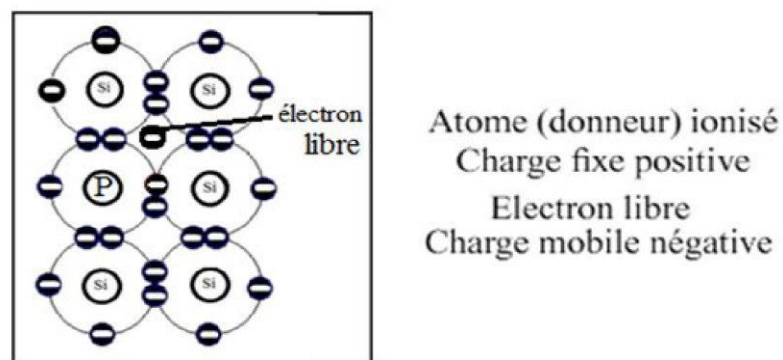


Figure I.6 : Les semi-conducteurs extrinsèques type N [15]

B. Les semi-conducteurs extrinsèques dopés P :

Dans ce cas on introduit des atomes trivalents tels que gallium Ga, l'indium In, le bore B, l'aluminium Al. Il manque, alors, à l'impureté un électron de valence pour assurer les 4 liaisons avec les atomes de silicium voisins.

Un faible apport d'énergie (0.05 eV) suffit pour qu'un électron d'un silicium voisin soit capté par l'impureté : il y a formation d'un trou peu lié et donc mobile. Les atomes trivalents (accepteurs) deviennent des ions négatifs par capture d'un électron. Compte tenu des taux de dopage, ces trous sont beaucoup plus nombreux que les porteurs intrinsèques du cristal pur.

La conduction extrinsèque de type P (positive) augmente et est assurée par des trous, les trous deviennent majoritaires. la figure ci-dessous explique clairement le phénomène. [15]

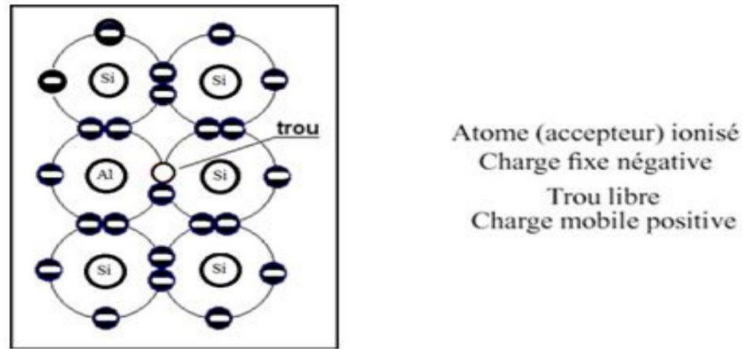


Figure I.7 : Les semi-conducteurs extrinsèques type P [15]

Un bilan général du point de vu structure de bande, distribution des charges des deux types des semi-conducteurs est illustrée à titre indicatif et à titre comparatif.

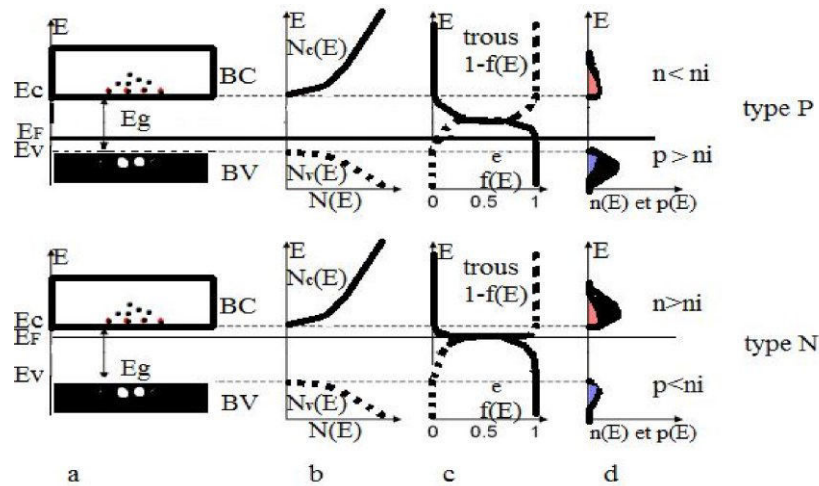


Figure I.8 :le bilan électronique pour un semi-conducteur extrinsèque
 a. Diagramme des bandes d'énergie b. Densités d'états énergétiques c. Distributions de Fermi-Dirac d. Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p).[15]

C. La jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créent un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner [16]. La figure (I.9)

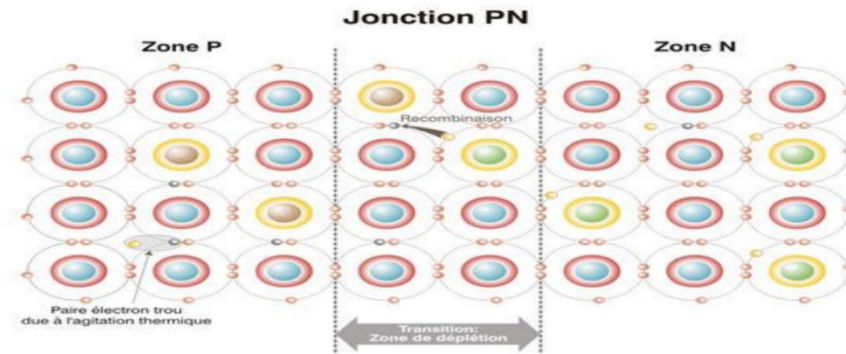


Figure I.9 : Jonction PN. [16]

La mise en contact de ces matériaux génère une barrière de potentiel à la base du champ électrique permanent. Cette barrière, appelée zone de déplétion, est formée par recombinaison du surplus de trous et d'électrons des zones P et N remise en contact. La figure (I.9) suivante représente les niveaux d'énergie au voisinage de la jonction. [16]

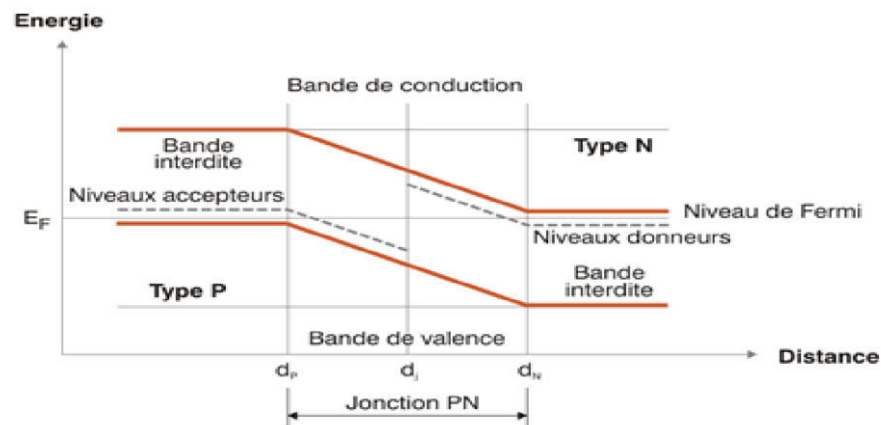


Figure I.10 : Niveaux d'énergie au voisinage de la jonction. [16]

I.7 Matériaux destinés à la conversion photovoltaïque :

Plusieurs matériaux peuvent être utilisés comme semi-conducteurs dans une cellule photovoltaïque. Le choix du matériau repose sur divers facteurs dont sa capacité d'absorber les photons provenant des rayons solaires. En effet le rayonnement solaire contient des lumières de différentes longueurs d'onde (rayons ultraviolets, infrarouges et visibles). Une partie du spectre solaire, partie qui dépend de la valeur du gap E_g du semi-conducteur, est absorbée et participe à la création de paires "électron-trou". Dans un semi-conducteur, le photon d'énergie adéquate pourra promouvoir un électron de la bande de valence (BV) vers la bande de conduction (BC). Cette transition génère deux types de porteurs, les électrons de conduction, et des trous. Ces paires d'électron-trou d'énergie E_g pourront servir à générer un courant avant leur recombinaison. Le paramètre prédominant dans le choix d'un semi-

conducteur pour la conversion photovoltaïque est donc la largeur de sa bande interdite E_g . Bien entendu, d'autres paramètres vont intervenir dans ce choix. [17]

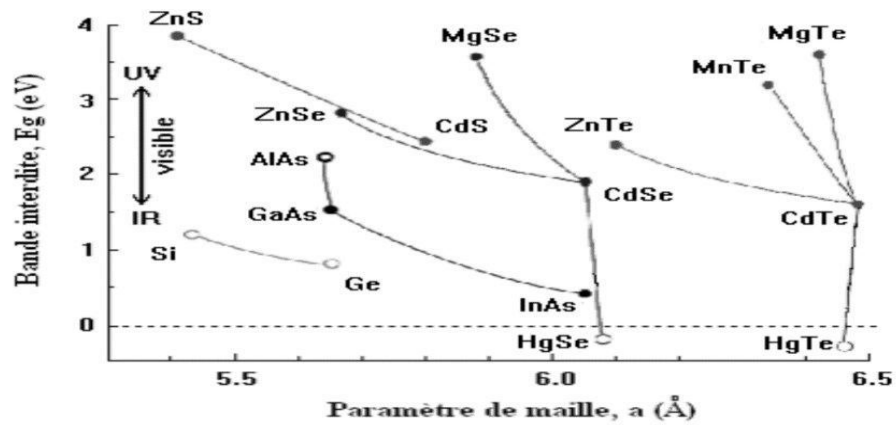


Figure I.11 : Bande interdite en fonction du paramètre de maille cubique pour différents semi-conducteurs [18].

I.7.1 Hauteur de la bande interdite :

La bande interdite est la mesure de la quantité d'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction lorsque celui-ci est soumis à une excitation. Le matériau est appelé semi-conducteur si le gap (notée E_g , unité : eV), ou la distance énergétique entre le bas de la bande de conduction et le sommet de la bande de valence, est inférieur à 2 eV (Figure I.12). C'est le cas des matériaux Germanium (Ge), Si, GaAs, Phosphure d'Indium (InP).

Le matériau est considéré comme un semi-conducteur grand gap pour des valeurs du gap supérieures à 2 eV [19].

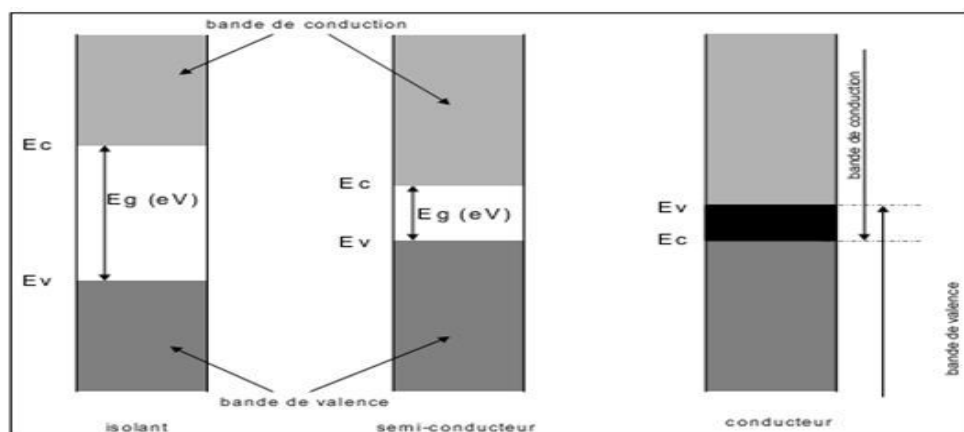


Figure I.12 : Diagrammes de bandes d'énergie d'un isolant, un semi-conducteur et un conducteur [19].

La taille de la bande interdite donne des caractéristiques électriques importantes à chaque semi-conducteur. En effet, la largeur de bande interdite fixe la limite en température au-dessous de laquelle le dispositif peut fonctionner sans détérioration, ainsi que l'aptitude du semi-conducteur à résister aux radiations. La largeur de la bande interdite décroît avec la température et ses variations peuvent être décrites approximativement par la fonction suivante [I.2] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{(a \cdot 10^{-4})T^2}{T+b} \quad (I.2)$$

$E_g(0)$ est la hauteur de la BI à 0°K, T température en °K, a et b sont des constantes. Les valeurs des paramètres a et b sont données dans le Tableau I.1 pour différents matériaux.

Tableau I.2 : Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température [19]

Semi- conducteur	$E_g(0)$ (eV)	a (eV/K)	b (K)
AsGa	1.519	5.405	204
Si	1.17	4.73	636
Ge	0.7437	4.774	235
GaN	3.509	7.32	700
AlN	6.118	17.99	1432

I.7.2 Différents Matériaux destinés à la conversion photovoltaïque :

A. Le Silicium :

Le silicium est un élément parfaitement stable et non toxique, il constitue environ 28 % de l'écorce terrestre. Plusieurs technologies pour le photovoltaïque du silicium ont été développées. Ces technologies représentent actuellement 99 % du marché des modules photovoltaïques comme le montre la figure (I.13) [17]

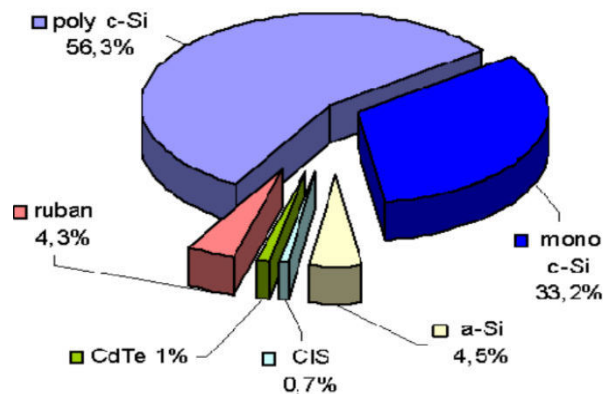


Figure I.13 : Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003 [17]

B. Composés à base du cadmium :

Les composés semi-conducteurs à base de cadmium comme CdS, CdSe et CdTe permettent d'obtenir des piles solaires présentant une efficacité de conversion assez élevée. Le CdTe, l'une des premières filières étudiées, possède une bande interdite Optimale de 1.5 eV et un coefficient d'absorption élevé. Il présente une bonne stabilité et le rendement de ses cellules peut atteindre 16.5 %. Cette filière a rencontré des difficultés qui ont ralenti son utilisation à grande échelle, à savoir : La sensibilité à l'humidité ;

La présence de Cd qui est un matériau toxique le rend relativement inapproprié à une application destinée au grand public ;

La difficulté de réaliser des contacts ohmiques stables [17].

C. L'arséniure de gallium :

Ce matériau présente une énergie de gap de 1.42 eV. Des rendements de conversion excédant les 28 % [26], lui donne la particularité d'être réservée aux applications spatiales. Le GaAs peut être également utilisé dans des cellules tandem, comprenant un empilement de matériaux de gaps successivement de plus en plus petits pour avoir une meilleure utilisation du spectre solaire. [17]

D. Chalcopyrite basée sur le CuIIVI2 :

L'émergence des cellules solaires, basées sur les matériaux à structures chalcopyrites, fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques CuInSe₂/CdS par Wagner et coll de Bell Téléphone en 1974-1975. Wagner et coll avaient rapporté la préparation d'hétérojonctions p-n CuInSe₂/CdS à partir d'un monocristal CuInSe₂, dont la conductivité est de type p, sur lequel une couche mince de CdS de 5-10 nm d'épaisseur avait été déposée. La réponse photovoltaïque de ces détecteurs pour une lumière incidente à travers la fenêtre CdS donnait lieu à de très hauts rendements quantiques (70 %) uniformes entre 0.55 et 1.25 μm. Ces hétérojonctions avaient des rendements solaires de l'ordre de 5 %. Les composés ternaires chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement le CuGaSe₂, le CuInS₂, le CuAlSe₂ et le CuInSe₂. Du fait de leurs grands coefficients d'absorption optique, une épaisseur de 1.5-2 μm est suffisante pour absorber la partie utile du spectre solaire. Le matériau le plus prometteur semble être le CuInSe₂, une efficacité de 20 % est obtenue par les cellules solaires à base de ce matériau. Cependant, sa faible bande interdite (1.04 eV) limite la tension du circuit ouvert et donc le rendement de la photopile. Et afin de dépasser ce problème, des travaux portent aujourd'hui sur l'introduction des atomes de Ga, Al ou Te qui se substituent partiellement à l'In, de façon à élargir sensiblement la bande interdite. [17]

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait appel à quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur L'énergie solaire et les Matériaux Photovoltaïques,

On a vu aussi dans ce chapitre les types des semi-conducteurs et la définition du gap d'énergie. Et on a distingué que chaque jonction est construite d'un semi-conducteur dopé N et un autre dopé P et que le Gap est le responsable de la conversion de l'énergie du photon Vers une énergie électrique.

*Chapitre II : Techniques
d'élaboration des matériaux destinés
à la conversion PV*

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

Sommaire

<i>II.1 Introduction</i>	17
<i>II.2 Techniques d'élaboration du Silicium</i>	17
<i>II.2.1 Raffinage du silicium</i>	17
<i>II.2.2 Purification du silicium métallurgique</i>	21
<i>II.2.3 Cristallisation du silicium</i>	24
<i>II.2.4 La production de wafer</i>	26
<i>II.2.5 Les Structures de Silicium</i>	27
<i>II.2.6 Quelques Propriétés du silicium</i>	30
<i>II.2.7 Les différents types de silicium</i>	31
<i>II.2.8 Utilisations</i>	31
<i>II.3 Techniques d'élaboration des couches minces</i>	32
<i>II.3.1 Notion de couche mince</i>	32
<i>II.3.2 Techniques de dépôts de couches minces</i>	32
<i>II.3.3 Le silicium amorphe</i>	34
<i>II.3.4 Le tellure de cadmium (CdTe)</i>	36
<i>II.4 Fabrication des cellules et assemblage du module photovoltaïque</i>	37
<i>II.4.1 Fabrication des cellules</i>	37
<i>II.4.2 Assemblage des modules</i>	38
<i>II.5 Conclusion</i>	39

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

II.1.1. Introduction :

Le silicium existe en grande quantité à la surface du globe terrestre. C'est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre ; O2 (46%), Si (28%), Al (8%). Sa température de fusion est de 1415°C, qui est donc assez élevée, et son affinité chimique est forte à haute température.

Le silicium fut découvert en 1824 par J.J. Berzelius à Stockholm, en Suède. La répartition étant de 277.000 ppm.

Les sources naturelles sont essentiellement les silicates (sable, etc...) mais aussi zircon, jade, mica, quartz, donc du SiO₂ sous diverses formes et plus ou moins de contaminants (qui lui donnent des couleurs différentes).

Le silicium possède 4 électrons sur leur couche périphérique car ils appartiennent à la 4^{ème} colonne de la classification périodique des éléments. Il est possible de les produire avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour 10¹¹ atomes de semi-conducteur) : on parle alors de S.C. intrinsèque.

Le silicium est un élément chimique de la famille des cristallogènes, de symbole Si et de numéro atomique 14.

Il est utilisé depuis très longtemps sous forme d'oxyde de silicium amorphe (silice ou SiO) comme composant essentiel du verre. Il a depuis le milieu XX^e siècle de nouveaux usages en électronique (transistor), pour la production de matériaux tels que les silicones ou, pour fabriquer des panneaux solaires photovoltaïques. [20]



Figure II.1 : *silicium métallurgique [21]*

II.2 Techniques d'élaboration du Silicium :

II.2.1 Raffinage du silicium :

En 2006, 93% du marché photovoltaïque était encore basé sur les technologies silicium (multi cristallin, monocristallin et ruban).

Sur la base d'un besoin de 15T/MW, l'industrie photovoltaïque consommerait chaque année environ 40000 tonnes de silicium pour produire 5GW de panneaux photovoltaïques dont 90% à base de silicium. D'après l'US Géographia Survey, la production de silicium au niveau

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

mondial a été d'environ 5 millions de tonnes en 2007 la part de l'industrie photovoltaïque représente donc un peu moins de 1% de la production mondiale.

L'obtention de ce matériau arrive en fin d'un processus de raffinage que l'on peut séparer en deux grandes étapes [22].

La transformation du quartz en silicium de grade métallurgique ou MG-Si est réalisée dans un four à arc, outil typique de l'industrie métallurgique. La pureté du MG-Si est de l'ordre de 98 à 99%.

La deuxième transformation est une purification du silicium métal en silicium de grade solaire ou SoG-Si, d'une pureté de 99,9999%.

La route traditionnelle, héritée de l'électronique, utilise des réacteurs chimiques pour synthétiser le silicium polycristallin ou poly-Si. De toute la chaîne de production des modules photovoltaïques, c'est l'étape la plus consommatrice en énergie . [22]

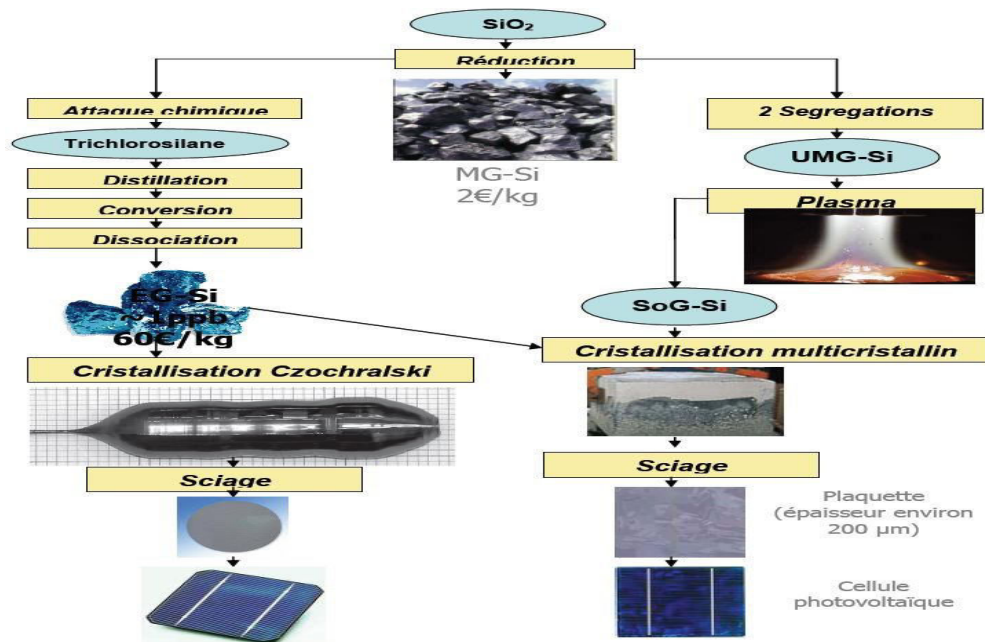


Figure II.2 : production de la cellule solaire [23]

En raison du coût de cette étape et du fait qu'une pureté moindre peut-être tolérée, des techniques pour produire le silicium solaire à partir de nouveaux procédés chimiques mais aussi métallurgiques sont explorées.

Dans le cycle de production du silicium solaire, la plupart des étapes induisent des pertes de matière et en particulier, celle de la production des wafers. En fonction de l'épaisseur de la scie, 30 à 50% de la matière préalablement purifiée et cristallisée est perdu sous forme d'une boue composée de particules de silicium, d'éléments abrasifs, de résidus de scie et du liquide de refroidissement de la scie. [24]

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

A. la nature du silicium :

La silice, aussi appelé dioxyde de silicium est l'élément chimique le plus répandu dans la croûte terrestre après l'oxygène. Sa formule chimique est SiO_2 .

La silice est présente sous différentes formes de minéraux durs. Nous la trouvons en grande quantité dans :

- ✓ Les roches sédimentaires détritiques (roches formées de débris d'une roche préexistante), comme le sable ou le grès.
- ✓ Les roches métamorphiques (schistes, gneiss, quartzistes), elles sont formées à partir de la recristallisation de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous l'action de la température et de la pression qui augmentent avec la profondeur dans la croûte terrestre ou au contact avec d'autres roches.
- ✓ Les roches magmatiques. [25]

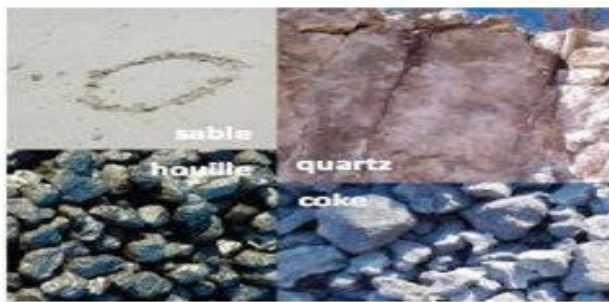


Figure II.3 : matière première de la silice [25]

Le silicium métal, environ 20% de la production mondiale de silicium, est utilisé principalement par l'industrie chimique et celle de l'aluminium pour les silicones et les alliages métalliques. Pour la filière solaire, il servira à la fabrication du silicium de qualité solaire. [24]

A. Elaboration du silicium métallurgique :

Le silicium est présent sous forme de silice (SiO_2) contenue dans le sable ou le quartz. Le silicium métallurgique (MG-Si) est produit par carboréduction de la silice (SiO_2) dont on a extrait l'oxygène par électrométallurgie dans un four à arc électrique dont la puissance peut atteindre 30 MW. Ce procédé consiste à porter à haute température (jusqu'à 3000°C) un mélange de silice (souvent du quartz relativement pur) et d'espèces carbonées (coke, houille et bois). Le chauffage est assuré par un arc électrique qui éclate entre des électrodes en graphite plongées dans le mélange déversé dans un creuset. Le carbone « se combine » avec l'oxygène de la silice pour former du silicium et du monoxyde de carbone selon la réduction de la silice par le carbone à 1700°C [24]



Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

La réduction de la silice par le carbone est un procédé mis en œuvre dans les fours électriques de l'industrie sidérurgique depuis le début du 20^{ème} siècle.

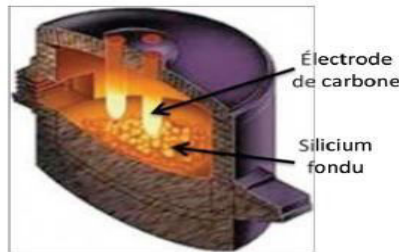


Figure II.4 : four à arc [25]

L'énergie nécessaire à la réaction est apportée sous forme d'arc électrique par des électrodes en graphite, à l'intérieur de fours métallurgiques dits fours à arc sont multiples et complexes. On distingue différentes zones de températures dans le four à arc ; dans chacune de ces zones se produit une réaction chimique différente (figure II-5). [25]

La production d'une tonne de silicium métallurgique consomme [23] :

- ✓ 2500 kg de quartz.
- ✓ 800 kg de charbon de bois.
- ✓ 200 kg de coke de pétrole.
- ✓ 1200 kg de bois.
- ✓ 90 kg d'électrodes en graphite.
- ✓ 11 000 kWh

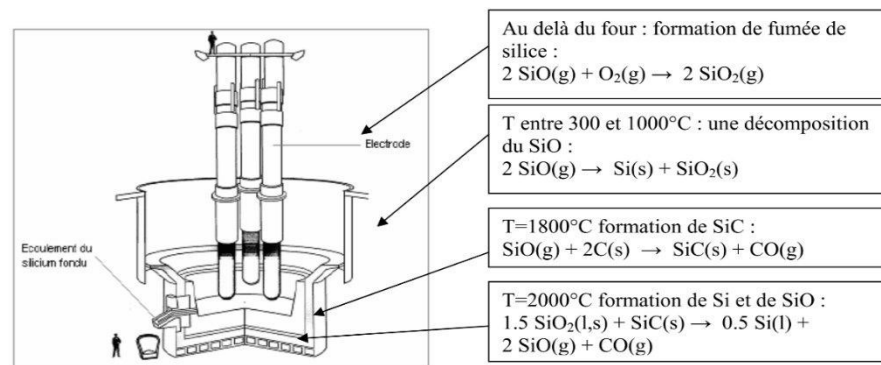


Figure II.5 : Four de production de silicium métallurgique [23]

Le silicium en fusion est alors déversé dans des poches puis séparé du laitier avant d'être coulé dans des lingotières. Le silicium ainsi obtenu présentera une pureté typique de 98.5 % et les impuretés présentes proviennent soit des intermédiaires de réaction (SiC(s), SiO₂(s)), soit des impuretés contenues dans la matière première (métalliques, carbone, bore et phosphore). [26]



Figure II.6 : silicium métallurgique en fusion [25].

B. Composition chimique du silicium métallurgique :

Le silicium métallurgique contient des impuretés qui proviennent essentiellement des matières premières et des électrodes en graphite. L'atmosphère de l'usine peut éventuellement contaminer le silicium. [23]

Des études de Ferro Pem ont déterminé l'influence des matières premières sur les concentrations en bore et phosphore du silicium métallurgique. Ces travaux ont permis d'améliorer sensiblement la sélection des matières premières. Le choix des matières premières a une grande importance car il peut permettre de diminuer d'un facteur 5 les quantités de bore et phosphore dans le silicium métallurgique.

Une étude menée par des géochimistes montre qu'il est possible de trouver des matières premières très pauvres en bore. [23]

Tableau II.1 : Teneur en impuretés des matières premières [23].

	B en $\mu\text{g/g}$	P en $\mu\text{g/g}$
Quartz (Bural-Sardag)	1	2
Charbon de bois	1.3	67
Bois	0.4	30

L'utilisation du noir de carbone avec un liant saccharose permet aussi d'obtenir des teneurs très faibles en bore et phosphore, mais ce réducteur a un coût très élevé.

En sélectionnant les matières premières, du silicium métallurgique à 7 $\mu\text{g/g}$ de bore et 10 $\mu\text{g/g}$ en phosphore est produit. Mais l'approvisionnement de ces matières premières présente de nombreuses difficultés techniques (disponibilité, exploitation, volumes, coûts de transport...). [23]

II.2.2 Purification du silicium métallurgique :

Le silicium solaire (SoG-Si), ou silicium polycristallin (poly-Si) Plus connu dans la filière électronique, est obtenu par la purification du silicium métallurgique et servira à la confection des lingots de silicium.

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique de faire une purification chimique. Une des méthodes utilisées consiste à faire une distillation à partir d'un produit, liquide à température ambiante,

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

qui contient le silicium. Une possibilité consiste à fabriquer un halogénure de silicium.

De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium basés sur le trichlorosilane (75%) (Trichlorosilane (SiCl_3H), c'est le cas de Rhône-Poulenc, Westinghouse, Texas, Saint Gobain, le dichlorosilane (SiH_2Cl_2) mis au point par Wacker, ou le trichlorosilane (SiHCl_3) par Siemens ou Union Carbide. D'autres techniques sont basées sur le tétrafluorosilane (SiF_4) ou le tétraiodure de silicium (SiI_4) et de monosilane (25%). Elle nécessite une plus grande consommation d'énergie que la voie métallurgique, et présente l'inconvénient de la dangerosité liée à l'utilisation de produits chlorés. Elle permet d'obtenir un matériau d'une plus grande pureté, un des objectifs de la filière électronique pour laquelle elle a historiquement été développée. [25]

A. voie chimique :

La voie traditionnelle de purification du silicium métallurgique est la voie dite « Chimique », utilisée à l'origine pour l'élaboration de silicium de qualité électronique. Elle présente de nombreuses variantes selon l'opérateur (Siemens, Union Carbide Chemicals, Ethyl Corporation) basées sur trois opérations principales : la synthèse, la distillation et la pyrolyse.

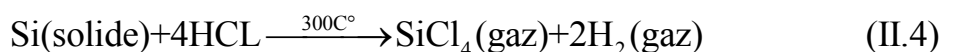
Ces procédés de purification reposent sur la réactivité du silicium avec les ions chlorures ou encore avec l'hydrogène. Ils consistent à synthétiser des silanes gazeux (trichlorosilane (HSiCl_3) pour le procédé Siemens et monosilane (SiH_4) pour le procédé Union Carbide), à les purifier par distillation puis à les décomposer thermiquement pour obtenir du silicium de grande pureté comme produit final : pureté jusqu'au ppb soit 10^{-9} . La synthèse du silicium en présence de chlorure d'hydrogène (HCl) ou de dichlore (Cl_2) permet de séparer le silicium métallurgique des impuretés qu'il contient.

L'importante consommation énergétique (autour de 80-120 kWh par kg de silicium traité) et l'utilisation de produits toxiques et dangereux pour la santé humaine, tels que les chlorosilanes, constituent les principaux inconvénients de ces procédés. Dans le but de réduire la consommation énergétique, des recherches sont en cours pour adapter ces procédés à la filière solaire : réacteur à lit fluidisé, décomposition du monosilane dans un réacteur CVD ou encore réduction des chlorosilanes par du zinc. [24]

B. Procédé par SIEMENS :

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique de faire une purification chimique. La méthode consiste à faire une distillation à partir d'un produit, liquide à température ambiante, qui contient le silicium : le trichlorosilane (SiHCl_3). [23]

Le silicium réagit avec du chlorure d'hydrogène (HCl) suivant les réactions :



Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

La réaction avec le chlore permet une première purification puisque par exemple des précipités chlorés de métaux ne sont pas mélangés au trichlorosilane. Une série de distillations successives conduit alors à une purification extrême. Le trichlorosilane purifié (figure II-7) est ensuite réduit pour redonner du silicium dans un réacteur présenté figure (II-8). [23]

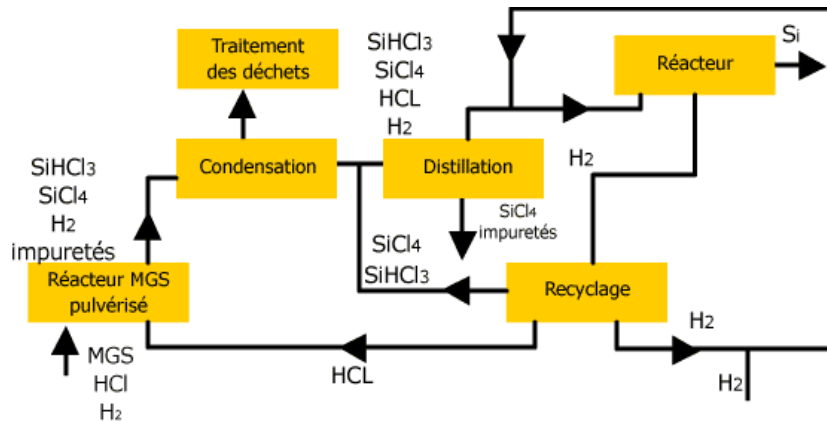
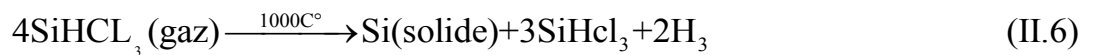
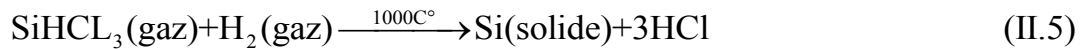


Figure II.7 : Cycle de distillation du composé de silicium chloré [23].

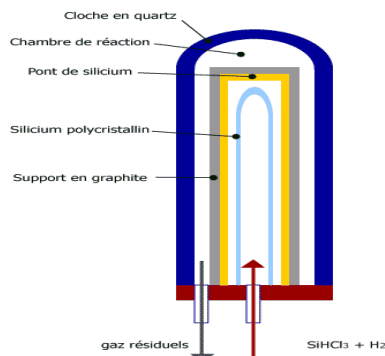


Figure II.8 : Schéma d'un réacteur CVD pour la production de silicium de qualité électronique à partir de SiHCl_3 . [23]

C. Procédé par Elkem :

Géant de la production de silicium métallurgique, Elkem a développé un procédé de purification dont la consommation énergétique est estimée à 15 kWh/kg. Le procédé consiste à effectuer un raffinage pyro-métallurgique du laitier du MG-Si. Le MG-Si est coulé puis solidifié avant de subir un lessivage hydro-métallurgique basse température par des solutions acides et alcalines. Finalement, le silicium est fondu puis cristallisé en lingots. La capacité de production d'Elkem est estimée à 6000 MT / an [24].

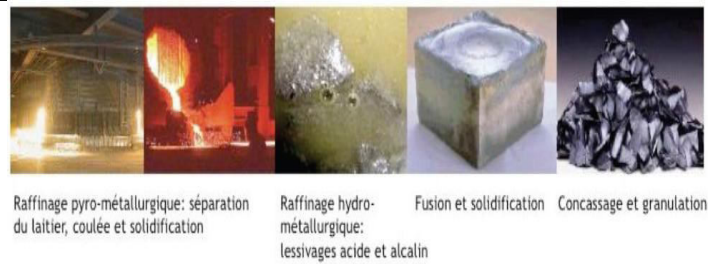


Figure II.9 : procédé Elkem [24].

II.2.3 Cristallisation du silicium :

Après sa purification, le silicium est cristallisé par différentes techniques adaptées au type de silicium que l'on veut obtenir :

A. Les procédés d'élaboration du silicium polycristallin :

Le principe d'élaboration des lingots de silicium polycristallin est basé sur une méthode de cristallisation orientée dans un creuset fixe soumis à écoulement de chaleur unidirectionnelle (figure II.10). Cette méthode consiste à réaliser la fusion de la charge de silicium dans un creuset en graphite calorifugé sur toute la surface. L'ajout d'un agent encapsulant à la charge permet d'éviter la contamination du silicium par le creuset et facilite la récupération du lingot. La température du bain est stabilisée à une température légèrement supérieure à la température de fusion du silicium (1420°C). On garde la puissance délivrée par le générateur constante à la valeur déterminée pendant la phase de stabilisation.

La cristallisation est obtenue en supprimant une partie du calorifuge de la paroi inférieure du creuset .ceci permet l'évacuation de la chaleur latente de solidification et conduit à une solidification dirigée.

La phase suivante consiste à récupérer le lingot par retournement du creuset en utilisant les propriétés de l'agent encapsulant .cette méthode de récupération du lingot permet la réutilisation du creuset d'autre part le refroidissement à l'extérieur, et de s'affranchir des difficultés liées à la différence des coefficients de dilatation du graphite et du silicium au cours du refroidissement. L'encapsulation des lingots est utilisée pour éviter la diffusion des impuretés du creuset vers le silicium . [26]

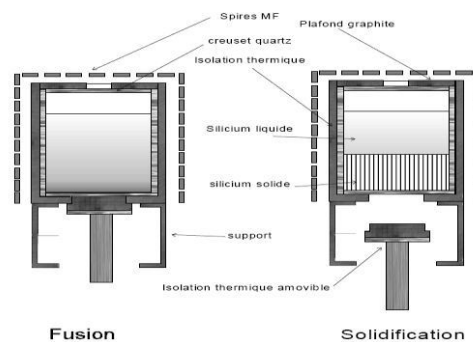


Figure II.10 : la méthode de cristallisation [26]

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

B. Les procédés d'élaboration du silicium monocristallin :

Cette partie est consacrée aux techniques d'élaboration des lingots de silicium pour les applications solaires. En effet, les différents procédés ont un effet non négligeable sur les propriétés finales du matériau, ils définissent sa qualité mais aussi son coût à l'issue des différentes étapes. Les lingots de silicium élaborés pour ces applications peuvent être monocristallins ou multi-cristallins [27].

B.1 Procédé Czochralski :

La technique Czochralski est la méthode de croissance la plus utilisée pour l'élaboration de lingots de silicium mono-grain. Tenant son nom de son inventeur, elle a été longtemps utilisée pour l'élaboration des semi-conducteurs pour la microélectronique telle que le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium. Elle est préférée aux autres méthodes car le cristal en croissance n'est pas en contact avec un contenant, seul un creuset pour contenir le liquide est nécessaire.

Le principe consiste à solidifier un monocristal en initiant la croissance à partir d'un bain fondu par un germe monocristallin d'orientation connue (figure II.11). Dans le cas du silicium, le bain fondu est réalisé à partir de silicium de très haute pureté, le liquide est contenu dans un creuset en silice (SiO_2). Un germe est mis au contact du bain et le tirage est lancé progressivement et simultanément avec la rotation. Le creuset tourne dans le sens horaire et le germe à contre sens (figure II.11).

Le contrôle des vitesses de tirage et de rotation permet de définir les dimensions du lingot cylindrique (diamètre et hauteur). Actuellement, les lingots de plus grande taille atteignent des diamètres de 450 mm pour une hauteur de 2150 mm et un rendement de 940 kg. Le principal inconvénient de cette technique est que le creuset est soluble dans le silicium liquide ce qui introduit de l'oxygène dans le bain liquide. Une partie de l'oxygène s'évapore de la surface du liquide mais, l'oxygène restant s'incorpore dans le cristal pendant la croissance. Le silicium issu de la croissance Cz contient typiquement 10^{18} atomes/cm³ d'oxygène [28].

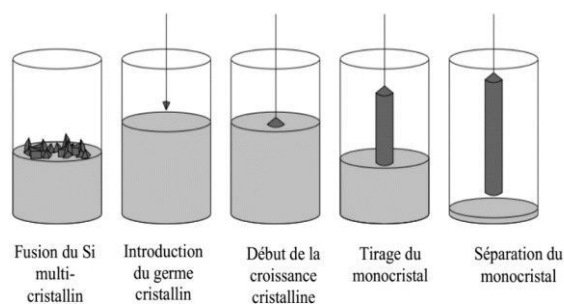


Figure II.11 : Principe du procédé Czochralski [28]

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

B.2 Procédé fusion de zone :

La technique de tirage FZ est une alternative à la technique Cz pour produire des lingots de silicium extrêmement purs. Les teneurs en oxygène y sont 10 à 100 fois moins élevées que dans un lingot Cz. La teneur en impuretés métalliques y est également plus faible.

Pour produire un lingot FZ, un barreau de silicium polycristallin ultra-pur est passé plusieurs fois dans un anneau à induction qui fait fondre localement le silicium. Un germe monocristallin est placé à une extrémité du barreau de silicium pour débiter la croissance du lingot. La zone fondue déplace avec elle les impuretés puisque celles-ci sont plus solubles dans le liquide que dans le cristal, ce qui a pour effet de purifier le silicium (figure II.12).

L'utilisation de lingots FZ ou Cz pour la production de cellules photovoltaïques présente cependant un inconvénient majeur. Les plaquettes réalisées par cette méthode sont découpées en « pseudo carrés » pour permettre un remplissage optimal des cellules dans le module PV. De plus, le haut et bas de lingot ne peuvent pas être utilisés pour la fabrication de plaquettes. Les pertes matière sont donc assez conséquentes, mais les parties éboutées sont réutilisées pour la cristallisation de nouveaux lingots. [28]

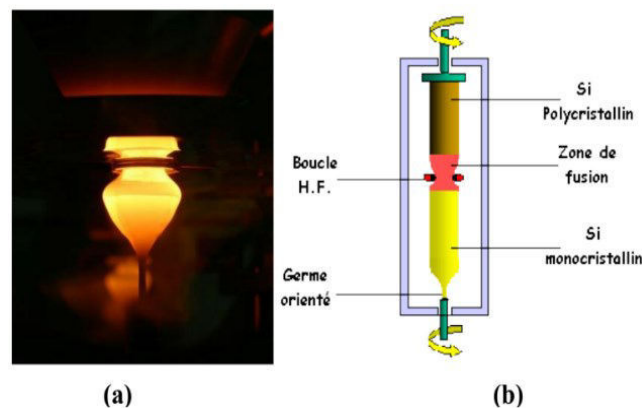


Figure II.12 : a) Image d'un lingot pendant la fusion de zone, b) schéma de principe de la fusion de zone. [28]

II.2.4 La production de wafer :

Après la cristallisation du silicium de grade solaire, les lingots sont découpés en plaques appelées wafer à l'aide d'une trame dense de fils enroulés autour d'une bobine. Un mélange visqueux, appelé « slurry » selon la dénomination anglaise, constitué d'un liquide organique (glycol) et de particules de carbure de silicium coule le long du fil et permet le sciage des lingots de silicium (Figure (II.13)).

Etant donné la finesse des wafers sciés (de l'ordre de 200-300 μm), cette étape induit des pertes importantes de silicium solaire. A l'heure actuelle, en moyenne, 40% de la matière initiale devient un déchet non revalorisé et non recyclable [24].

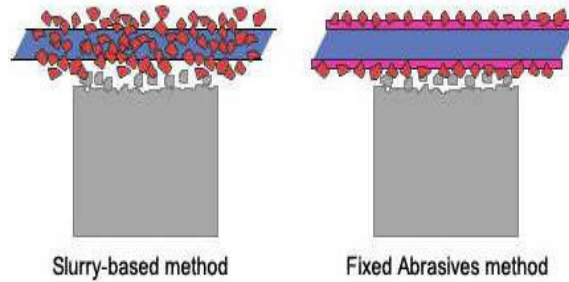


Figure II.13 : *Technique de découpe des wafers : « slurry-based » et « fixed abrasives » [24]*

A l'horizon de 2020, le marché s'oriente vers le remplacement de la technologie de découpe « slurry » par la découpe par fils diamantés (« fixed abrasives » en anglais), en particulier pour le silicium monocristallin. Dans ce procédé de découpe, les « dents de la scie » sont fixées sur le fil sous forme de fines particules de diamant à l'aide d'un film de nickel/zinc déposé par électrodéposition ou à l'aide d'une matrice d'époxy (Figure II.13). La découpe par fils diamantés augmente la vitesse de découpe. Néanmoins, le coût du fil ainsi que la sensibilité aux tremblements sont des inconvénients significatifs pour ce procédé de découpe. L'étape de découpe peut avoir un impact important sur la qualité du wafer, notamment sur sa tenue mécanique, et donc sur le rendement des panneaux solaires, en particulier pour le silicium polycristallin. Toutefois, certaines études ont montré que le sciage avec des fils diamantés n'altère pas la qualité des cellules solaires, surtout pour la découpe de lingots de silicium monocristallin. [24]

II.2.5 Les Structures de Silicium :

Le silicium est un semi-conducteur, sa conductivité électrique est très inférieure à celle des métaux. Il est insoluble dans l'eau (sauf à haute température). Il est attaqué par l'acide fluorhydrique (HF) ou un mélange acide fluorhydrique/acide nitrique (HNO_3) en fonction de la phase.

Le silicium présente des reflets métalliques bleutés, mais n'est pas du tout aussi ductile que les métaux. [23]

A. Structure électronique d'un atome de silicium :

Il existe trois isotopes naturels du silicium : ^{28}Si (92,18 %), ^{29}Si (4,71 %) et ^{30}Si (3,12 %). Il existe également des isotopes artificiels instables : ^{25}Si , ^{26}Si et ^{27}Si qui sont émetteurs β^- , ainsi que ^{31}Si à ^{34}Si qui sont émetteurs β^+ . [29]

La structure atomique électrique est présentée dans la figure II.14.

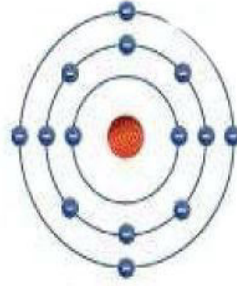


Figure II.14 : Structure électronique d'un atome de silicium [29].

On remarque qu'il y a 4 électrons libres dans la couche m, pour cela on peut lui faire dopé avec des atomes de valence 3. [29]

B. La structure cristalline :

La matière condensée peut prendre deux états solides différents, suivant les conditions dans lesquelles elle s'est formée : un état dit amorphe, dans lequel la disposition des atomes est aléatoire, ou un état cristallisé, caractérisé par un arrangement périodique des atomes. Les solides amorphes sont généralement appelés des verres et considérés comme des liquides de haute viscosité. Les solides cristallisés peuvent former des monocristaux, si la périodicité est ininterrompue dans tout le volume, ou des poly-cristaux, s'il existe une périodicité locale et que le solide est composé d'un ensemble de grains cristallins de taille à peu près uniforme. Dans la microphotographie de la Figure (II.15), prise par Transmission Electron Microscopy (TEM), une vue de coupe du réseau cristallin du silicium permet d'observer sa périodicité. [30]

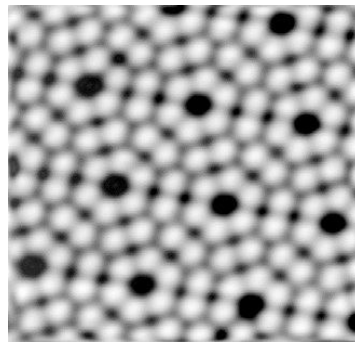


Figure II.15 : Microphotographie du réseau cristallin du plan (111) par M.E.T) [30]

C. La structure diamant :

Dans la structure diamant chaque atome est entouré de 4 plus proches voisins, ce qui permet de former des liaisons covalentes. Elle peut être décrite comme étant formée de 2 structures (CFC). Déplacées l'une par rapport à l'autre le long de la diagonale principale. La position de l'origine de la seconde structure c. f. c. par rapport à l'origine de la première est $(1/4, 1/4, 1/4)$. Le diamant cristallise dans cette structure, mais aussi le Silicium et le Germanium.

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

Cette structure est typique des éléments de la colonne IV du tableau périodique, mais aussi des composés III – V dans lesquels les sites $(0, 0, 0)$ et $(1/4, 1/4, 1/4)$ sont occupés par différents types d'atomes. On parle dans ce cas de structure Zinc blende [26]. Le paramètre de maille du silicium est de $5,43 \text{ \AA}$.

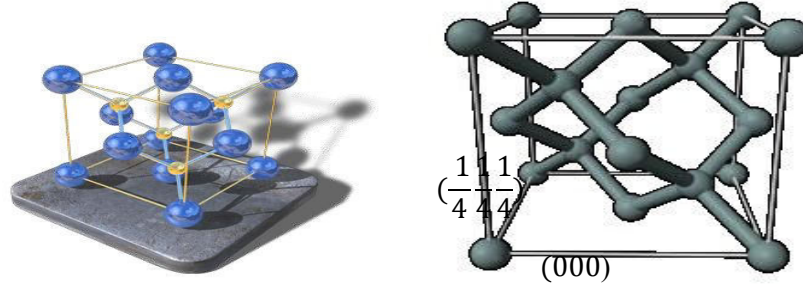


Figure II.16 : Maille élémentaire de type diamant du silicium [30]

D. La structure de bande :

Figure (II-17) est une représentation de la structure de bandes du silicium monocristallin localisée autour de la bande interdite. La zone orangée représente la bande interdite, les bandes immédiatement au-dessus et en-dessous sont, respectivement, les bandes de conduction et de valence. [31]

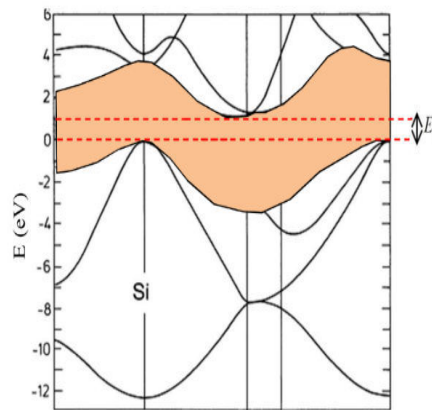


Figure II.17 : Structure de bande d'énergie du Silicium [31]

La figure (II-17) montre que le silicium a un gap indirect. L'énergie de gap, décroît température suivant la relation suivante [32]:

$$E_g(t) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (\text{II.7})$$

où $E_g(0) = 1,169 \text{ eV}$, $\alpha = 9,4 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$, $\beta = 665 \text{ K}$, $T = \text{la température de kelvin}$

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

II.2.6 Quelques Propriétés du silicium :

Le silicium est un des matériaux aux propriétés les mieux connues. Même le comportement de la plupart des impuretés dans le silicium a fait l'objet de très nombreuses publications. Les efforts de recherche actuels portent d'avantage sur l'interaction impureté - impureté, impureté-défaut dans le silicium et la passivation de ces imperfections. [32]

Tableau II.2 : Propriétés Physiques et Atomiques du Silicium [32.33]

propriétés Physiques du Silicium	
Nom	Silicium
Etat	Solide
Champ de claquage V/m	$30 \cdot 10^6$
Constantes diélectriques relatives ϵ_r	11,7
Constante diélectrique	11.9
Nc	$2.8 \cdot 10_{19}$
Nv	$1.04 \cdot 10_{19}$
Affinité d'électron	4.05
Durée de vie minoritaire	$2.5 \cdot 10_{-3}$
Indice de réfraction	3.44
Mobilité des électrons	$1500 \text{ cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$
Mobilités intrinsèques (cm ² /V.s)	$\mu_n = 1350$
	$\mu_p = 480$
Pression de vapeur	4.77 Pa
Vitesse de son	8.433 m/s à 20°C
Volume molaire	$12.06 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{mol}$
Masse volumique à 1687K	2.51 g/cm^3
Masse volumique à 300K	2.329 g/cm^3
Chaleur massique	700 j/Kg.K
Gain en densité liquide-solide	+9.1%
Concentration d'atomes (/cm ³)	$5 \cdot 10^{22}$
Concentration intrinsèque (/cm ³)	$1,45 \cdot 10^{10}$
Point d'ébullition	2223°C
Energie d'évaporation	384.22 Kj/mol
Point de fusion	1414°C
Energie de gap	1.12 eV
Energie de fusion	50.55 Kj/mol
Température de fusion	1687k
Conductivité électrique	$2.52 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
Conductivité thermique	148w/m.k
Densité	2.328 g/cm^3
Tableau des propriétés Atomiques du Silicium	
Masse atomique	28.0855+ 0.00034 UMA
Rayon atomique	110pm
Rayon de covalence	1.11Å°
Rayon de van der wals	210
Structure cristalline	Diamant
Configuration électrique	3s ² 3p ²

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

II.2.7 Les différents types de silicium :

Le silicium cristallin est une technologie éprouvée et robuste, dont l'espérance de vie est à peu près de trente ans, dont le rendement était de l'ordre de 13 % au début de la création de cette source d'énergie. On obtient désormais des rendements atteignant plus de 20 % pour certaines technologies. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Elles représentaient près de 80 % de la production mondiale de panneaux photovoltaïques en 2000. Le silicium cristallin se divise lui-même en trois catégories :

A. Monocristallin :

Tout d'abord, le silicium à l'état brut est fondu pour donner un barreau. Le refroidissement du silicium doit être lent et maîtrisé pour obtenir un mono cristal. Un wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N que nous étudierons plus tard, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient une cellule. Son procédé de fabrication est long, exigeant en énergie et onéreux.

B. Polycristallin :

Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Grâce à leur potentiel de gain de productivité, ces cellules se sont aujourd'hui imposées : elles représentaient 49 % de l'ensemble de la production mondiale en 2000. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium mono cristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

C. Le silicium amorphe :

Celui-ci a des coûts de fabrication bien inférieurs à ceux du silicium cristallin. Les atomes ou molécules qui constituent un matériau amorphe sont disposés aléatoirement les uns par rapport aux autres. La position relative des molécules ou atomes voisins est imposée par la nature des liaisons assurant la cohésion du solide. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée, ou, quand très peu d'électricité est nécessaire (alimentation des montres, calculatrices...). Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium. [34]

II.2.8 Utilisations :

A. Semi –conducteur :

Les propriétés de semi-conducteur du silicium ont permis la création de la deuxième génération de transistors, puis les circuits intégrés (les puces). C'est aujourd'hui encore l'un

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

des éléments essentiels pour l'électronique, notamment grâce à la capacité technologique actuelle permettant d'obtenir du silicium pur à plus de 99,99999% (tirage Czochralski, zone fondue flottante).

La magie de la lithographie sur silicium : les productions commerciales courantes (2007) de circuit intégré réalisent la prouesse d'une finesse de gravure de 45 nm sur des plaques de 30 cm (12 pouces, la taille d'un disque 33 tours). Ce qui permettrait de graver 600 millions de sillons (soit un disque de 20 millions de minutes, environ 40 ans de musique, ou bien de l'ordre de 20 milliards de chansons au format numérique Ogg Vorbis [34]

B. Photovoltaïque :

En tant que semi-conducteur, le silicium est aussi l'élément principal utilisé pour la fabrication de cellules solaires photovoltaïques. Celles-ci sont alors montées en panneaux solaires pour la génération d'électricité. [34]

II.3 Techniques d'élaboration des couches minces :

II.3.1 Notion de couche mince :

Par principe, une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat". L'une des dimensions de cette couche est son épaisseur qui a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques " μm " (typiquement ce sont des couches de 10 ... 100 nanomètres d'épaisseur). Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne est une perturbation de la majorité des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés d'un corps massif très différentes. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est liée au fait que dans l'état massif on néglige généralement, avec raison, le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince sont au contraire les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. Il est assez évident que plus l'épaisseur sera faible plus cet effet de bidimensionnelle sera important.

En revanche, lorsque l'épaisseur d'une couche mince dépassera un certain seuil l'effet d'épaisseur deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif. [35]

II.3.2 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 [35] :

Tableau II.3 : *Différents milieux de dépôt de couches minces [35].*

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

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 [35] :

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 intervenantes entre les atomes du matériau à déposer et un gaz (dépôts réactifs) [36].

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 :

A. Méthodes physiques :

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

B. Méthodes chimiques :

- ✓ Dépôt chimique en phase vapeur ;
- ✓ L'épitaxie en phase vapeur ;

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

- ✓ MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition);
- ✓ Epitaxie en phase liquide ;
- ✓ Dépôt électrolytique ou électrodéposition ;
- ✓ CBD (Chemical Bath Déposition)...

Les méthodes résumées dans la Figure II.18, sont souvent capables de produire des films minces, soit 1 nm ou moins et films définis films épaisses, c'est à dire 1 μm ou plus. Cependant, il existe des techniques qui sont seulement capables de produire des films épais [35].

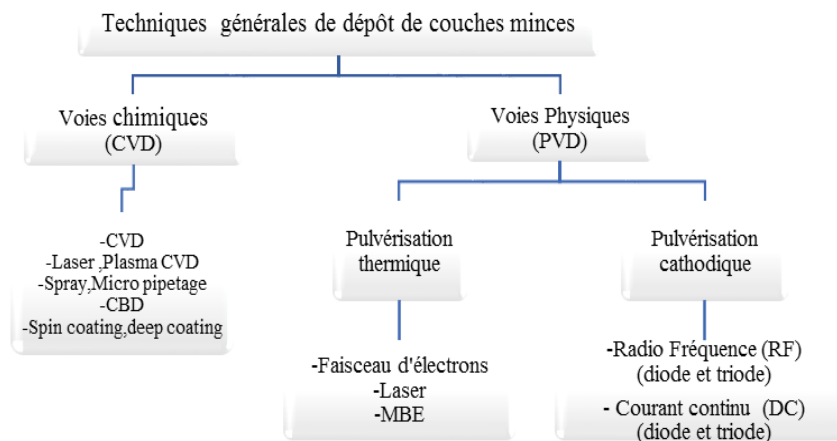


Figure II.18 : Différentes techniques de dépôt des couches mince [31]

II.3.3 Le silicium amorphe :

A. Propriétés générale :

Ce type de cellules de structure moléculaire non cristalline, nécessite moins d'énergie pour leur production que les cellules cristallines. Leur rendement actuel atteint 9% en industrie et environ 11% en laboratoire. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à faible cout en utilisant peu de matière première. La technologie du silicium amorphe permet de fabriquer des cellules semi-transparentes qui laissent passer 10% à 20% du rayonnement solaire incident .Le domaine des semi-conducteurs amorphes a été un des secteurs les plus actifs et les plus passionnants dans la physique de la matière condensée. L'avantage économique de ces matériaux et les nombreuses propriétés uniques de l'état amorphe, sont les deux raisons principales derrière l'intérêt croissant des semi-conducteurs amorphes pendant les deux dernières décennies. Bien qu'il y ait plusieurs inconvénients comme le manque de reproductibilité, les mobilités basses et les densités élevées de défauts, ces matériaux peuvent être de bons candidats de remplacement rentables pour leurs contreparties cristallines. Parmi ce groupe de matériaux, le silicium amorphe véhicule un intérêt considérable.

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

La figure suivante montre une comparaison entre la structure du silicium cristallin et le silicium amorphe. [35]

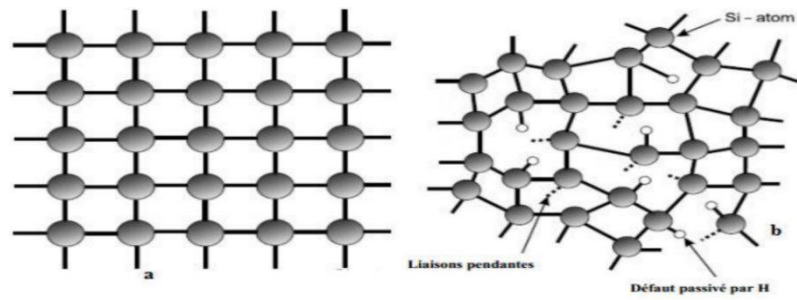


Figure II.19 : (a) Structure cristalline du silicium, (b) Structure amorphe du silicium. [36]

Le silicium amorphe présente de faibles variations de longueur et d'angle de liaison qui ont pour conséquence d'éliminer l'ordre après quelques distances atomiques. Ce désordre engendre des queues de bandes de conduction et de valence dans la densité d'état du matériau. Dans le réseau aléatoire du silicium amorphe, les défauts sont également présents sous forme d'atomes de silicium qui ont seulement trois liens covalents avec des voisins. Le quatrième lien non satisfait s'appelle liaisons pendantes. La concentration des liaisons pendantes dans le silicium amorphe non hydrogéné est de l'ordre de 10^{19} à 10^{20} cm^{-3} . Ces liaisons pendantes créent des états électroniques dans la région centrale du gap qui rendent le matériau tout à fait difficile pour des applications électroniques. Heureusement, ces liaisons pendantes peuvent être passivées facilement par l'atome d'hydrogène, qui vient se lier aux atomes de Si là où les liaisons étaient cassés donc la concentration des liaisons pendantes est réduite à des valeurs d'environ $\sim 10^{15}$ à 10^{16} cm^{-3} . Dès qu'un électron occupe un état au-dessus de la bande de valence (EV) ou sous la bande de conduction (EC), sa fonction d'onde devient localisée et sa mobilité quasi nulle. Puisqu'il serait inexact de parler de bande interdite (vu la présence d'états dans le gap), on désigne cet intervalle entre EC et EV où l'électron est immobile, comme gap de mobilité. D'une façon générale, la valeur du gap de mobilité se trouve entre 1,7 eV et 1,9 eV. Le gap optique détermine l'énergie minimum des photons qui peuvent être absorbés et contribués à la conversion photovoltaïque, qui est environ 0,02 eV inférieure au gap de mobilité dans l'a-Si:H [37].

B. Elaboration de la cellule solaire à base de silicium amorphe :

Depuis les années 70, la technique adoptée industriellement et dans les laboratoires pour la synthèse de couches de silicium amorphe hydrogéné est la méthode dite PECVD, de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma radio fréquence (13,56 MHz). La figure II.20 présente un schéma de réacteur PECVD et quelques réactions se produisant à la surface du

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

dépôt. Les gaz sources sont le silane SiH_4 , l'hydrogène H_2 et, pour les gaz dopants, le diborane (B_2H_6) et la phosphine (PH_3) [38].

Dans le plasma, les collisions inélastiques entre les électrons de haute énergie (accélérés par le champ électrique RF) et le silane génèrent des radicaux, des ions et des espèces excitées. Les espèces réactives produites dans le plasma vont se condenser sur le substrat pour former (atome après atome) une couche mince, en général dés ordonnée. On peut ainsi déposer des couches sur de grandes surfaces (pouvant atteindre 4 m^2), à relativement basse température (typiquement entre $100 \text{ }^\circ\text{C}$ et $300 \text{ }^\circ\text{C}$), donc sur des substrats peu chers [38].

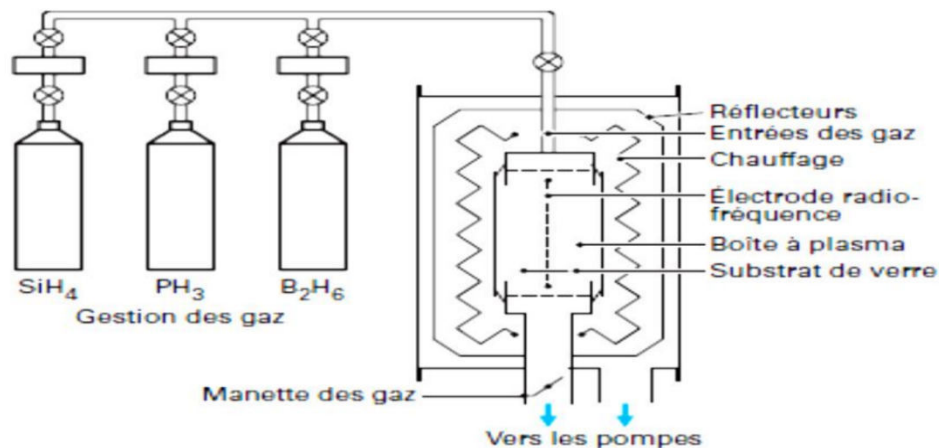


Figure II.20 : Schéma de dépôt PECVD dans une boîte à plasma d'un module à l'a-Si : H [12].

II.3.4 Le tellure de cadmium (CdTe) :

Le CdTe est un semi-conducteur composé du groupe II-VI avec une bande de gap direct qui est très adéquat pour la conversion de la lumière du spectre solaire en énergie électrique. La bande de gap direct, 1.5 eV , et le coefficient d'absorption élevé $> 5.105 \text{ cm}^{-1}$ du CdTe donne une collecte élevée des photons incidents dans une large gamme de longueurs d'ondes. Des photons de courtes longueurs d'onde, avec des énergies plus grandes qu' E_g , sont absorbés à la surface, faisant du CdTe un matériau attrayant pour les cellules solaires en couches minces. L'épaisseur de la couche CdTe utilisé est de l'ordre de $2 \mu\text{m}$ [39].

A. La structure cristalline :

Le tellure de cadmium (CdTe) formé à partir d'un élément du groupe II (Zn, Cd, Hg) et d'un du groupe VI (O, S, Se, Te) de la classification périodique des éléments.

La structure cristallographique du CdTe est du type zinc-blende. Les atomes de cadmium et de tellure sont disposés selon deux réseaux cubiques à faces centrées (cfc) décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale du cube du réseau. Les nœuds d'un des réseaux

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

cubiques à faces centrées sont occupés par les atomes de cadmium (Cd) tandis que ceux de l'autre réseau sont occupés par les atomes de tellure (Te). Ainsi, autour de chaque atome d'une espèce, quatre atomes de l'autre espèce sont disposés aux sommets d'un tétraèdre régulier. Le réseau cristallin de la structure zinc-blende est schématisé Figure (II.21) [40].

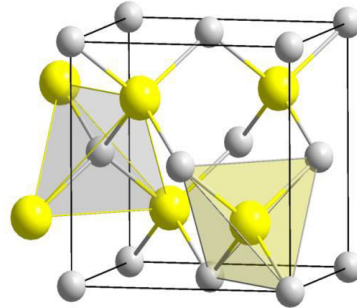


Figure II.21 : Cubique, de groupe d'espace $3m$, la structure du CdTe est basée sur un empilement cubique de cadmium, le tellure occupant la moitié des cavités tétraédriques ainsi formées (structure dite « zinc-blende »). [40]

B. Elaboration du CdTe :

La plupart des cellules au CdTe utilisent en superstrat une couche de CdS de type N, dont le gap très élevé de 2.4 eV, lui permet d'agir comme fenêtre d'entrée de la lumière et comme barrière de potentiel (hétérojonction CdS-CdTe). La couche fenêtre a en général une épaisseur de quelques dixièmes de microns. Le procédé de fabrication nécessite qu'au moins une étape se fasse à plus de 400°C, qu'il s'agisse du dépôt de CdTe ou du recuit postérieur indispensable. On ne sait toujours pas bien contrôler le dopage de type P du CdTe, naturellement N, à cause des lacunes de Cd. Un traitement avec Cd Cl₂ est trouvé bénéfique. Tout à la fois, il passive les grains, accroît leur taille et dope. On doit ajouter une couche ZnTe de type P, ce qui complique encore les procédés, rajoutant deux interfaces à caractériser.

Un autre problème difficile à résoudre est la formation d'un contact ohmique sur le CdTe à la fois bon et stable dans le temps. On cherche à enrichir la surface en Te pour minimiser la résistance de contact. Beaucoup utilisent une couche intermédiaire de graphite ou de carbone entre le CdTe et le métal. Il reste enfin un manque de compréhension dans la formation de la jonction P-N. Il semblerait qu'on ait affaire à une jonction N-P enterrée dans la couche de CdTe [39].

II.4 Fabrication des cellules et assemblage du module photovoltaïque :

II.4.1 Fabrication des cellules :

Chaque fabricant de module photovoltaïque basé sur le silicium, mono ou multicristallin, développe sa propre chaîne de production avec des choix technologiques différents. Cependant,

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

il est possible de définir une série d'étapes communes pour la production de cellules solaires multicouches :

- Décapage de la surface du wafer dans un bain acide : élimination des défauts superficiels créés par le sciage,
- Texturation de la surface du wafer par gravure sélective dans un bain alcalin : collecte améliorée des photons en réduisant la réflexion (confinement optique),
- Dopage de la face avant de type n par diffusion thermique (800-900°C) de phosphore : création d'une jonction p-n à la base de l'effet photovoltaïque,
- Gravure plasma avec un mélange de tétrafluorométhane et d'oxygène soumis à un champ électromagnétique à radiofréquence : retrait de la couche dopée n sur les côtés de la jonction,
- Dépôt à base d'oxyde ou de nitrure de silicium par PECVD sur la face avant : couche antireflet et passivation de la surface pour limiter la recombinaison de charges,
- Dopage de la face arrière de type p par diffusion thermique (850°C) d'aluminium : conducteur ohmique avec l'électrode arrière,
- Métallisation par sérigraphie d'argent (face avant) et par frittage de pâtes d'aluminium (face arrière) : amélioration du contact électrique avec les électrodes de collecte de porteurs de charge. [24]

II.4.2 Assemblage des modules :

Les cellules sont ensuite raccordées en chaîne, puis la matrice est encapsulée et encadrée et enfin, le module est connecté à une boîte de jonction permettant son raccordement électrique Figure (II.22).

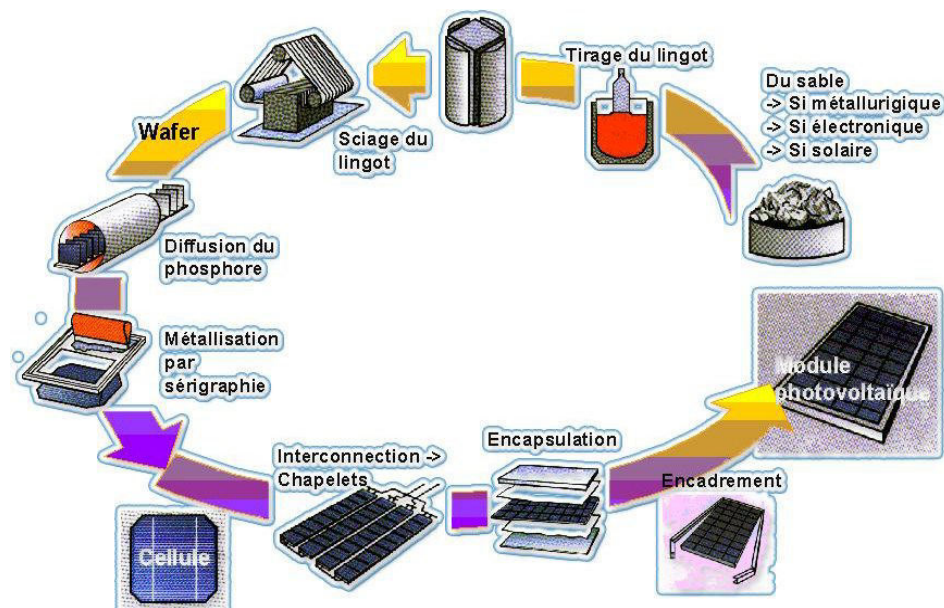


Figure II.22 : Enchaînement des étapes de fabrication d'un système photovoltaïque au silicium cristallin [41]

Ch. II Techniques d'élaboration des matériaux destinés à la conversion PV

II.5 Conclusion :

Le silicium reste le matériau semi-conducteur le plus utilisé dans la fabrication des cellules solaires. Plusieurs méthodes d'élaboration sont mises en œuvre pour l'élaboration de ce matériau. Soit comme monocristallin, polycristallin.

Malheureusement, toutes ces méthodes se heurtent à des problèmes gradient thermiques qui influe sur la qualité cristalline du matériau. Cependant, la réalisation de cellule solaire en couches minces de silicium apparaît comme solution prometteuse, grâce aux nombreux avantages qu'elle présente comme la réduction du coût de la cellule.

*Chapitre III : Généralités sur les
Cellules Photovoltaïques*

Sommaire

<i>III.1 Introduction</i>	40
<i>III.2 La cellule et l'effet photovoltaïque</i>	40
<i>III.2.1 Structure de La cellule PV</i>	40
<i>III.2.2 L'effet photovoltaïque</i>	41
<i>III.2.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque</i>	42
<i>III.3 Différentes caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque</i>	43
<i>III.3.1 Caractéristique courant-tension</i>	43
<i>III.3.2 Paramètres externes d'une cellule solaire photovoltaïque</i>	44
<i>III.3.3 Influence des résistances série et shunt</i>	46
<i>III.3.4 Influence de l'éclairement</i>	47
<i>III.3.5 Influence de la température</i>	48
<i>III.4 Générateur photovoltaïque (GPV)</i>	48
<i>III.4.1 La constitution d'un module photovoltaïque</i>	48
<i>III.4.2 Regroupement des cellules</i>	49
<i>III.4.3 Les panneaux photovoltaïques</i>	51
<i>III.5 Technologies des cellules photovoltaïques</i>	52
<i>III.6 Avantages et inconvénients d'une installation PV</i>	52
<i>III.6.1 Avantage</i>	52
<i>III.6.2 Inconvénients</i>	53
<i>III.7 Conclusion</i>	54

III.1 Introduction :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par un français, Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958 [42]. C'était le seul procédé non nucléaire d'alimentation des satellites en énergie.

Il faut savoir par exemple que les images satellites reçues par notre téléviseur ne nous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque.

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été entrepris pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres [42].

La croissance de l'industrie photovoltaïque est depuis lors spectaculaire.

Quelques autres dates ... :

1839 : Découverte de l'effet photovoltaïque par Alexandre Edmond Becquerel. Il avait observé que certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. Il démontra qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en électricité.

1873 : Découverte de la photoconductivité du sélénium par Willoughby Smith.

1954 : Trois chercheurs américains, Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller, 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[42].

III.2 La cellule et l'effet photovoltaïque :**III.2.1 Structure de La cellule PV :**

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle

de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,

- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

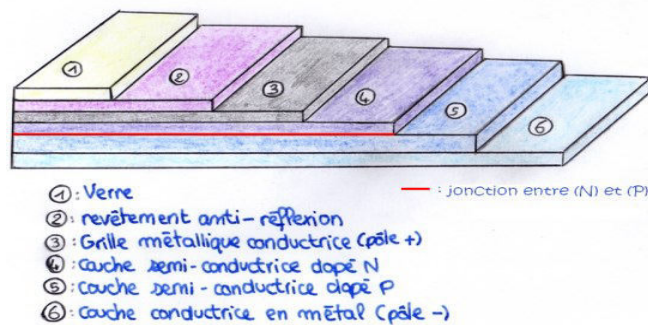


Figure III.1 : Structure Basique d'une cellule solaire [43]

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [43].

III.2.2 L'effet photovoltaïque :

A. Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV :

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées par la figure III.2. Sans éclairage, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène,

aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau E_g . La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe, selon les matériaux et la structure de la jonction [44].

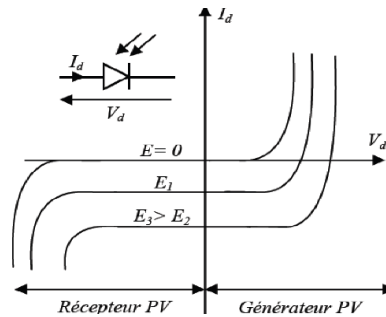


Figure III.2 : Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements (E) [44]

III.2.3 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 (électron / trou) créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure III.3.

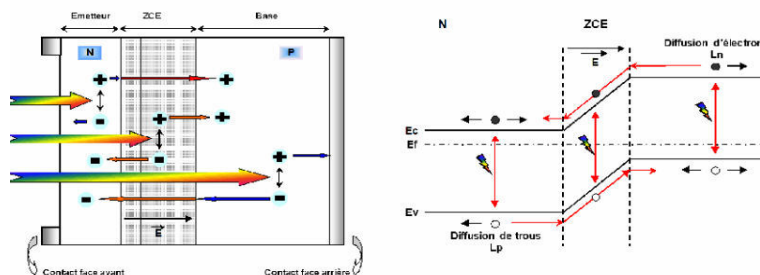


Figure III.3 : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque [45].

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 une photo 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 une photo courant de génération [46].

III.3 Différentes caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque :

III.3.1 Caractéristique courant-tension :

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh} comme le montre le schéma équivalent de la figure III.4.

La résistance série (R_s) est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière.

La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule. [47]

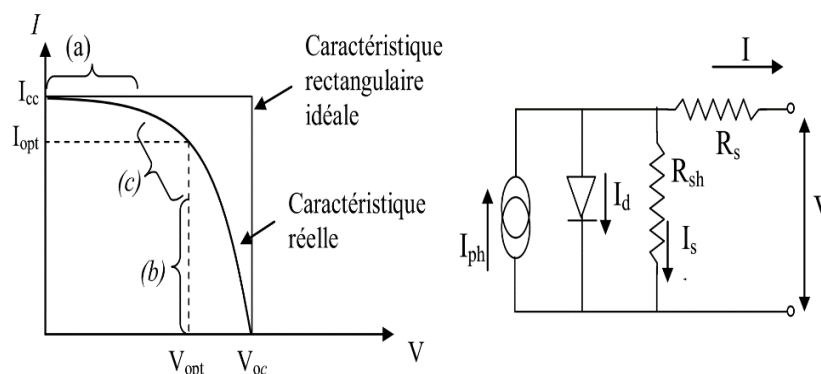


Figure III.4 : caractéristique et Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque [48].

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} ,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement. [48]

Le courant de la photopile a pour expression :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (III.1)$$

Avec

- I_{ph} : est la Photo-courant de cellule, proportionnel à l'insolation E_s .

$$I_{ph} = I_{sc} \frac{E_s}{1000} \quad (III.2)$$

Ce courant correspond également au de courant court-circuit I_{cc} , avec :

$$I_{CC}(S.C.curent) \cong I_{sc}$$

Où ce courant est atteint lorsque l'insolation (E_s) tient la valeur maximale 1000 w/m².

- I_d : est le courant traversant la diode.

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{q(V+R_s x I)}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (III.3)$$

On peut faire apparaître le potentiel thermodynamique

$$V_T = \frac{nkT}{q} \quad (III.4)$$

Avec

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode

q : Charge de l'électron (1.6×10^{-19} C).

K : Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} j/°K).

n : Facteur d'idéalité (pratiquement $1 \leq n \leq 5$).

T : Température de la jonction (en °K).

- I_r : est le courant dérivé par la résistance shunt.

$$I_r = \frac{V+R_s x I}{R_{sh}} \quad (III.5)$$

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique courant-tension [47] :

$$I = I_{sc} \left(\frac{E_s}{1000} \right) - I_0 \left(\exp\left(\frac{q(V+R_s x I)}{nkT}\right) - 1 \right) - \frac{V+R_s x I}{R_{sh}} \quad (III.6)$$

III.3.2 Paramètres externes d'une cellule solaire photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [47] :

▪ **Courant de court-circuit** : c'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation de « I », on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{R_s \times I_{sc}}{V_T}\right) - 1 \right) - \frac{R_s \times I_{cc}}{R_{sh}} \quad (III.7)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme « $I_0 \left(\exp\left(\frac{R_s \times I_{sc}}{V_T}\right) - 1 \right)$ » devant I_{ph} .

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (III.8)$$

▪ **Tension de circuit ouvert** : c'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_{co}}{V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (III.9)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \left(\ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) + 1 \right) \quad (III.10)$$

▪ **Puissance optimale et facteur de forme** : la puissance utile maximale

$$P_m = V_m \times I_m \quad (III.11)$$

S'obtient en optimisant le produit courant tension.

Quant au facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), il est défini par :

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{sc}} \quad (III.12)$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe courant-tension par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{sc}) qui correspond à la photopile idéale. Les valeurs de I_m et V_m s'obtiennent à partir des équations (A) et (B). Pour cela, on distingue deux cas :

✓ Si R_{sh} est infinie la dérivation mène à la résolution de l'équation non linéaire en I_m , et permet donc le calcul de V_m .

✓ Si R_{sh} est considérée finie, la dérivation mène à la résolution d'une équation non linéaire en V_m .

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts-crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement (E_s) de 1000 W/m² et à une température de 25°C. [47]

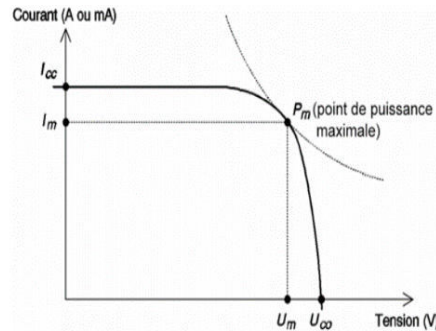


Figure III.5 : Schéma d'une cellule élémentaire. [47]

▪ Rendement de conversion :

La puissance $P=V \cdot I$ est nulle en court-circuit et en circuit-ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique I-V. Ce maximum P_m peut être déterminé en portant sur la même graphique la caractéristique I-V et les hyperboles de puissance constante. Le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangence des deux courbes comme le montre la figure (III.5). Le rendement est :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (III.13)$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm²

La densité de puissance incidente égale à P_{in}/A

A : section de la cellule

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. [47]

III.3.3 Influence des résistances série et shunt :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La « figure III.6.a » montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de R_s . Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe $I = f(V)$ dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension (à droite du point M de la « figure III.5 »). La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs de courant. La « figure III.6.b » montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant (à gauche du point M de la « figure III.5 »). Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. [47]

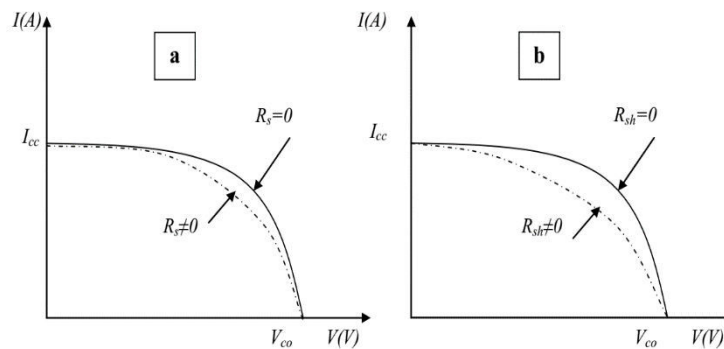


Figure III.6 : Influences des résistances séries et shunts. [47]

III.3.4 Influence de l'éclairement :

Le photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou au flux lumineux. Le courant, étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, et normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous une faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charges et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement. Le photo-courant créé dans une cellule solaire photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire ; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée. La figure III.7 représente les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque (jonction p-n sur du silicium monocristallin de 57 mm de diamètre) à 28°C et sous diverses valeurs de l'éclairement. A chacune de ces valeurs de flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à une chute du flux lumineux. [47]

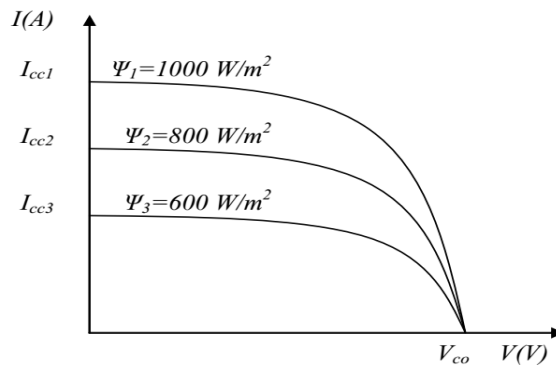


Figure III.7 : Influence de l'éclairement. [47]

III.3.5 Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de $3 \cdot 10^{-2} \text{ mA} \cdot \text{K}^{-1}$ par cm^2 de cellule et par conséquent le courant I , ce qui engendre une diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} (figure III.8). L'augmentation de la température se traduit aussi par la diminution de la puissance maximale disponible, de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5} \text{ W/K}$ par cm^2 de cellule, soit une variation de 0,35% par degré. [47]

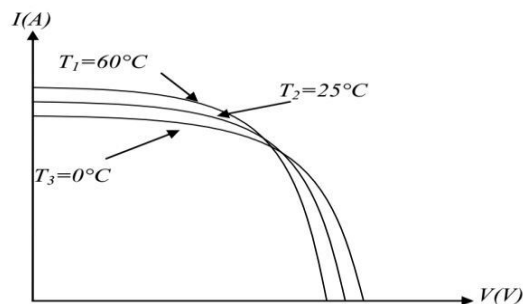


Figure (III.8) : Influences de la température. [47]

III.4 Générateur photovoltaïque (GPV) :

III.4.1 La constitution d'un module photovoltaïque :

- Câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+),
- Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle),
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation,
- Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière,
- La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR,

- Connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass,
- Les deux câbles unipolaires sont raccordés. [48]

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par [48] :

$$P_{pv} = N_s \times V_{pv} \times N_p \times I_{pv} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

P_{pv} : La puissance disponible en sortie du GPV,

I_{pv} : Le courant de sortie du GPV,

V_{pv} : La tension à la sortie du GPV,

III.4.2 Regroupement des cellules :

A. Regroupement en série :

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure III-10. L'équation (III-9) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules [48].

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (\text{III.9})$$

$$I_{cc} = I_c \quad (\text{III.10})$$

Avec :

V_{coNs} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série,

I_{ccNs} : courant de court-circuit de N_s cellules en série,

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{coNs} = 0.6V * 36 = 21.6 \text{ Volt}$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau Vop proche de celle d'une tension de batterie de 12V [48]

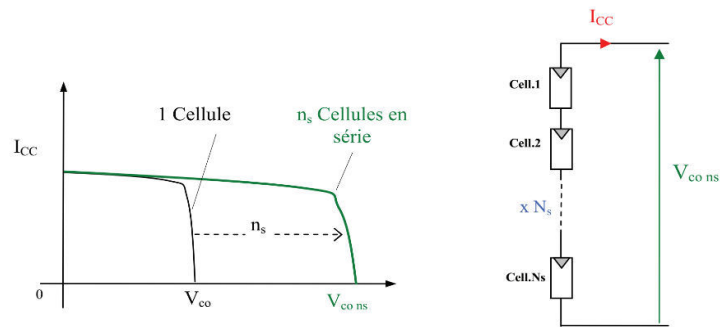


Figure III.9 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série [49]

B. Regroupement en parallèle :

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, figure III-11. L'équation (III-11) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules [48].

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{sc} \tag{III.11}$$

$$V_{co} = V_{CoNp} \tag{III.12}$$

Avec :

I_{ccNp} : la somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle,

V_{coNp} : tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle,

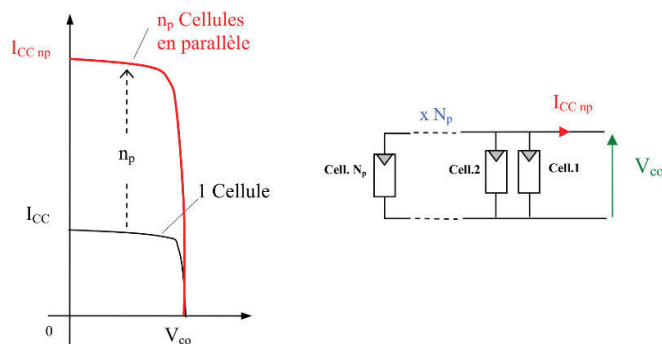


Figure III.10 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle [49]

C. Regroupement hybride (en série et en parallèle) :

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = N_p \times I_{cc} \tag{III.13}$$

$$V_{co}^t = N_s \times V_{Co} \tag{III.14}$$

Avec :

N_p : nombre des cellules en parallèle,

N_s : nombre des cellules en série.

La figure III-12 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle N_p , cellules identiques.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{co} sont plus ou moins importantes (figure III-12). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes). [48]

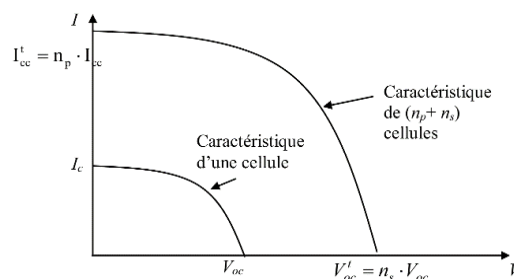


Figure III.11 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(N_p + N_s)$ cellules identiques [48]

III.4.3 Les panneaux photovoltaïques :

L'association de plusieurs modules dans un même plan s'appelle un panneau et le montage de plusieurs panneaux en rangées de panneaux série et parallèle forme un champ photovoltaïque ou ce que l'on appelle parfois une sous-station photovoltaïque, le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux photovoltaïques montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands.

La figure (III.13) présente un tel groupement de Nms module en série dans une branche et Nbp branches en parallèle. Si P_m , V_m , I_m et R_m sont les caractéristiques du module de base ; la puissance crête, la tension du fonctionnement, la tension maximale, le courant du

fonctionnement, le courant maximal - et la résistance de charge optimale respectivement, les caractéristiques correspondantes de la sous-station seront . [50]

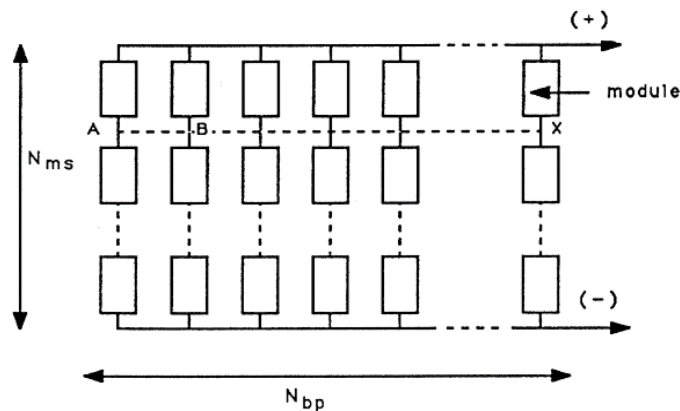


Figure III.12 : Sous station formée d'un groupement de N_{ms} modules séries et de N_{bp} branches parallèles [50]

III.5 Technologies des cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes :

➤ **la première technologie :** photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité et de 12 à 15 %.

➤ **La deuxième technologie :** fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.

➤ **La troisième technologie** fait appel à d'autres matériaux semi-conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs), cette technologie des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes. [51]

III.6 Avantages et inconvénients d'une installation PV :

III.6.1 Avantage :

➤ 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 Méga Watt.

➤ 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 [52].

III.6.2 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 % (soit entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées. Tributaire des conditions météorologiques.

➤ 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 [52].

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le mode de la conversion photovoltaïque qui connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et module photovoltaïque.

*Chapitre IV : Étude comparative des
panneaux solaires PV à Oued
Nechou Ghardaïa*

Sommaire

<i>IV.1 Introduction</i>	55
<i>IV.2 Présentation de la centrale</i>	55
<i>IV.2.1 Coordonnées géographiques de Wilaya de Ghardaïa</i>	55
<i>IV.2.2 Localisation du site</i>	55
<i>IV.2.3 Le choix de localité</i>	55
<i>IV.2.4 Objectif</i>	56
<i>IV.2.5 Principe de fonctionnement de la centrale</i>	56
<i>IV.2.6 Schéma unifilaire</i>	61
<i>IV.2.7 Rendement Photovoltaïque</i>	62
<i>IV.2.8 Caractéristiques électriques des différentes technologies des Panneaux</i>	62
<i>IV.2.9 Onduleur photovoltaïque</i>	63
<i>IV.3 Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques</i>	64
<i>IV.4 Etude comparative expérimentale</i>	64
<i>IV.4.1 Données climatiques couvrant l'année de comparaison</i>	65
<i>IV.4.2 Comparaison mensuelle des rendements entre les différentes technologies</i>	66
<i>IV.4.3 Comparaison annuelle des rendements entre les différentes technologies</i>	74
<i>IV.4.4 Comparaison journalière des rendements entre les différentes technologies</i>	75
<i>IV.5 Conclusion</i>	79

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

IV.1 Introduction :

Ce chapitre est destiné à l'étude comparative des performances des panneaux monocristallins, polycristallin, amorphe et le couche mince CdTe du système photovoltaïque installé à la centrale d'Oued Nechou Ghardaïa.

En effet la comparaison est effectuée par un analyse expérimentale du système photovoltaïque pour déterminer le type de panneau photovoltaïque le mieux adapté au site de Ghardaïa.

IV.2 Présentation de la centrale :

La centrale solaire photovoltaïque de 1,1MW de Ghardaïa, s'inscrit dans le cadre du programme national de développement des énergies renouvelables, mis en place par le ministère de tutelle. [53]

IV.2.1 Coordonnées géographiques de Wilaya de Ghardaïa :

Latitude 32.48° nord

Longitude 3.66°

Altitude 500 m.

IV.2.2 Localisation du site :

Cette centrale située à Oued Nechou à environ 15 km au Nord de la ville de Ghardaïa sur la route national RN°01 (PK581-PK582), dont les coordonnées géographiques :

✚ Longitude de la station climatologique de Ghardaïa 32°24N 03°48 E.

✚ La superficie totale du site est de dix (10) hectares environ. Seulement une partie de six (06) hectares est destinée à la centrale, l'autre partie est réservée pour des extensions futures.

✚ Le terrain du site est limité comme suit et illustre sur figure :

✚ Au Nord : route nationale N°01.

✚ Au Sud : terrain vague.

✚ A l'Est : terrain vague.

✚ A l'Ouest : route nationale N°01.

IV.2.3 Le choix de localité :

Le choix de la localisation de ce projet obéit à plusieurs critères, liés particulièrement à l'existence d'un terrain plat et sa situation à proximité d'un poste de transformation qui permettrait l'évacuation de l'énergie produite. [53]

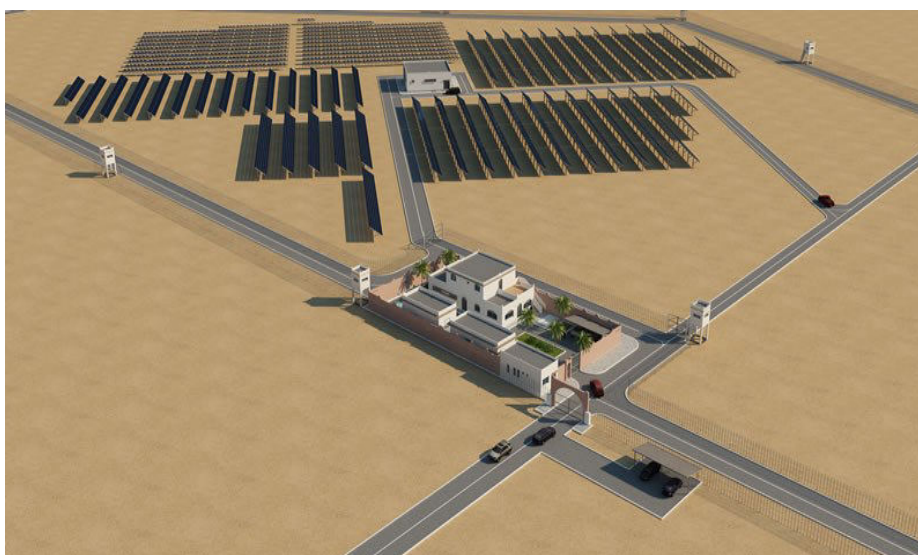


Figure IV.1 : Localisation de la centrale à la route nationale N°1[53]

IV.2.4 Objectif :

Tester le comportement des quatre technologies - le silicium monocristallin, le polycristallin, l'amorphe et la technique de la couche mince - de panneaux photovoltaïque, onduleurs, transformateurs et système de commande fixe / mobile (Suiveur) et leurs adaptation au climat du sud et aux conditions optimales de l'exploitation. [53]

IV.2.5 Principe de fonctionnement de la centrale :

L'électricité est produite en courant continu par les modules, puis transformée en courant alternatif via huit onduleurs photovoltaïques connectés à chacune des chaînes comme suit et illustre sur le tableau.

Tableau IV.1 : Répartition de la puissance de la centrale par Sous-Champ. [53]

Numéro Sous-champ	Type	Structure	Puissance du module (Wc)	Nombre de Chaines / sous champ	Nombre Modules / Chaîne	Puissance du sous- champ (Wc)
1	Mono	Motorisé	245	21	20	102 900
2	Poly		235	21	20	102 900
3	CdTe	Fixe	86	105	20	249 900
4	a-Si		103	54	20	98 700
5	Mono		245	21	20	98 700
6	Poly		235	21	20	256 500
7	Mono		245	51	12	108 000
8	Poly		235	55	18	100 6

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

➤ **Sous champs 1 : Technologie Monocristallin sur structure motorisée.**



Figure IV.2 : *Sous champs (1) : Technologie Monocristallin sur structure motorisée.[53]*

- *Panneaux Monocristallin d'une puissance de 250 Wc, $\eta=15,35\%$,*
- *Puissance globale installée : 105 Kwc aux conditions STC,*
- *Nombre des panneaux installés : 420 panneaux,*
- *Superficie totale des panneaux : 684 m².*

➤ **Sous champs 2 : Technologie Polycristallin sur structure motorisée.**



Figure IV.3 : *Sous champs (2) : Technologie Polycristallin sur structure motorisée.[53]*

- *Panneaux Polycristallin d'une puissance de 235 Wc, $\eta=14,43\%$,*
- *Puissance globale installée : 98.7 Kwc aux conditions STC,*
- *Nombre des panneaux installés : 420 panneaux,*
- *Superficie totale des panneaux : 684 m².*

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

➤ **Sous champs 3 : Technologie Couche mince CdTe sur structure fixe.**



Figure IV.4 : *Sous champs (3) : Technologie Couche mince CdTe sur structure fixe.[53]*

- *Panneaux Couche mince CdTe d'une puissance de 80 Wc, $\eta=11,11\%$,*
- *Puissance globale installée : 101 Kwc aux conditions STC,*
- *Nombre des panneaux installés : 1206 panneaux,*
- *Superficie totale des panneaux : 907 m².*

➤ **Sous champs 4 : Technologie couche mince Amorphe a-Si sur structure fixe**



Figure IV.5 : *Sous champs(4) : Technologie couche mince Amorphe a-Si sur structure fixe.[53]*

- *Panneaux Couche mince CdTe d'une puissance de 103 Wc, $\eta=7,1\%$,*
- *Puissance globale installée : 100 Kwc aux conditions STC,*
- *Nombre des panneaux installés : 972 panneaux,*
- *Superficie totale des panneaux : 1409 m².*

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

➤ **Sous champs 5 : Technologie Monocristallin sur structure fixe.**



Figure IV.6 : *Sous champs(5) : Technologie Monocristallin sur structure fixe.[53]*

- *Panneaux Monocristallin d'une puissance de 250 Wc, $\eta=15,35\%$,*
- *Puissance globale installée : 105 Kwc aux conditions STC,*
- *Nombre des panneaux installés : 420 panneaux,*
- *Superficie totale des panneaux : 684 m².*

➤ **Sous champs 6 : Technologie Polycristallin sur structure fixe.**



Figure IV.7 : *Sous champs (6) : Technologie Polycristallin sur structure fixe.[53]*

- *Panneaux Polycristallin d'une puissance de 235 Wc, $\eta=14,43\%$,*
- *Puissance globale installée : 98.7 Kwc aux conditions STC,*
- *Nombre des panneaux installés : 420 panneaux,*
- *Superficie totale des panneaux : 684 m².*

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

➤ **Sous champs 7 : Technologie Monocristallin sur structure fixe.**



Figure IV.8 : *Sous champs (7) : Technologie Monocristallin sur structure fixe.[53]*

- *Panneaux Monocristallin d'une puissance de 250 Wc, $\eta=15,35\%$,*
- *Puissance globale installée : 255 Kwc aux conditions STC,*
- *Nombre des panneaux installés : 1020 panneaux,*
- *Superficie totale des panneaux : 1661 m².*

➤ **Sous champs 8 : Technologie Polycristallin sur structure fixe.**



Figure IV.9 : *Sous champs (8) : Technologie Polycristallin sur structure fixe.[53]*

- Panneaux Polycristallin d'une puissance de 235 Wc, $\eta=14,43\%$,*
- *Puissance globale installée : 285.5 Kwc aux conditions STC,*
- *Nombre des panneaux installés : 1100 panneaux,*
- *Superficie totale des panneaux : 1791 m².*

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

IV.2.6 Schéma unifilaire :

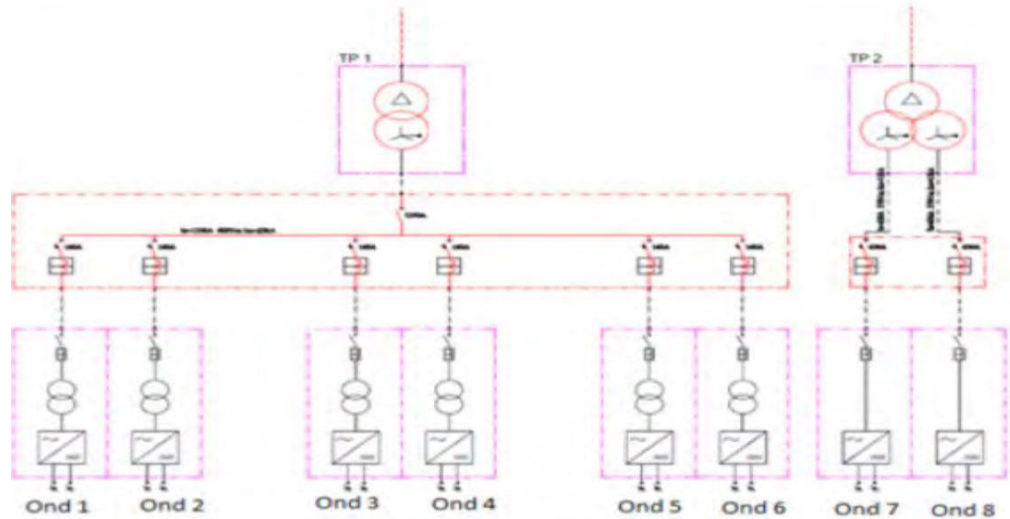


Figure IV.10 : Schéma unifilaire de la centrale. D'oued Nechou. [53]

L'électricité, produite et injectée sur le réseau, est comptabilisée par un compteur de production électrique.

L'intégralité de la production est injectée au réseau, l'électricité produite sera consommée surplace. En effet, comme l'électricité emprunte toujours le chemin le plus court, c'est l'utilisateur le plus proche qui bénéficie de l'électricité produite. [53]

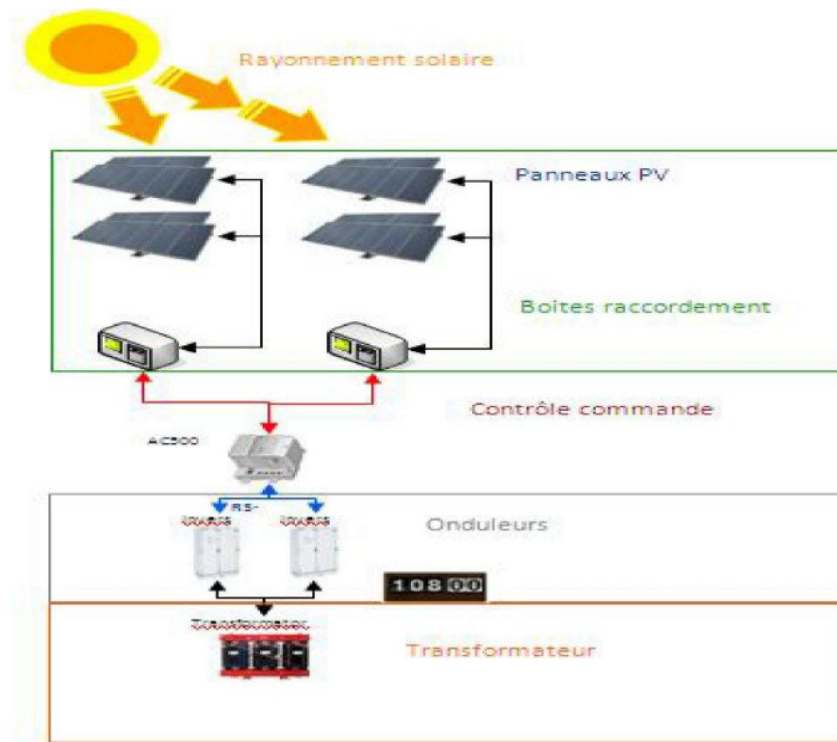


Figure IV.11 : Schéma de principe de la centrale photovoltaïque d'Oued Nechou Ghardaïa. [53]

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

IV.2.7 Rendement Photovoltaïque :

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ces composants et définit leur performance.

Le rendement est fonction du type de semi-conducteur utilisé et est directement lié au «band gap». Pour le silicium cristallin, le rendement théorique maximum est de 44 %. Le silicium n'est pas le meilleur matériau, son «band gap» est de 1.10 eV, celui de l'arséniure de gallium (GaAs) à un «band gap» quasi optimal de 1.4 eV. Le rendement commercial des cellules monocristallines est de l'ordre de 12 à 17 % maximum. [54]

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie du rayonnement reçue. [32]

IV.2.8 Caractéristiques électriques des différentes technologies des Panneaux :

Tableau IV.2 : Les différentes technologies des Panneaux (voir l'annexe)

Caractéristiques électriques	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin	Silicium amorphe (a-Si)	Couche mince (CdTe)
Type	SOLARIA S6M-2G	A-235P Pays d'origine (Espagne)	SCHOTT ASI 103	FIRST SOLAR FS-380
Puissance de crête	245 Wc	235 Wc	103 Wc (valeur stabilisée)	80 Wc
Tolérance de la puissance de crête	0 / +5 Wc	0 / +5 Wc	125 W c (valeur initiale)	+/- 5%
Tension max (V_{mpp})	30,33 V	29,04 V	30,9 V (valeur stabilisée)	48,5 V
Intensité max (I_{mpp})	8,08 A	8,10 A	3,33 A (valeur stabilisée)	1,65 A
Tension circuit ouvert	37,82 V	36,94 V	41,1 V (valeur stabilisée)	60,8 V
Courant de court-circuit	8,52 A	8,64 A	3,94 A (valeur stabilisée)	1,88 A
Tension max. du système	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

IV.2.9 Onduleur photovoltaïque :

Les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques systèmes au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui ont contribué très fortement à faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière du système.

A. Rôle :

Cet appareil électronique, géré par un microprocesseur, garantit que le courant produit répond exactement aux normes fixées par le gestionnaire du réseau. Il est responsable de la stabilité du courant (voltage, fréquence, émission d'harmoniques, etc.) et assure la sécurité du système (protection de découplage)

B. Caractéristiques :

L'onduleur se présente sous la forme d'un boîtier métallique, muni d'un radiateur ou d'un ventilateur. Il doit être placé dans un espace ventilé et le plus près possible des modules photovoltaïques afin de limiter les pertes d'électricité en ligne. Il n'émet aucun bruit et le champ électromagnétique est très faible, inférieur à celui d'une plaque à induction. L'onduleur a une durée de vie limitée de 8 à 10 ans, [55]



Figure IV.12 : *l'onduleur solaire [53]*

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique. En effet, en plus de l'objectif de conversion DC/AC, la principale caractéristique de l'onduleur photovoltaïque est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système, appelé MPPT. [55]

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

MPPT est l'abréviation de "Maximal Power Point Tracking", qui signifie en Français « Recherche du Point de Puissance Maximum ». Les onduleurs photovoltaïques disposent d'un système intégré permettant de détecter et de se caler sur le point de puissance maximum du groupe photovoltaïque. Le MPPT force donc le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique. Cependant, le système MPPT ne fonctionne que pour une plage de tension d'entrée d'onduleur définie par le fabricant. Lorsque la tension d'entrée de l'onduleur côté DC est inférieure à la tension minimale MPPT, l'onduleur continue de fonctionner mais fournit au réseau la puissance correspondante à la tension minimale MPPT.

IV.3 Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques :

Figure IV.3 : Tableau comparatif des cellules photovoltaïques [56]

Technologie	Monocristallin (Mono)	Polycristallin (Poly)	Amorphe (a-Si)	Tellure de cadmium (CdTe)
Rendement	Très bon rendement : 14 à 20 %.	Bon rendement : 11 à 15 %.	Rendement faible : 5 à 9 %.	Rendement faible : 7 à 9%
Durée de vie	importante (30 ans)	importante (30 ans)	importante (20 ans)	importante (25 ans)
Coût de fabrication	élevé.	meilleur marché que les panneaux monocristallins	peu onéreux par rapport aux autres technologies	coût élevé dû à la superposition de deux cellules
Caractéristiques	-Rendement faible sous un faible éclairement. - Perte de rendement avec l'élévation de la température.	- Rendement faible sous un faible éclairement. - Perte de rendement avec l'élévation de la température.	- Fonctionnement correct avec un éclairement faible. - Peu sensible aux températures élevées. -Rendement faible en plein soleil. -Performances diminuant avec le temps.	- Production énergétique élevée dans une large gamme de conditions climatiques, avec une excellente sensibilité à la faible luminosité. -Performances diminuant avec le temps.

Le tableau comparatif (Tableau IV.3) révèle que le monocristallin a un très bon rendement, mais aussi le plus chère, le polycristallin a un bon rendement et moins chère que le monocristallin, l'amorphe a un rendement faible en plein soleil mais son fonctionnement n'est pas sensible aux faibles éclaircissements, et enfin le CdTe à un rendement faible avec une excellente sensibilité à la faible luminosité et un faible coefficient de sensibilité à la température.

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

IV.4 Etude comparative expérimentale :

Le but de notre projet est l'étude comparative entre les différentes technologies des panneaux solaires sur structure fixe (Sous champ 3, 4 ,5 et 6) à Oued Nechou - Ghardaïa.

IV.4.1 Données climatiques couvrant l'année de comparaison :

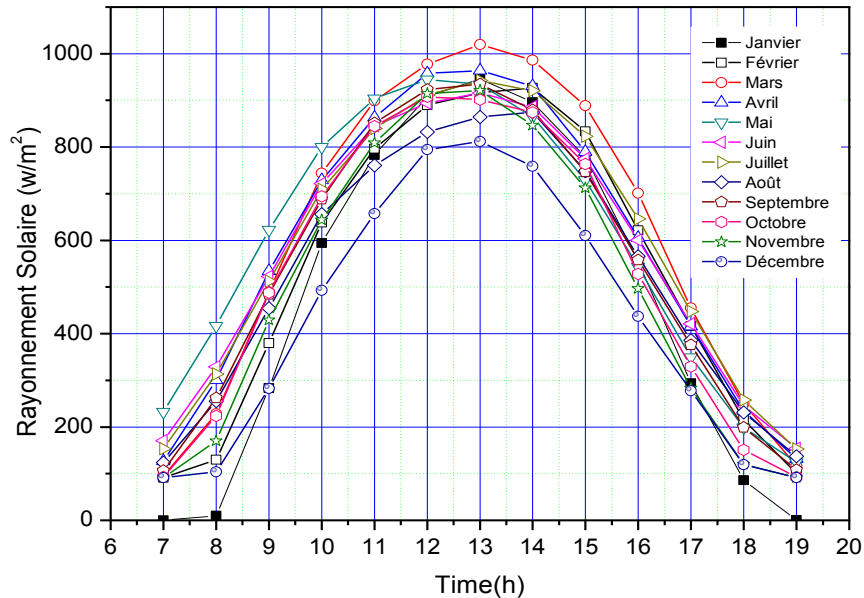


Figure IV.13 : Variation mensuelle du rayonnement solaire

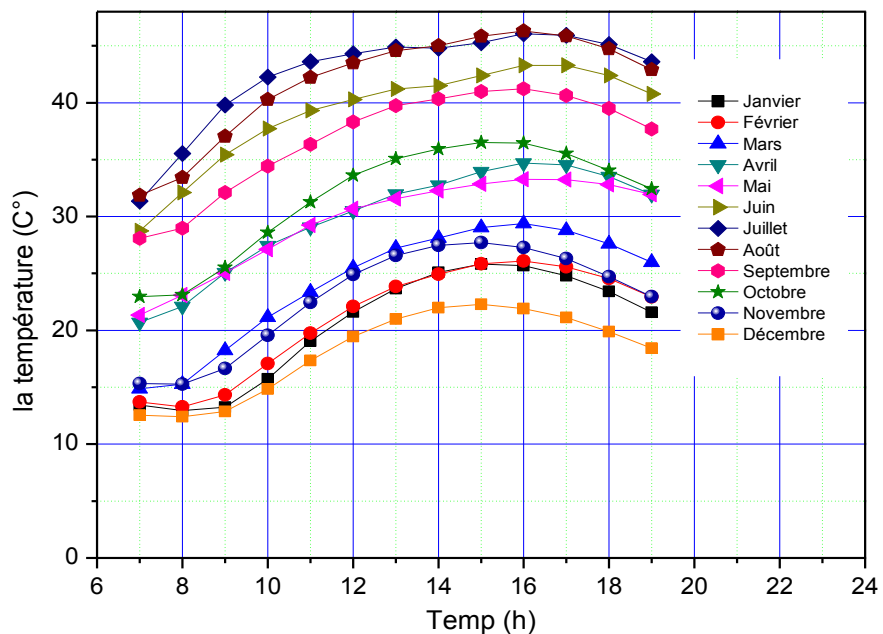


Figure IV.14 : Variation mensuelle de la température ambiante

Les figures (IV.13), (IV.14) représentent la variation du rayonnement et de la température de l'air durant la période d'étude de la ville de Ghardaïa.

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

IV.4.2 Comparaison mensuelle des rendements entre les différentes technologies :

Nous avons comparé le rendement durant les quatre saisons entre les quatre technologies de panneaux solaires afin d'évaluer leurs performances.

A. La période hivernale :

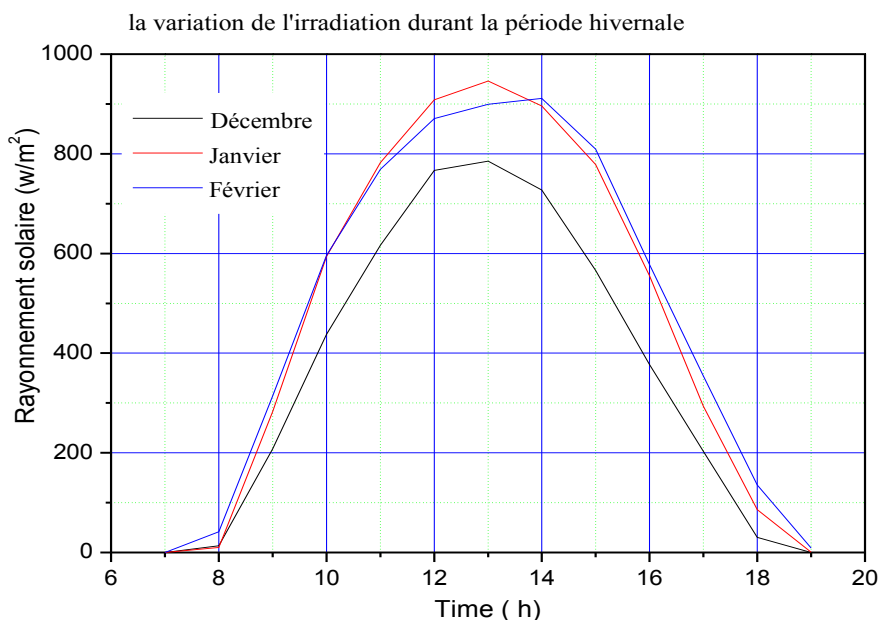


Figure IV.15 : Variation mensuelle du rayonnement solaire durant la période hivernale

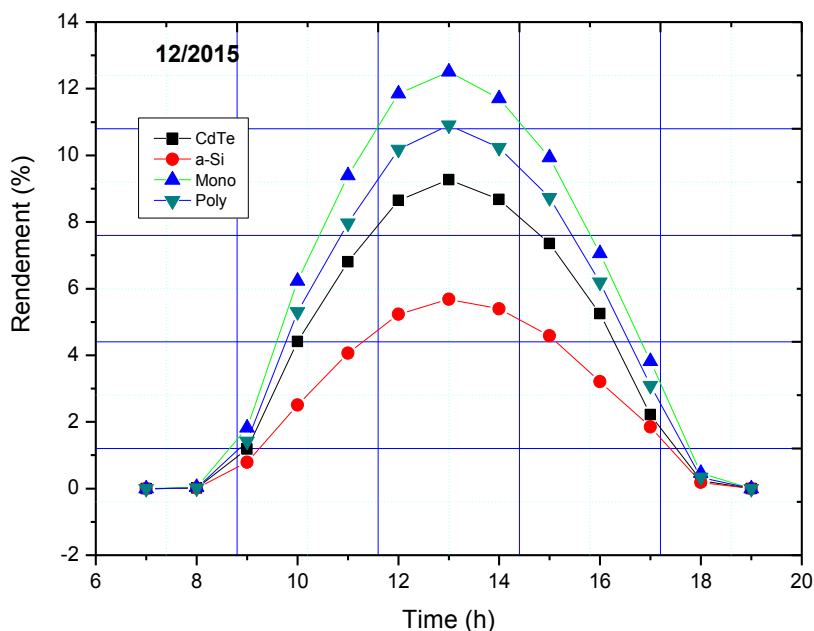


Figure IV.16 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au décembre 2015

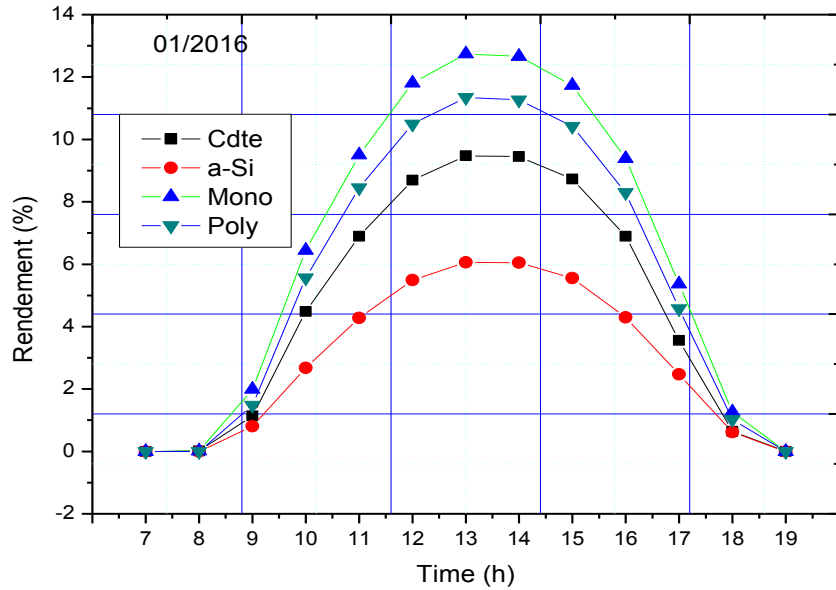


Figure IV.17 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au janvier 2016

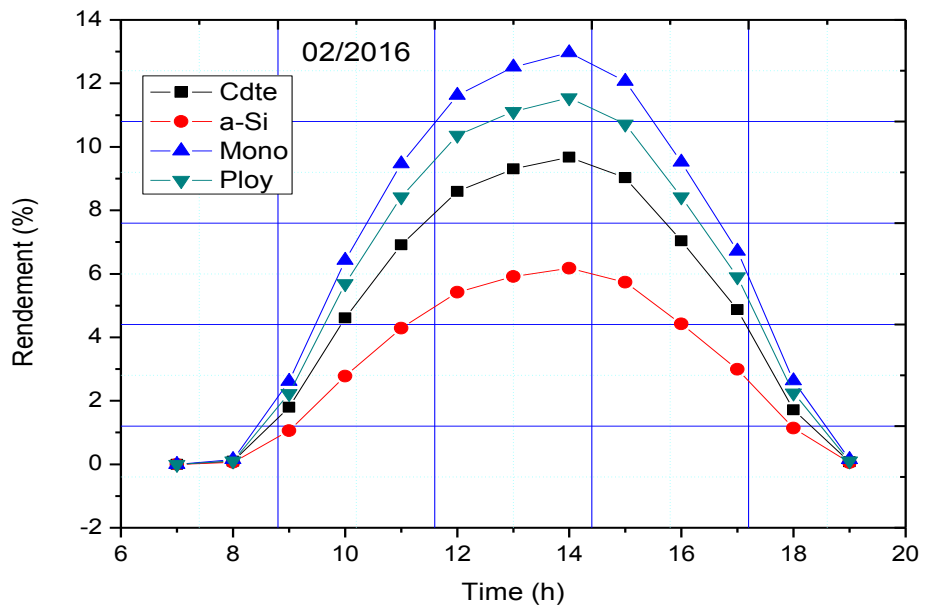


Figure IV.18 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au février 2016

D'après les figures (IV.16), (IV.17) (IV.18). On remarque qu'en général durant les mois de décembre, janvier et février les panneaux solaires monocristallins sont les plus performant, ce qui montre que le rendement augmente en atteignant par des valeurs maximales entre [12 h 00 et 15 h 00] ceci est directement proportionnel au rayonnement solaire, aux caractéristiques et aux conditions climatiques. Suivi par le polycristallin, CdTe et l'amorphe.

B. La période vernale :

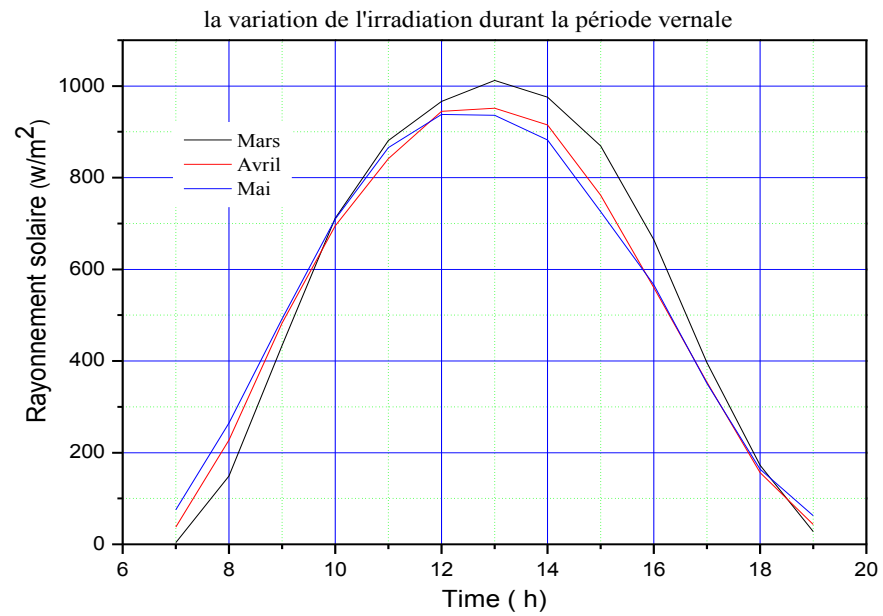


Figure IV.19 : Variation mensuelle du rayonnement solaire durant la période vernal

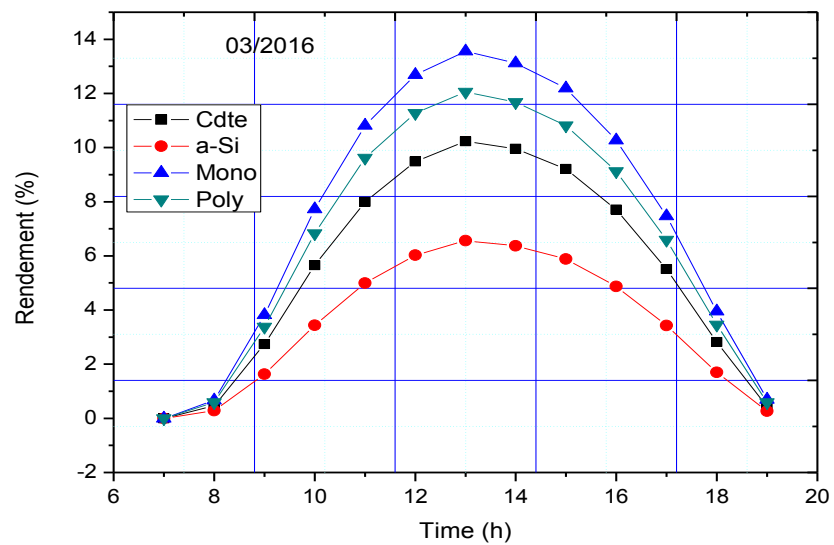


Figure IV.20 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques au mars 2016

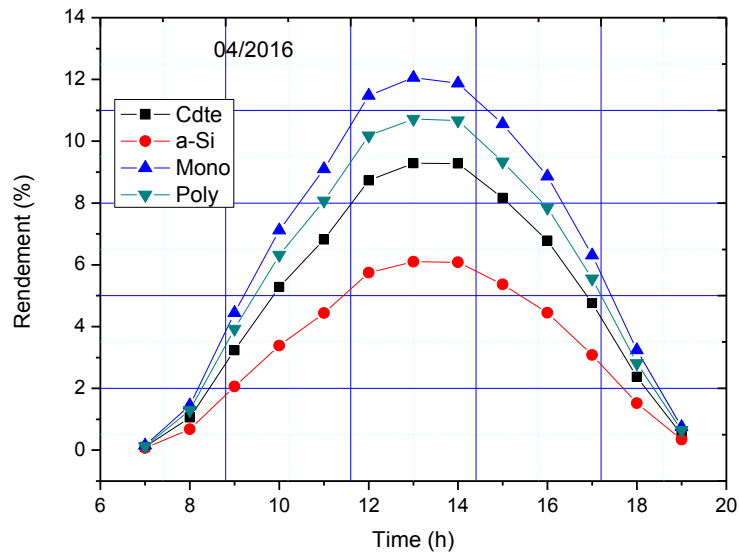


Figure IV.21 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques d'avril 2016

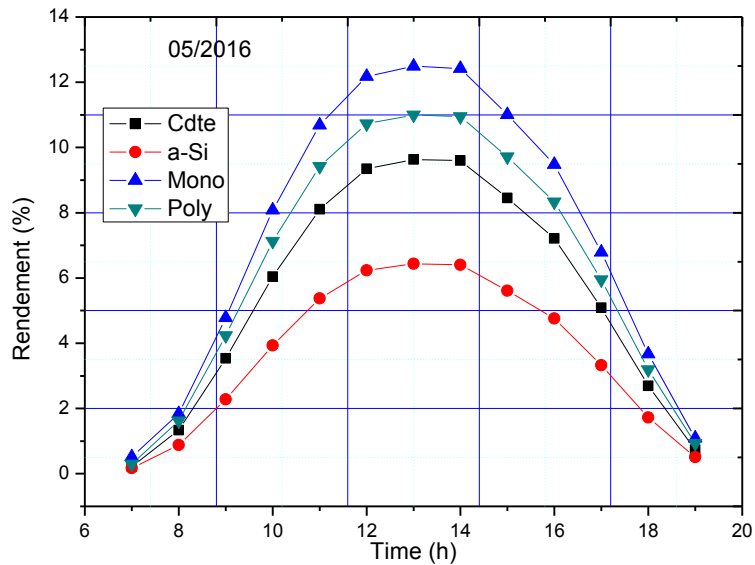


Figure IV.22 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques de mai 2016

D'après les Figures (IV.20), (IV.21), (IV.22). On remarque que pendant la période vernal (mars, avril et mai), les panneaux solaires monocristallins sont les plus performants suivis des panneaux solaires poly cristallins, CdTe et les panneaux amorphes.

En note aussi que durant la période vernal les panneaux atteignent leur performance maximale en affichant un rendement proche à celui enregistré dans les conditions STC ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1000 w/m^2).

C. la période estivale :

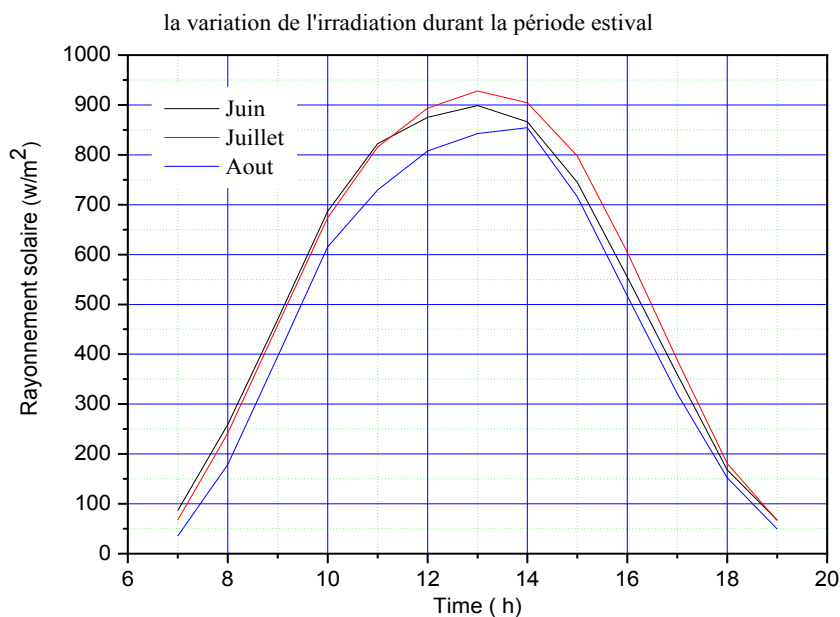


Figure IV.23 : Variation mensuelle du rayonnement solaire durant la période estival

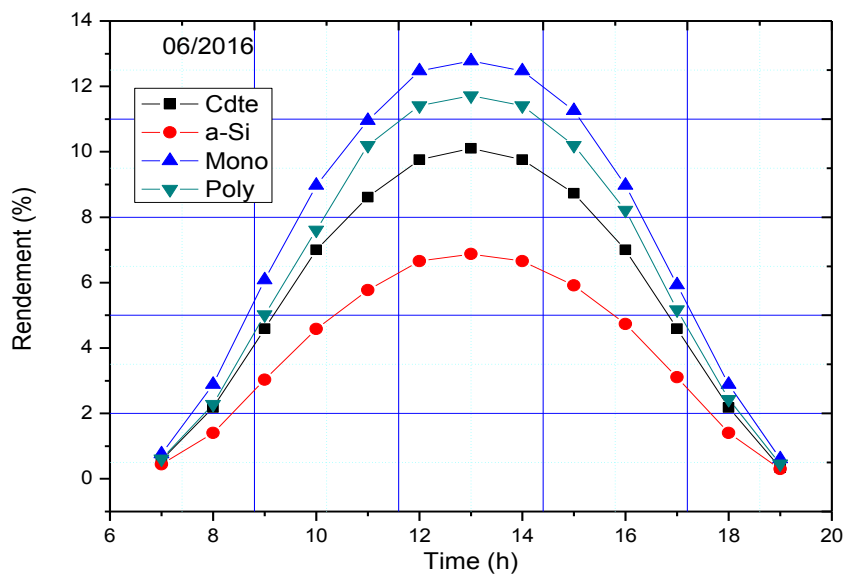


Figure IV.24 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques de juin 2016

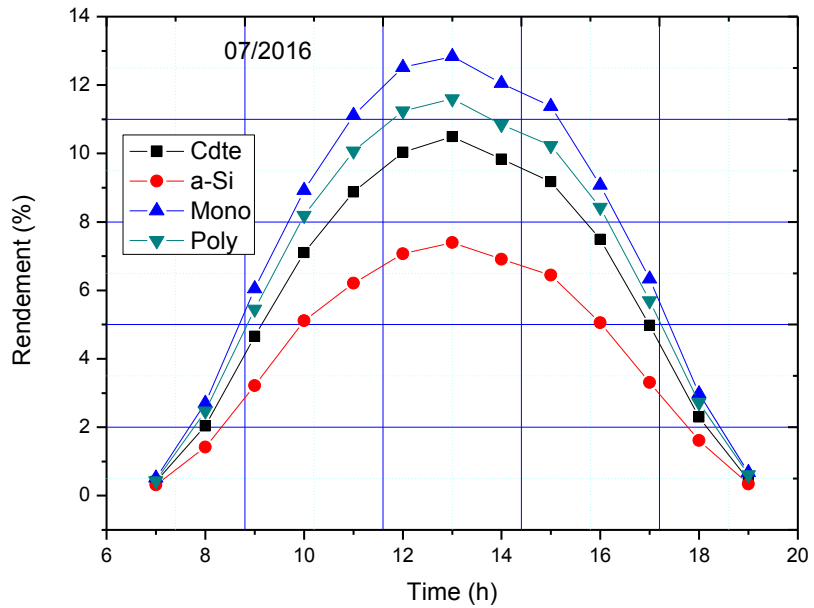


Figure IV.25 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques de juillet 2016

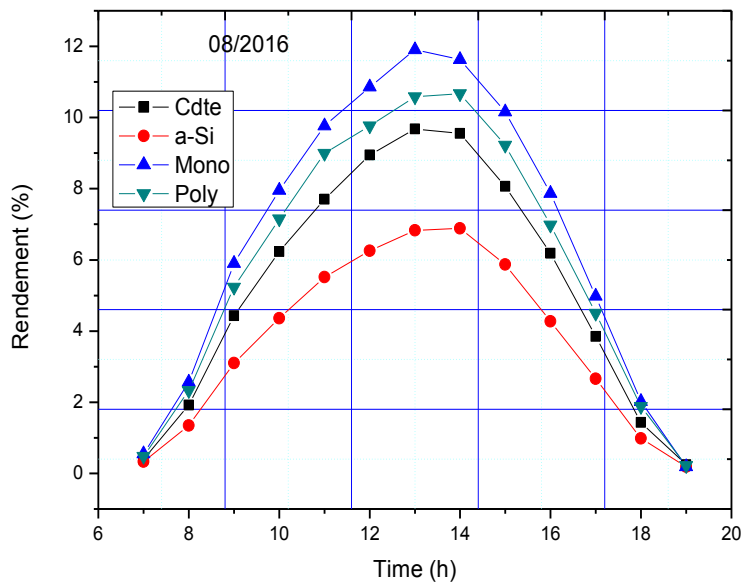


Figure IV.26 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques d'Aout 2016

D'après les figures (IV.24), (IV.25), (IV.26). Aussi durant la période estival (juin, juillet et aout) en remarque que les panneaux solaires monocristallins sont les plus performants suivis des panneaux solaires poly cristallins, CdTe et des panneaux amorphes.

On note que néanmoins la durée d'ensoleillement durant la période estivale est le plus grands, le rendement n'atteigne pas au mois d'aout le niveau du mois de Mars et cela est due aux températures élevées.

D. La période d'automne :

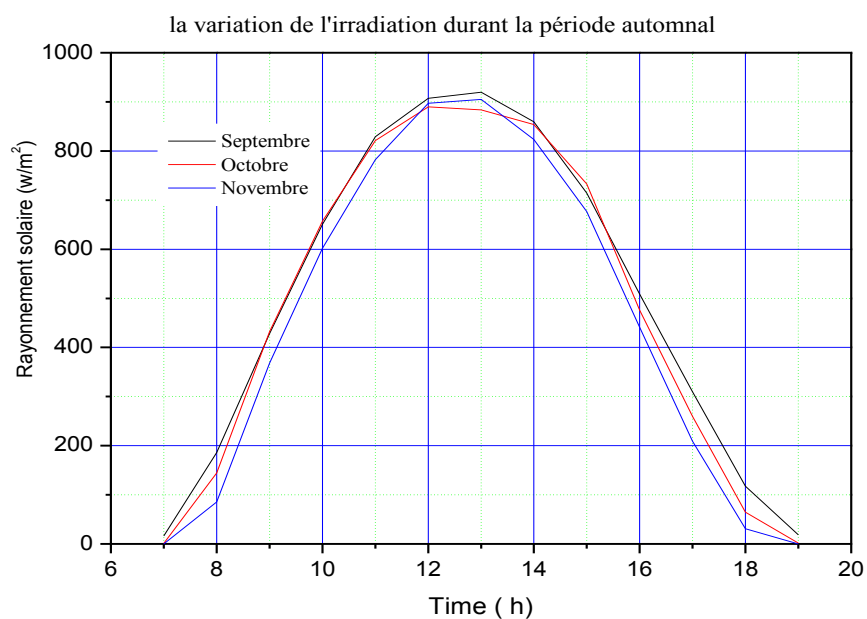


Figure IV.27 : Variation mensuelle du rayonnement solaire durant la période d'automne

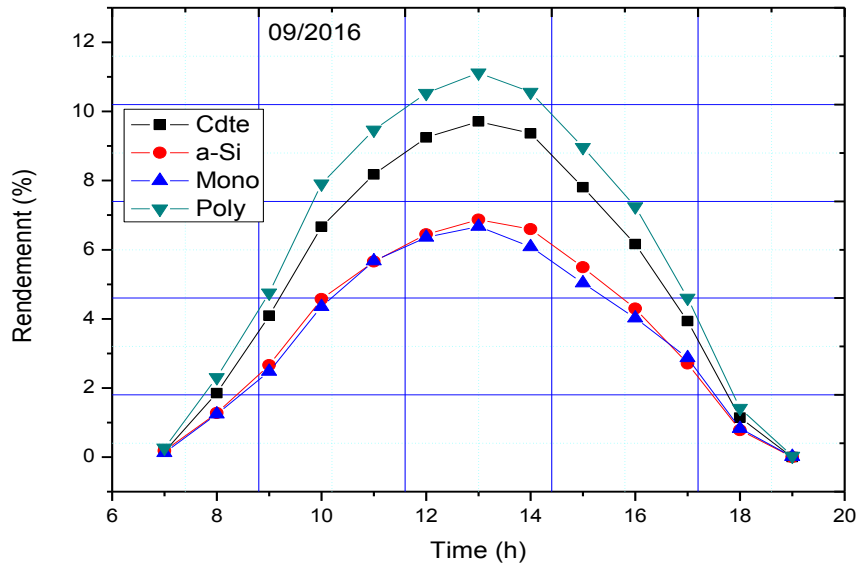


Figure IV.28 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques de septembre 2016

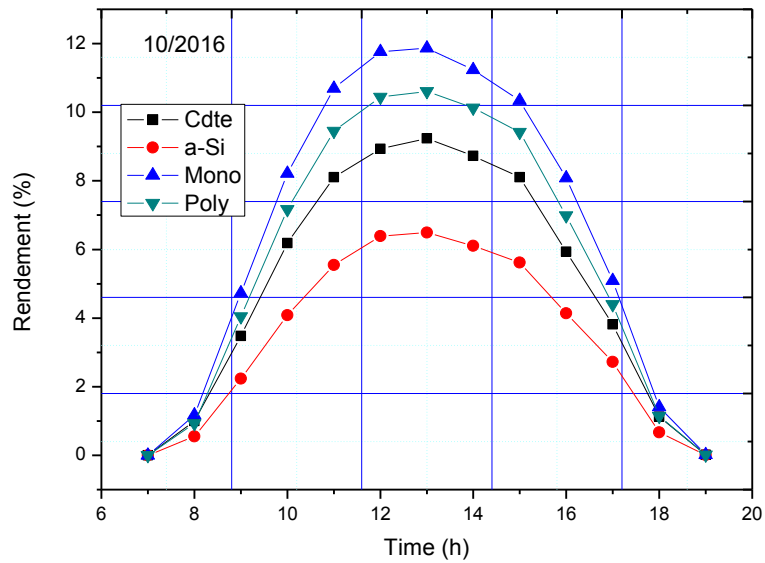


Figure IV.29 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques d'Octobre 2016

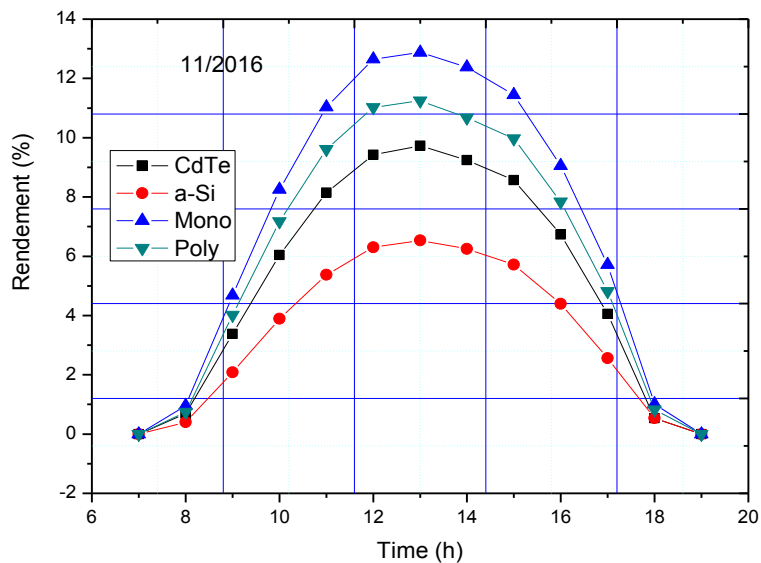


Figure IV.30 : Evolution temporelle du rendement des panneaux photovoltaïques de novembre 2016

D'après les figures (IV.28),(IV.29),(IV.30).On remarque que pendant le mois de septembre les panneaux polycristallin sont les meilleurs que les autres et cela due essentiellement à l'arrêt du champ de monocristallin, par contre durant les autres mois on remarque que pendant la période automnal (octobre et novembre), les panneaux solaires monocristallins sont les plus performants suivis des panneaux solaires polycristallin, CdTe et des panneaux amorphes.

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

A cause de faibles durées d'ensoleillement durant cette saison le rendement atteint ces valeurs acceptables durant l'année.

IV.4.3 Comparaison annuelle des rendements entre les différentes technologies :

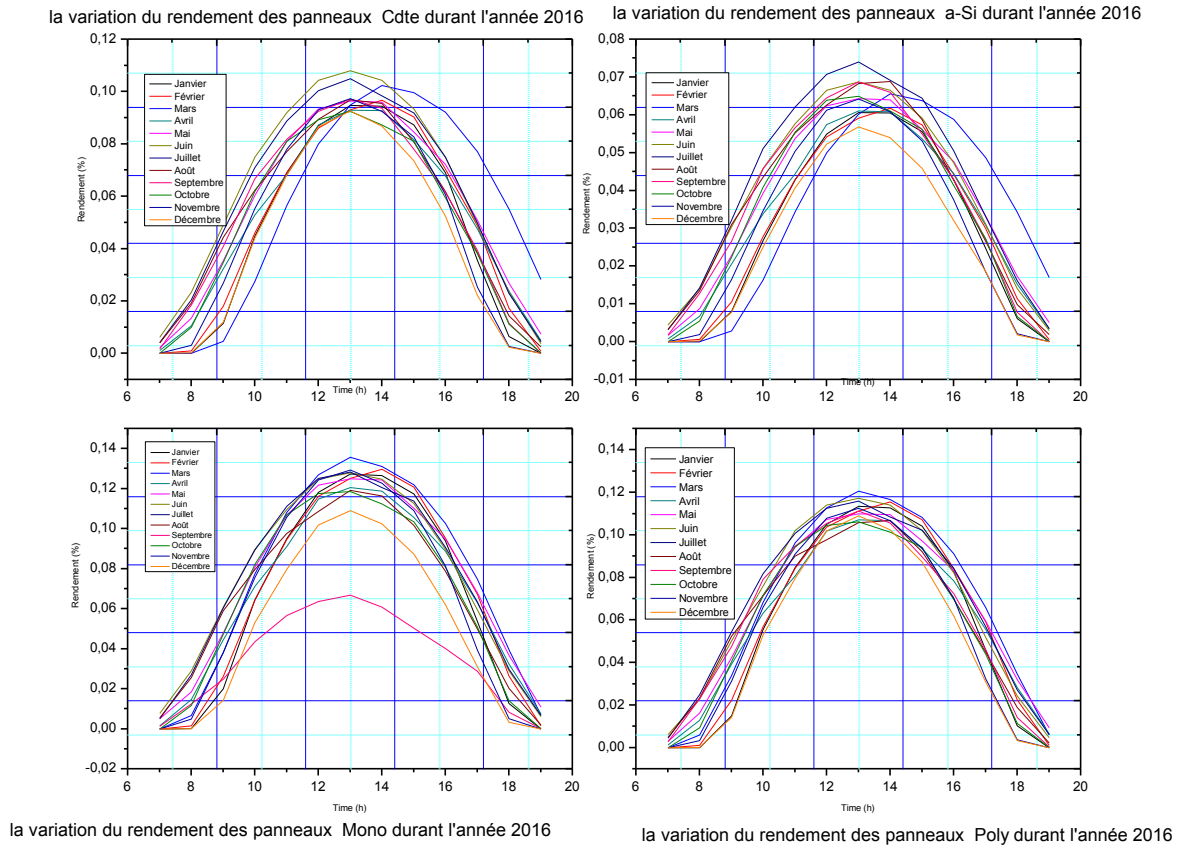


Figure IV.31 : Evolution temporelle du rendement des différentes technologies des panneaux PV implantée par SKTM à oued nechou Ghardaïa

D'après les figures (IV.31) on constate que mars le meilleur mois de l'année pour donner la bonne performance de tous les technologies (Mono, Poly, a-Si et CdTe) justifier par leur température ambiante ($15-26\text{ C}^\circ$) et l'irradiation solaire ($\approx 1000\text{ w/m}^2$).

Par ailleurs les rendements de mois décembre la majorité des technologies des panneaux sont enregistrés des valeurs minimales par rapport aux autres mois à cause de conditions climatiques ($T = [10-19]\text{ C}^\circ$, $G \approx 750\text{ w/m}^2$).

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

IV.4.4 Comparaison journalière des rendements entre les différentes technologies.

Après avoir observé les courbes obtenues, nous pouvons les classer en quatre jours différents durant l'année de l'étude pour mieux comprendre le comportement des quatre technologie de panneaux solaires.

➤ Le jour du 18 décembre 2015 :

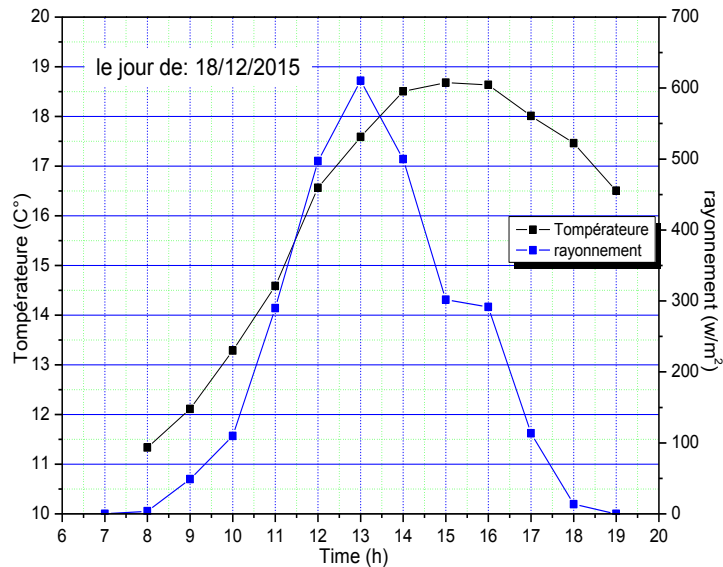


Figure IV.32 : Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante du jour 18 décembre 2015.

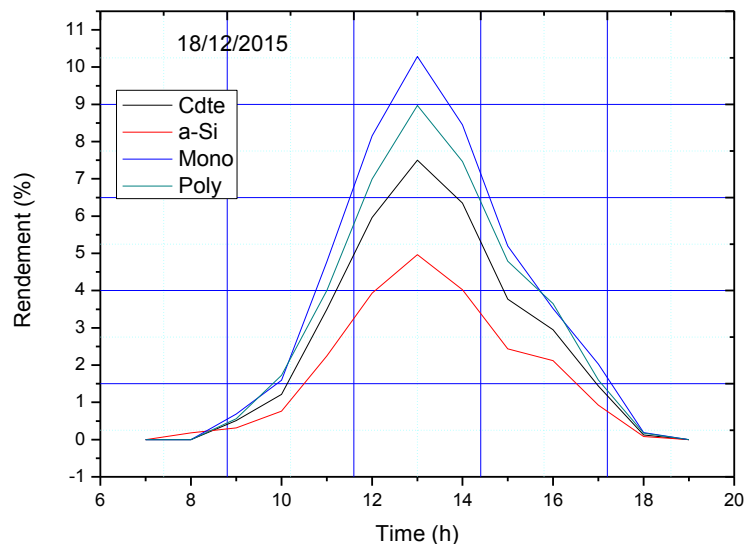


Figure IV.33 : Evolution temporelle du rendement des panneaux solaires au jour 18 décembre 2015.

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

Le figure (IV.33) montre que les rendements de conversion du monocristallin, du polycristallin, de l'amorphe et du CdTe sont faibles tout au long de la journée, alors que le rendement de l'amorphe est inférieur à celui du monocristallin et du polycristallin, ce qui indique que l'amorphe est peu sensible aux mauvaises conditions climatiques ($T \approx 17\text{ c}^\circ$, et l'éclairement max dans ce jour est $\approx 610\text{ w/m}^2$).

➤ Le jour du 16 mars 2016 :

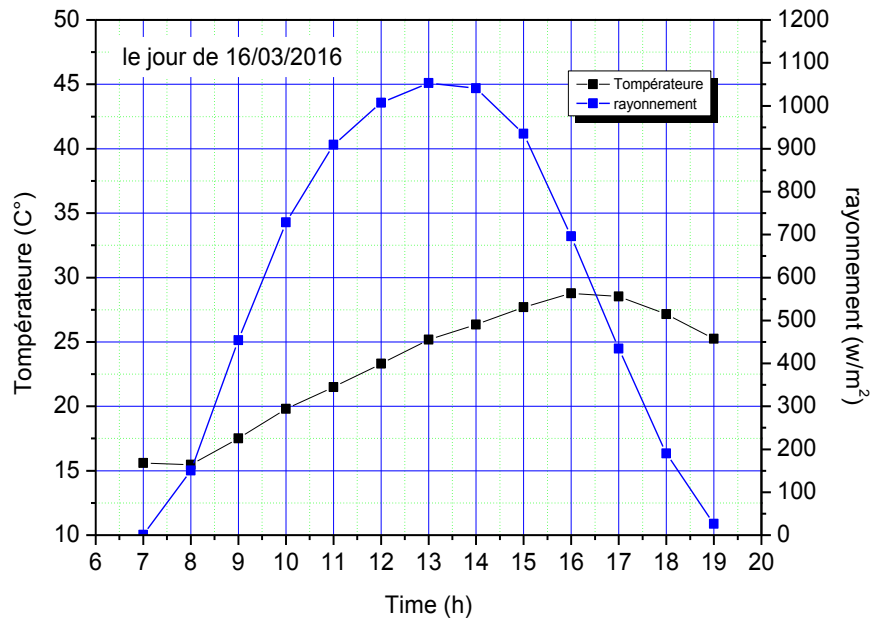


Figure IV.34 : Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante du jour 16 mars 2016.

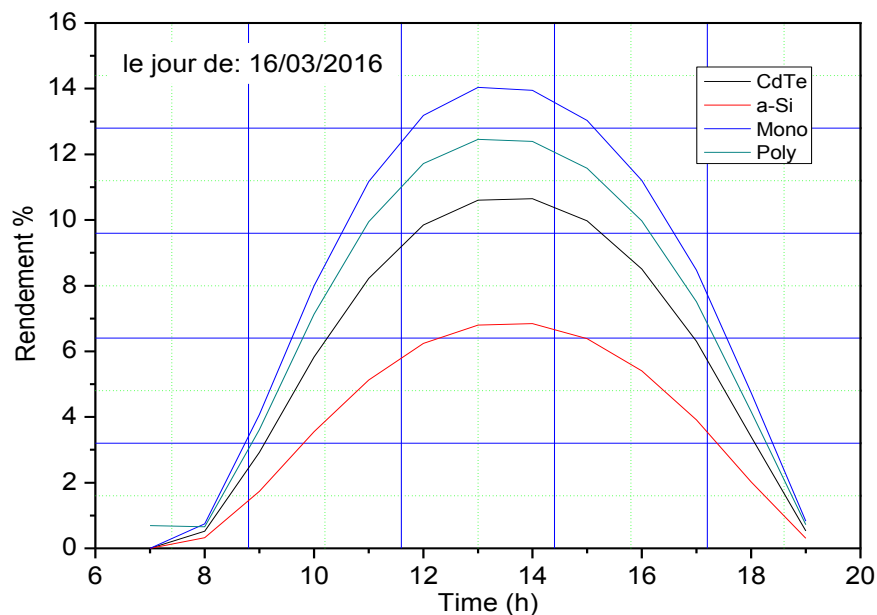


Figure IV.35 : Evolution temporelle du rendement des panneaux solaires au 16 mars 2016

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

La figure (IV.35) révèle que la journée est caractérisée par une bonne condition climatique, cela s'explique par un bon rendement des panneaux monocristallin qui atteint plus de 14% suivi le polycristallin.

➤ **Le jour du 18 Aout 2016 :**

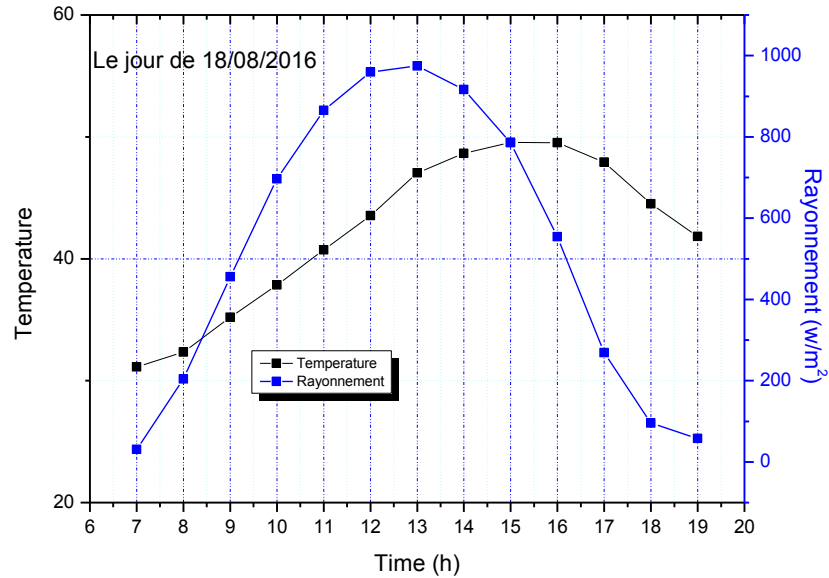


Figure IV.36 : Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante du jour 18 Aout 2016.

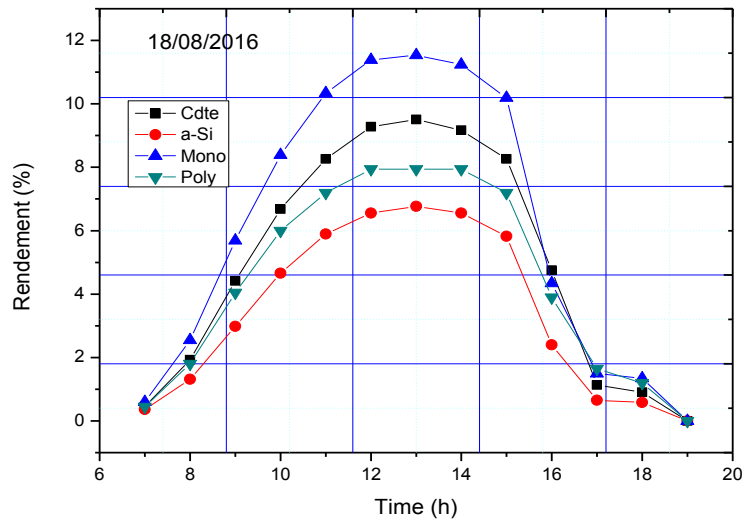


Figure IV.37 : Evolution temporelle du rendement des panneaux solaires au jour 18 Aout 2016.

D'après la figure (IV.37), malgré la durée d'ensoleillement et l'éclairement important dans ce jour on remarque que les rendements des panneaux solaires diminuent quand la température élevée.

➤ Le jour du 29 octobre 2016 :

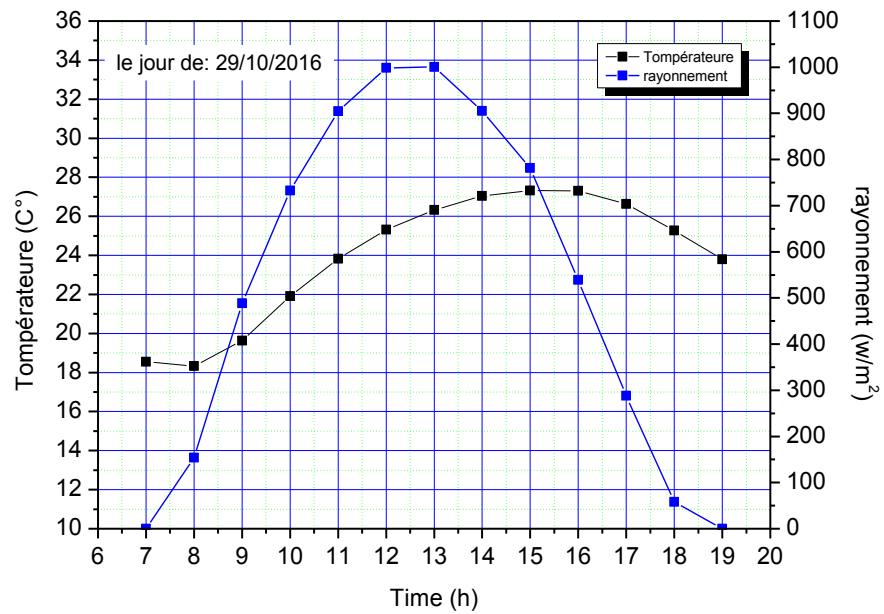


Figure IV.38 : Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante du jour 29 octobre 2016.

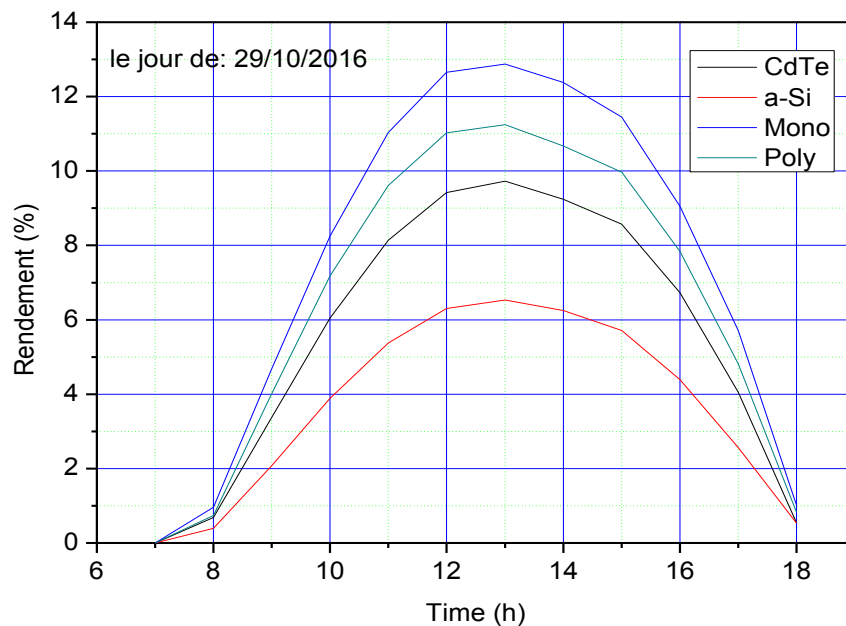


Figure IV.39 : Evolution temporelle du rendement des panneaux solaires au jour 29 octobre 2016.

D'après la figure (IV.39), montre que le jour de 29 octobre 2016 a donné les résultats des rendements concordant avec ceux obtenus dans les conditions STC ($G=1000 \text{ w/m}^2$, $T=25 \text{ c}^\circ$) et reflète bien le comportement physique du panneau solaire vis-à-vis aux variations de la température et de l'éclairement ; ainsi que les panneaux solaires monocristallins sont les plus performants par rapport aux autres.

Ch. IV : Étude comparative des panneaux solaires PV à Oued Nechou Ghardaïa

IV.5 Conclusion :

La comparaison effectuée entre les quatre technologies des panneaux solaires (monocristallin, polycristallin, amorphe et CdTe), basée sur les résultats fournis par l'installation photovoltaïque implantée par SKTM à Oued Nechou - Ghardaïa.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale

Nous avons effectué dans ce mémoire une étude comparative de panneaux solaires photovoltaïques monocristallins, polycristallin, amorphes et tellure de cadmium aux conditions météorologiques dans le site d'Oued Nechou Ghardaïa, dans le but de déterminer le type de panneaux solaires le mieux adapté au fonctionnement dans ce site.

Tout d'abord nous avons passé en revue assez générale sur l'énergie solaire et ses caractéristiques, l'énergie photovoltaïque ainsi que les différents types de semi-conducteur.

Dans la deuxième partie du mémoire, nous avons présenté un bref rappel sur l'élaboration du silicium et les couches minces et les différentes techniques, ensuite les étapes de la fabrication de la cellule solaire et leur assemblage.

Ensuite, nous avons présenté la définition et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, son rendement, les différents types de cellules disponibles, l'effet des variations climatiques. Enfin, Les différents groupements possibles des cellules sont décrits ainsi que la modélisation du panneau.

Finalement, nous avons fait une étude comparative des performances des panneaux solaires photovoltaïques

Comme conclusion, on a trouvé que :

➤ La technologie des panneaux monocristallin donne des rendements meilleur comparativement aux autres technologies dans les conditions climatique appropriée, par contre il affecté par les mauvaises conditions climatiques (forte augmentation de la température et du faible éclairement

➤ Les panneaux photovoltaïques amorphes et CdTe sont moins efficaces par rapport aux autres technologies des panneaux photovoltaïques lorsque les conditions climatiques sont bonnes mais gardent presque les mêmes rendements dans les mauvaises conditions climatiques.

➤ Lors des journées caractérisées par de mauvaises conditions climatiques, temps couvert et nuageux, les performances du monocristallin et polycristallin sont démunies, leurs rendements de conversion sont faibles. Alors que le rendement de l'amorphe et CdTe n'est pas beaucoup influencé par les mauvaises conditions climatiques.

*Références
bibliographiques*

Références Bibliographiques

- [1] **Ridha Andoulsi.** « Etude D'une Classe De Systemes Photovoltaïques Par Une Approche Bond Graph Modelisation, Analyse Et Commande » 2001.
- [2] **H.Reeves ,** " Mal De Terre ", Science Ouverte, Editions Du Seuil, Mars 2003. (S.D.).
- [3] Energie Solaire Photovoltaïque.Doc / B. Flèche - D. Delagnes / Juin 07
- [4] **Mustapha Belarbi.** « Contribution A L'étude D'un Générateur Solaire pour Site Autonome » , 2015
- [5] **Laronde Rémi** « Essais Accélérés De Dégradation De Modules Photovoltaïques » , 2009.
- [6] **Petibon Stéphane** « Nouvelles Architectures Distribuées De Gestion Et De conversion De L'énergie Pour Les Applications Photovoltaïques » ,2009.
- [7] **Emilien Parbaile** « Contribution A L'optimisation Des Techniques De Dépôts Sous Vide De Cellules Solaires Organiques», 2009.
- [8] **Benoit Brousse** « Réalisation Et Caractérisation De Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues Par Dépôt Physique»,2004.
- [9] **J.Royer,T.Dijako, E.Schiller, B.Sola** « Le Pompage Photovoltaïque ».Institut De L'énergie Des Pays Francophone,1998.
- [10] A. Lobouret, M. Viloz, « Energie Solaire Photovoltaïque», Edition Dunod, 2006.
- [11] **Laronde Rémi** « Essais Accélérés De Dégradation De Modules Photovoltaïques »Thèse, 2009.
- [12] **A. Ricaud,** 'Photopiles Solaires', Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes. Lausanne, 1997.332.P.
- [13] «Physique Et Technologie Des Composants De Puissance ». 2003 Luc Lasne Université De Bordeaux 1 Departement E.E.A Www.Creea.U-Bordeaux.Fr .
- [14] F.P. McCluskey Et Al, High Temperature Electronics, Crc Press, New York,1997.
- [15] **Kara Mohamed Wahiba** « Les Structures De Bandes Electroniques Et Les Propriétés Relatives Aux Semiconducteurs Quasi Binaires (Gap)1-X(Znse)X », 2012 .
- [16] **H .Mathieu, H.Fanet,** « Physique Des Semiconducteurs Et Des Composants Electronique »,Livre,Ed Dunod, Paris, 2009
- [17] **Daranfed Ouarda** « Elaboration Et Caractérisation De Couches Absorbantes Des Cellules Solaires En Couches Minces A Base De Cu₂znsns₄ », 2013.
- [18] **Frank Tinjod** « Mécanismes De Formation Des Boites Quantiques Semiconductrices, Application Aux Nanostructures Ii-Vi Et Etude De Leurs Propriétés Optiques » , 2003.
- [19] S. S. Li, Semiconductor Physical Electronics, 2nd Edition, Springer, New York, 2006
- [20] [Http://Membres.Lycos.Fr/Procession/Electronique/Smcd06.Pdf](http://Membres.Lycos.Fr/Procession/Electronique/Smcd06.Pdf)
- [21] Chapitre II – Le Silicium Poreux : Fabrication Et Applications Aux Microsystèmes Luidiques
- [22] **Jacques Amouroux, Daniel Morvan,** “Le Silicium Photovoltaïque: Enjeux Techniques Et Financiers”, Colloque National Electricité Solaire Photovoltaïque, Aix-Les-Bains, 20-22 Mars 2007
- [23] **Julien Degoulange** « Purication Et Caracterisations Physico-Chimiques Et Electriques De Silicium D'origine Metallurgique Destiné A La Conversion Photovoltaïque », 2008.

Références Bibliographiques

- [24] **Matthias De Sousa** « Contribution A La Purification Des Déchets De Silicium Solaire Oxyde A L'aide D'un Procédé Assisté Par Plasmathermique », 2014.
- [25] **Cécile Miquel** : « Systèmes Photovoltaïques : Fabrication Et Impact Environnemental », Synthèse Réalisée Par Cécile Miquel Sous La Direction De Bruno Gaiddon, 2009, Hespul Energies Renouvelables Et Efficacité Energétique.
- [26] **Thomas Schutz-Kuchly** « Investigation Du Silicium De Qualité Solaire De Type N Pour La Fabrication De Cellules Photovoltaïques », 2011.
- [27] **G. Nouet, P. Lay, J.L. Chermant** « Le Silicium Polycristallin Polix : Elaboration, Propriétés Et Performances » Revue De Physique Appliquée, 1987, 22 (7), Pp.535-
- [28] **Amina Tandjaoui** « Solidification Dirigée Du Silicium Multi-Cristallin Pour Les Applications Photovoltaïques : Caractérisation In Situ Et En Temps Réel Par Imagerie X Synchrotron », 2013.
- [29] [Http://Cristauxdesilicium.Wixsite.Com/Tpe-Le-Silicium/-Caracteristique-Silicium](http://Cristauxdesilicium.Wixsite.Com/Tpe-Le-Silicium/-Caracteristique-Silicium)
- [30] **Benmeddour Amor** « Etude Et Simulations Numériques Des Contraintes Thermomécaniques Dans Le Silicium Photovoltaïque », 2010.
- [31] **Benatallah Mohammed** « Modélisation De La Propagation De La Lumière Dans Un Bio-Senseur Optique A Semi-Conducteur », 2014.
- [32] S. M. Sze, Physics Of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1981.
- [33] S. Wolf. R. Tauber. "Silicon Processing For The Vlsi Era (Lattice Press. Sunset, Beach, California, 1986)
- [34] [Http://Gllloq69.Free.Fr/Tpe/Synteses.Php](http://Gllloq69.Free.Fr/Tpe/Synteses.Php)
- [35] **Benghabrit Siham** « Elaboration Et Caractérisation De Couches Minces Cds Par Bain Chimique Cbd Pour Application Photovoltaïque », 2015.
- [36] **I.F. Bouguenna**, « Modélisation Et Optimisation D'une Cellule Solaire Tandem A-Si:H/Asige », 2009.
- [37] **J.E. Bourée, P.R. Cabarrocas** « Cellules Solaires En Couches Minces A Base De Silicium », Laboratoire De Physique Des Interfaces Et Des Couches Minces, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.
- [38] M. Mancor, " Simulation Numérique Des Caractéristiques Electriques D'une Cellule Solaire A Double Jonction En (Algaas/Gaas) ", Mémoire Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [39] **A. Ricaud**, 'L'electricité Photovotique ', Document De Synthés 2009
- [40] **Olivier Alirol** « Simulation D'un Détecteur Cdte Cl De Rayonnement X En Mode Comptage A Fort Flux Pour La Radiographie Et La Tomographie », 2010.
- [41] [Http://www.Epsic.Ch/Pagesperso/Schneiderd/Apelm/Sources/Solairefabrication.Gif](http://www.Epsic.Ch/Pagesperso/Schneiderd/Apelm/Sources/Solairefabrication.Gif)
- [42] M3p Solar, 09
- [43] **Angel Cid Pastor** « Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electroniques », 2006.
- [44] **Corinne Alonso** « Contribution `A L'optimisation, La Gestion Et Le Traitement De L'Energie », 2003.
- [45] **Miguel Lopez** « Contribution A L'optimisation D'un Système De Conversion Eolien Pour Une Unité De Production Isolée », 2008.
- [46] **M.Orgeret**. « Les Piles Solaires, Le Composant Et Ses Applications ». Paris : Ed. Masson, 1985, P 247.

Références Bibliographiques

- [47] **Ameziane Sadek** « Contribution A L'étude De Conception D'une Centrale Photovoltaïque De Puissance (1mw) Interconnectée », 2009.
- [48] **Bendjellouli Zakaria** « Implantation Expérimentale De L'mppt Pour Un Système De Génération Hybride Solaire-Eolien, 2009.
- [49] **Amara Karima** « Contribution A La Modélisations D'une Cellule Solaire », 2014.
- [50] **Salah Eddine Bensalem** « Effets De La Température Sur Les Paramètres Caractéristiques Des Cellules Solaires ».Thèse De Magister, 2011.
- [51] **Boukhers Djamil** « Optimisation D'un Système D'énergie Photovoltaïque Application Au Pompage, 2007.
- [52] **Boucheritte Waka** « Convertisseurs Multiniveaux Dans Les Systèmes Pv Connectés Au Réseau ».
- [53] **Documentation Du Centrale D'oued Nechou**
- [54] **Boukli-Hacene, Omar** « Conception Et Réalisation D'un Générateur Photovoltaïque Muni D'un Convertisseur Mppt Pour Meilleure Gestion Énergétique », 2010
- [55] **Les Onduleurs Pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat De L'art Et Etude Des Performances - Août 2007 -**
- [56] **K. Kouz, H. Cherkaoui Dekkaki, S. Cherel, B. Maljournal, C. Leger, B. Attaous, F.Cuzin, S.Aziki** : "Etude D'impact Environnementale Et Sociale Cadre Du Projet De Complexe Solaire,D'ouarzazate (Maroc)", 2011, Marocain Agency For Solar Energy.

Annexe

ANNEXE

Les tableaux (1, 2,3 et 4) représentent les variations du rayonnement et de la température de l'air durant la période d'étude de la ville de Ghardaïa :

Tableau 1 : la variation du rayonnement et de la température de l'air durant la période Hivernale

T (Moy h)/mois	Décembre		Janvier		Février	
	G (w/m2)	T°	G (w/m2)	T °	G (w/m2)	T °
07:00	0	12,5	0	13,4	0	13,7
08:00	13,2	12,4	9,9	12,9	41,4	13,3
09:00	208,2	12,9	283	13,3	314,3	14,3
10:00	437,9	14,8	594,2	15,7	596,3	17,1
11:00	616,7	17,3	782,5	19	768,8	19,7
12:00	766,9	19,5	908,4	21,6	870,4	22,1
13:00	785,5	21	946,2	23,7	899,6	23,8
14:00	727,4	22	896,2	25,1	911,4	24,9
15:00	565,9	22,3	778,7	25,8	809,3	25,8
16:00	376,9	21,9	555,1	25,7	577,7	26,1
17:00	202,9	21,1	293,5	24,8	354,3	25,6
18:00	30,2	19,9	85,9	23,4	135,3	24,5
19:00	0	18,4	0,4	21,6	9	22,9

Tableau 2 : la variation du rayonnement et de la température de l'air durant la période Vernale

T (Moy h)/mois	Mars		Avril		Mai	
	G (w/m2)	T°	G (w/m2)	T °	G (w/m2)	T °
07:00	3,9	14,9	38	20,7	154	21,3
08:00	148,9	15,3	227,5	22,1	354,8	23,1
09:00	433,9	18,2	482,8	25,1	579,1	25
10:00	711,5	21,2	695	27,4	772,9	27,1
11:00	881	23,4	841,5	29,1	885,9	29,2
12:00	966,2	25,5	944,6	30,5	930,6	30,7
13:00	1012,5	27,2	951,3	32	919,5	31,6
14:00	975,9	28,1	914,8	32,8	843,8	32,3
15:00	869,1	29	761,5	33,9	695,1	32,9
16:00	664,6	29,4	560,4	34,7	492,8	33,3
17:00	396,3	28,8	353,4	34,5	281	33,2
18:00	172,6	27,6	156,5	33,5	117,5	32,8
19:00	27,8	26	43,5	31,9	35,3	31,9

ANNEXE

Tableau 3 : la variation du rayonnement et de la température de l'air durant la période Estivale

T (Moy h)/mois	Juin		Juillet		Août	
	G (w/m2)	T°	G (w/m2)	T °	G (w/m2)	T °
07:00	86,3	28,7	67,4	31,4	35,2	31,9
08:00	258,9	32,1	241,9	35,5	178,8	33,4
09:00	470	35,4	458,9	39,8	395,6	37,1
10:00	687,2	37,7	674	42,3	615,7	40,3
11:00	822,4	39,3	815,9	43,6	729,5	42,2
12:00	875,3	40,3	894	44,3	808	43,5
13:00	898,9	41,2	927,9	44,9	842,9	44,6
14:00	866,4	41,5	904,4	44,8	854,1	45
15:00	744,9	42,4	797,8	45,3	716,4	45,8
16:00	555	43,3	605	46,1	517	46,3
17:00	359,5	43,3	388,4	45,9	320,7	45,9
18:00	168,3	42,4	181,2	45,1	152,4	44,7
19:00	67,7	40,8	66,4	43,6	49,6	42,9

Tableau 4 : la variation du rayonnement et de la température de l'air durant la période Automnal

T (Moy h)/mois	Septembre		Octobre		Novembre	
	G (w/m2)	T°	G (w/m2)	T °	G (w/m2)	T °
07:00	16,2	28,1	1,3	23	0,1	15,3
08:00	186,1	29	144,2	23,1	85,6	15,3
09:00	428,1	32,1	432,2	25,5	368,3	16,6
10:00	651	34,4	657,4	28,6	602	19,6
11:00	829	36,3	821,2	31,3	782,3	22,4
12:00	907,3	38,3	890	33,6	897,3	24,9
13:00	919,7	39,7	883,6	35,1	904,9	26,6
14:00	859,3	40,3	853,7	35,9	823,3	27,5
15:00	714,7	41	733,3	36,5	676,8	27,7
16:00	508,5	41,2	476,2	36,5	441,5	27,3
17:00	309,9	40,6	259,8	35,5	209	26,3
18:00	117,5	39,5	64,6	34,1	31,1	24,7
19:00	18,3	37,7	1,5	32,4	0	23

A. Les caractéristiques électriques du panneau au silicium monocristallin :

Modules PV **S6M-2G**



Caractéristiques électriques des séries S6M-2G(*)

		S6M2G225	S6M2G230	S6M2G235	S6M2G240	S6M2G245
Puissance maximale (-0,+5Wp)	P _{max}	225 Wp	230 Wp	235 Wp	240 Wp	245 Wp
Tension à puissance maximale	V _{mpp}	29,15 V	29,46 V	29,75 V	30,05 V	30,33 V
Intensité à puissance maximale	I _{mpp}	7,72 A	7,81 A	7,90 A	7,99 A	8,08 A
Tension circuit ouvert	V _{oc}	36,86 V	37,10 V	37,34 V	37,58 V	37,82 V
Courant de court-circuit	I _{sc}	8,42 A	8,44 A	8,47 A	8,49 A	8,52 A
Rendement du module	η _m	13,8 %	14,1 %	14,4 %	14,7 %	15,0%

Coefficient de température I _{sc}	+ 0,015 %/K
Coefficient de température V _{oc}	- 0,31 %/K
Coefficient de température P _{max}	- 0,46 %/K
Courant inverse maximum	20 A
Tension maximale du système (IEC)	1000 V (Classe A)

Faible réduction du taux de rendement en conditions de charge partielle: moins de 5% (200 W/m² 25°C)

(*) Tests réalisés dans des conditions standard STC: ensoleillement 1000 W/m² AM 1,5 et température 25°C.
Tolérance de puissance électrique: ± 2,5%.

Caractéristiques électriques sous conditions NOCT (800 W/m² AM 1,5, 20°C, 1m/s) à 46±2 °C

		S6M2G225	S6M2G230	S6M2G235	S6M2G240	S6M2G245
Puissance max (- 0, + 5Wp)	P _{max} (Wp)	166,07	169,71	173,38	177,09	180,72
Tension à puissance max	V _{mpp} (V)	27,27	27,55	27,83	28,11	28,37
Intensité à puissance max	I _{mpp} (A)	6,09	6,16	6,23	6,30	6,37
Tension en circuit ouvert	V _{oc} (V)	34,18	34,40	34,63	34,85	35,07
Courant de court circuit	I _{sc} (A)	6,77	6,79	6,81	6,83	6,85

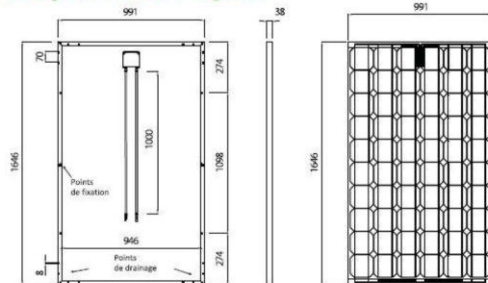
Dimensions et caractéristiques constructives

Dimensions (± 3 mm) 1.646 x 991 x 38mm.
 Poids (kg) 19 kg.
 Cellules solaires 60 cellules monocristallines de 6 pouces, texturisées et protégées avec couche anti- réfléchissante.
 Connexion: cellules connectées en série.
 Matrice de 6x10.
 Construction **Face avant:** Verre trempé de 3,2 mm d'épaisseur à haute transmissivité.
Face arrière: couche isolante.
Encapsulage: EVA (Ethylène - Vinyne - Acétate).
Cadre: aluminium anodisé avec orifice pour drainage de l'eau.

Connexions électriques

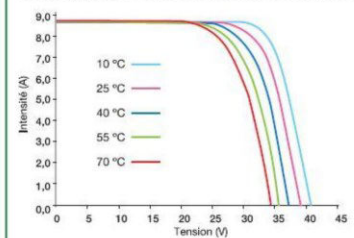
Boîte de connexion IP 65.
 Diodes de protection 3 diodes de by-pass de 11 A.
 Connecteurs Câbles de 100 cm de longueur. Connecteurs rapides IP67

Caractéristiques mécaniques

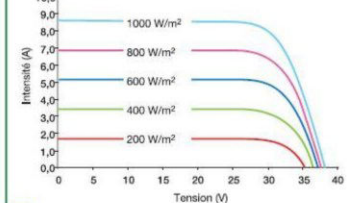


Cette fiche technique respecte la norme IEC 50380.
 Les données de cette fiche technique peuvent être modifiées par Solaria sans avertissement préalable.
 V2-Mars-2011

Module PV Solaria S6M2G245
 Courbes typiques I-V à 1000 W/m² en fonction de la température



Module PV Solaria S6M2G245
 Courbes typiques I-V à 25°C en fonction de l'ensoleillement



Timbre du Distributeur

Solaria Italia SRL
 Piazza Borgo Pila 40/57 A
 16129 - Genova (Italia)
 Tel.: +39 010 9824707
 Fax: +39 010 9824706
 contact.it@solariaenergia.com

Centrale de production
 Puertollano (Ciudad Real - Espagne)
 Fuenmayor (La Rioja - Espagne)

www.solariaenergia.com

C. Les caractéristiques électriques du panneau au silicium Amorphe :

Données Techniques

Données électriques sous STC*

Type de module	SCHOTT PROTECT™ ASI								
		valeur stabilisée	valeur initiale	valeur stabilisée	valeur initiale	valeur stabilisée	valeur initiale	valeur stabilisée	valeur initiale
Puissance nominale [Wc]	P _{mpp}	≥ 100	122,0	≥ 103	125,6	≥ 105	128,0	≥ 107	130,5
Tension nominale [V]	U _{mpp}	30,4	33,7	30,4	33,8	30,5	33,9	30,5	33,9
Courant nominal [A]	I _{mpp}	3,29	3,62	3,39	3,72	3,44	3,78	3,50	3,85
Tension à vide [V]	U _{co}	40,9	42,6	41,1	42,8	41,1	42,8	41,3	43,0
Courant de court-circuit [A]	I _{cc}	3,93	4,05	4,00	4,12	4,05	4,18	4,10	4,23
Rendement du module (%)	η	6,9		7,1		7,2		7,4	

STC (1000 W/m², AM 1,5, température de cellule : 25°C)

Puissance mesurée (Tri positif) -0 W / +1,99 W / +2,99 W

Données à température de fonctionnement normale (NOCT)*

Puissance nominale [Wc]	P _{mpp}	78,0	80,3	81,9	83,5
Tension nominale [V]	U _{mpp}	28,5	28,6	28,7	28,7
Tension à vide [V]	U _{co}	37,3	37,5	37,5	37,6
Courant de court-circuit [A]	I _{cc}	3,14	3,20	3,24	3,28
Température [°C]	T _{NOCT}	49,0	49,0	49,0	49,0

NOCT (800 W/m², AM 1,5, vitesse de vent 1 m/s, température ambiante de 20°C)

Données sous conditions de faible ensoleillement

Puissance nominale [Wc]	P _{mpp}	20,0	20,6	21,0	21,4
Tension nominale [V]	U _{mpp}	30,4	30,4	30,5	30,5
Courant nominal [A]	I _{mpp}	0,66	0,68	0,69	0,70
Tension à vide [V]	U _{co}	36,8	37,0	37,0	37,2
Courant de court-circuit [A]	I _{cc}	0,75	0,76	0,77	0,78
Rendement du module (%)	η	6,9	7,1	7,2	7,4

Ensoleillement de 200 W/m² avec un spectre AM 1,5, et une température de cellule de 25°C

Tolérance de mesure de la puissance sous ensoleillement de 200 W/m² : ±10 %

Coefficients de température

Puissance nominale [%/K]	P _{mpp}	-0,20
Tension à vide [%/K]	U _{co}	-0,33
Courant de court-circuit [%/K]	I _{cc}	+0,08

Caractéristiques

Nombre de cellules PV par module	72 (3 x 24)
Type de cellule PV	a-Si, tandem (silicium amorphe)
Boîte de connexion	2 boîtiers unipolaires Lumberg, IP 65 sans diode de dérivation, moulée dans une résine Silicone bi-composants. Câble solaire 2,5 mm ²
Connecteur	Connecteurs LC4
Dimensions de la boîte de connexion	40,1 x 54,4 x 10,5 mm
Face avant	verre durci, épaisseur 1,8 mm
Face arrière	Verre arrière trempé, épaisseur 3,2 mm
Matériau du cadre	Aluminium anodisé, noir

Dimensions et poids

Dimensions [mm]	1.308 x 1.108
Épaisseur du cadre [mm]	35
Poids [kg]	20,8

Valeurs limites

Tension du système max. admissible [V _{DC}]	1000
Courant inverse maximal I _R [A]**	10
Température du module admissible [°C]	-40 ... +85
Charge max. (selon CEI 61646)	Pression : 5.400 N/m ² ou 550 kg/m ² Dépression : 2.400 N/m ² ou 245 kg/m ²
Classe d'application (selon CEI 61730)	A
Classement au feu (selon CEI 61730)	C

** Ne pas soumettre le module à une tension externe dépassant U_{co}.

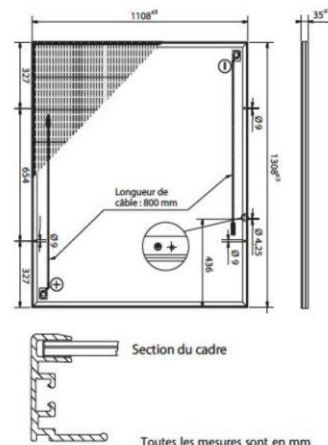
Certifications

Les modules sont certifiés et autorisés selon les normes CEI 61730, CEI 61646, correspondent à la classe de protection électrique II ainsi qu'aux directives CE et à la directive RoHS. En plus SCHOTT Solar est certifié et enregistré selon ISO 9001, ISO 14001 et BS OHSAS 18001.

* La tolérance de mesure de la puissance est de ±5 %

SCHOTT Solar Thin Film GmbH
Otto-Schott-Strasse 13
07745 Jena, Allemagne
Tél. : +49(0)6131/66-14099
Fax : +49(0)6131/66-14105
solar.sales@schottsolar.com
www.schottsolar.com

Contact : SCHOTT FRANCE SAS
6 bis, rue Fournier
92110 Clichy, France
Tél. : +33 (0)1 40 87 39 74
Fax : +33 (0)1 40 87 39 88
solar.sales@schottsolar.com
www.schottsolar.com



Pour les consignes d'installation et d'utilisation de ce produit, veuillez consulter le guide d'installation. Les caractéristiques spécifiées peuvent être sujettes à modification sans préavis. Une légère variation des valeurs est envisageable. Toutes les données sont conformes à la norme EN 50380.



D. Les caractéristiques électriques du panneau à la couche mince tellure de cardium :

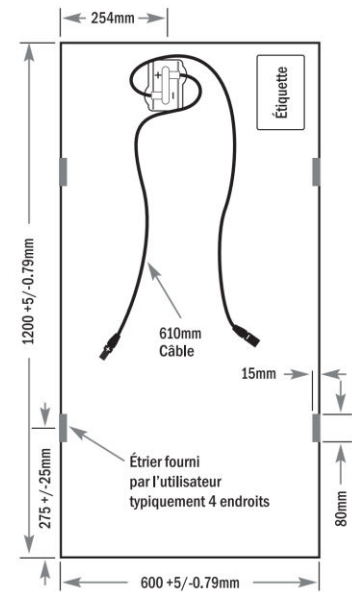
Spécifications Electriques

NUMEROS DES MODELES ET CARACTERISTIQUES NOMINALES A STC ^{1*}						
Valeurs nominales		FS-380	FS-382	FS-385	FS-387	FS-390
Puissance nominale (+/-5%)	$P_{MPP}(W)$	80,0	82,5	85,0	87,5	90,0
Tension à P_{MAX}	$V_{MPP}(V)$	48,5	48,3	48,5	49,2	49,2
Courant à P_{MAX}	$I_{MPP}(A)$	1,65	1,71	1,76	1,78	1,83
Tension à vide	$V_{OC}(V)$	60,8	60,8	61,0	61,0	61,0
Courant de court-circuit	$I_{SC}(A)$	1,88	1,94	1,98	1,98	2,04
Tension du système maximale	$V_{SYS}(V)$	1000				
Courant inverse maximal	$I_R(A)$	3,5				
Fusible max en série	$I_{CF}(A)$	3,5				

CARACTÉRISTIQUES DE TEMPÉRATURE		
Valeurs nominales		
Coefficient de température de P_{MPP}	$T_K(P_{MPP})$	-0,25%/°C
Coefficient de température de V_{OC} , haute temp (>25°C)	$T_K(V_{OC}, \text{haute temp})$	-0,27%/°C
Coefficient de température de V_{OC} , basse temp (-40°C à +25°C)	$T_K(V_{OC}, \text{basse temp})$	-0,20%/°C
Coefficient de température de I_{SC}	$T_K(I_{SC})$	+0,04%/°C

NUMEROS DES MODELES ET CARACTERISTIQUES NOMINALES A 800W/m ² , NOCT ² 45°C, AM 1,5*						
Valeurs nominales		FS-380	FS-382	FS-385	FS-387	FS-390
Puissance nominale (+/-5%)	$P_{MPP}(W)$	60,0	61,9	63,8	65,6	67,5
Tension à P_{MAX}	$V_{MPP}(V)$	45,5	45,3	45,5	46,2	46,2
Courant à P_{MAX}	$I_{MPP}(A)$	1,32	1,37	1,41	1,42	1,46
Tension à vide	$V_{OC}(V)$	56,5	56,5	56,7	56,7	56,7
Courant de court-circuit	$I_{SC}(A)$	1,54	1,59	1,62	1,62	1,67

Dessin Mécanique



*Toutes caractéristiques nominales +/-10 %, sauf indication contraire. Spécifications sous réserve de modifications.

¹Conditions de test standard (STC) 1000W/m², AM 1,5, 25°C.

²Température nominale opérationnelle de la cellule: température opérationnelle du module avec une irradiance de 800W/m², une température de l'air à 20°C et une vitesse du vent de 1m/s

Fiabilité et Sécurité

Tests par les principaux instituts internationaux et certification de fiabilité et sécurité selon:

- IEC 61646
 - IEC 61730
 - IEC 61701
 - Marquage CE
 - Classe de protection II @ 1000 V
 - MCS
- Tests de corrosion au brouillard de sel et



Résumé

L'objectif de cette mémoire est de comparer les différentes technologies utilisées dans les panneaux solaires à la station Oued Nechou, en vue d'identifier la technologie appropriée pour cette zone.

Nous avons mené une étude comparative à travers les données réelles stockées au niveau de la station Oued Nechou (SKTM)

Dans notre étude, nous nous sommes concentrés sur la comparaison des rendements des panneaux solaires pendant quatre saisons de l'année 2016 et les facteurs affectent les caractéristiques des panneaux solaires comme la température et l'éclairage.

Mots clés : panneaux solaires photovoltaïques, température, éclairage, retours, données réelles, centrale électrique Oued Nechou (SKTM).

Abstract

The aim of this memory is to compare the different technologies used in solar panels at the Oued Nechou station, with a view to identifying the appropriate technology for this area.

We carried out a comparative study using the actual data stored at the Oued Nechou station (SKTM)

In our study, we focused on comparing solar panel yields over four seasons of the year 2016 and factors affect the characteristics of solar panels such as temperature and illumination.

Key words: photovoltaic solar panels, temperature, illumination, yield, actual data, Oued Nechou power station (SKTM).

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو المقارنة بين مختلف التكنولوجيات المستخدمة في الألواح الشمسية الموجودة بمحطة واد نشو وهذا بغرض معرفة نوع التكنولوجيا المناسبة لهذه المنطقة.

قمنا بدراسة مقارنة من خلال المعطيات الحقيقية المخزنة على مستوى المحطة.

ركزنا في دراستنا على مقارنة مردودية الألواح الشمسية خلال اربعة فصول من سنة 2016 والعوامل المؤثرة على خصائص الألواح الشمسية.

الكلمات المفتاحية: الألواح الشمسية الكهروضوئية، درجة الحرارة، المردود، المعطيات الحقيقية، محطة توليد الكهرباء في وادي نشو (SKTM).