

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU**

**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique  
Département Electronique**

**Centre de Développement des Energies Renouvelables**



**Mémoire de Master  
Spécialité : Micro-électronique**

**Soutenu publiquement le : 26/09/2018**

**Par :**

**M<sup>elle</sup> HAMADOUCHE Katia**

**M<sup>elle</sup> KEBCI Nadia**

**Thème :**

**Etude et caractérisation d'un module photovoltaïque  
au silicium monocristallin**

**Composition du jury :**

Présidente :	M <sup>me</sup> Hatem Djedjiga	Maître de conférences Classe A
Encadreur :	M <sup>f</sup> Malek Ali	Directeur de recherche au CDER
Examinatrice :	M <sup>me</sup> Boughias Ouiza	Enseignante
Co-encadreur :	M <sup>me</sup> Amara Karima	Doctorante

## Remerciements

*Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté de réaliser ce mémoire.*

*Nous adressons nos remerciements à Monsieur MALEK Ali, directeur de recherche au CDER de nous avoir encadré, orienté et conseillé pour bien mener ce travail.*

*Nous tenons à remercier aussi mademoiselle HOCINE Dalila, maitre de conférences A à l'université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou de nous avoir aidé et proposé le thème de ce mémoire.*

*Nous voudrions remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, de près et de loin tout particulièrement Monsieur MEHAREB Fatah, ingénieur de soutien à la recherche au CDER.*

*Nos sincères remerciements aux membres de Jury de leur présence pour évaluer et examiner notre travail.*

# ***Dédicaces***

*Nous dédions ce modeste travail à :*

*Nos très chers parents,*

*Nos frères et sœurs,*

*Nos familles et nos amis.*

*Katia et Nadia*

## Symboles et abréviations

**CDER** : Centre de Développement des Energies Renouvelables

**AM** : nombre de masse d'air (Air Mass)

**AM 0** : correspond aux conditions hors atmosphère

**AM 1** : correspond à l'irradiation hors atmosphère

**AM 1.5** : c'est quand le soleil fait un angle de  $45^\circ$  par rapport au zénith

**$\theta$**  : angle que fait le soleil avec son zénith

**h** : constante de Planck ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J/K)

**v** : fréquence ( $v = C/\lambda$ ) en Hertz

**C** : vitesse de la lumière ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

**$\lambda$**  : longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )

**Eg** : énergie du gap (eV)

**e<sup>-</sup>** : les électrons

**e<sup>+</sup>** : les trous

**Ld** : la longueur de diffusion des porteurs de charge

**$\mu$**  : mobilité des porteurs de charge

**BC** : Bande de conduction

**BV** : Bande de valence

**PV** : photovoltaïque

**I<sub>ph</sub>** ou **I<sub>pv</sub>** : photo-courant (A)

**R<sub>s</sub>** : Résistance série d'une cellule photovoltaïque ( $\Omega$ )

**R<sub>sh</sub>** ou **R<sub>p</sub>** : Résistance shunt d'une cellule photovoltaïque ( $\Omega$ )

**I<sub>sc</sub>** ou **I<sub>cc</sub>** : Courant de court-circuit (A)

**R<sub>ch</sub>** : résistance de charge ( $\Omega$ )

**I** : courant délivrée par la cellule ou module photovoltaïque (A)

**V** : tension générée par la cellule ou module photovoltaïque (V)

**I<sub>d</sub>** ou **I<sub>D</sub>** : courant de diode (A)

**D** : diode

**I<sub>0</sub>** : courant de saturation inverse de la diode (A)

**V<sub>T</sub>** : potentiel thermodynamique ( $V_T = kT/q$ ) en Volts

**k**: constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K)

**T** ou **T<sub>c</sub>** : température de la cellule (Kelvin)

**q** : charge d'un électron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C)

**α** ou **n** : le facteur d'idéalité de la jonction

**I<sub>s</sub>** : courant de saturation de la diode (A)

**I<sub>obs</sub>** : courant d'obscurité (A)

**V<sub>co</sub>** : tension de circuit ouvert (V)

**FF** : facteur de forme

: rendement de la conversion

**E** ou **G** : éclairement incident ( $W/m^2$ )

**S** : surface du module ( $m^2$ )

**STC** : conditions standard de test (Standard Test Conditions)

**CdTe** : Tellure de Cadmium

**CIGS** : les alliages (cuivre-indium/ galium-sélénium)

**Si** : Silicium

**R** : coefficient de réflexion

: coefficient d'absorption

**N<sub>s</sub>** : nombre de cellules en série

**V<sub>CONs</sub>** : somme des tensions en circuit ouvert de N<sub>s</sub> cellules en série

**I<sub>CCN<sub>s</sub></sub>** : courant de court-circuit de N<sub>s</sub> cellules en série

**N<sub>p</sub>** : nombre de cellules en parallèle

**V<sub>CONp</sub>** : somme des tensions en circuit ouvert de N<sub>p</sub> cellules en parallèle

**I<sub>CCN<sub>p</sub></sub>** : courant de court-circuit de N<sub>p</sub> cellules en parallèle

**P<sub>c</sub>** : puissance crête (Wc)

**M** : point de puissance maximale

**$V_m$**  : la tension du module (V)

**$P_{max}$**  : puissance maximale (W)

**$I_{mp}$**  : courant au point de puissance maximale (A)

**$V_{mp}$**  : tension au point de puissance maximale (V)

---

## Liste des figures

### Chapitre 1

- Figure 1.1 Les différentes composantes du rayonnement solaire
- Figure 1.2 Systèmes de coordonnées pour repérer la position apparente du soleil
- Figure 1.3 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM
- Figure 1.4 Description de l'effet photovoltaïque
- Figure 1.5 Structure basique d'une cellule solaire
- Figure 1.6 Schéma équivalent d'une cellule PV (modèle à deux diodes)
- Figure 1.7 Schéma électrique de base de l'effet photovoltaïque
- Figure 1.8 Circuit électrique équivalent d'une cellule PV (Modèle idéal)
- Figure 1.9 Circuit électrique équivalent avec pertes ohmiques d'une cellule PV
- Figure 1.10 Circuit électrique équivalent d'une cellule PV (modèle à une diode)
- Figure 1.11 Circuit électrique équivalent d'une cellule PV (modèle à deux diodes)
- Figure 1.12 Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque
- Figure 1.13 Cellule au Silicium monocristallin
- Figure 1.14 Cellule au Silicium Poly cristallin.
- Figure 1.15 Cellule au Silicium amorphe

### Chapitre 2

- Figure 2.1 Méthode de BRIDGEMAN
- Figure 2.2 Méthode de CZOCHRALSKI
- Figure 2.3 Méthode de la zone flottante
- Figure 2.4 structure cristallographique du silicium monocristallin (type diamant) [Sze 2007]
- Figure 2.5 structure de bandes du silicium monocristallin [Lévy 1995]
- Figure 2.6 Coefficient de réflexion  $R$  et d'absorption  $\alpha$  du silicium monocristallin en fonction de la longueur d'onde [Von Allmen 1995]
- Figure 2.7 Vue en coupe schématique d'une cellule solaire mono-Si
- Figure 2.8 Représentation schématique d'une vue en coupe d'un module au silicium cristallin
- Figure 2.9 Association des cellules solaires en série
- Figure 2.10 Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $N_s$  cellules identiques
- Figure 2.11 Association des cellules solaires en parallèle
- Figure 2.12 Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $N_p$  cellules identiques
- Figure 2.13 Association mixte des modules
- Figure 2.14 Caractéristique résultante d'un groupement mixte
- Figure 2.15 Protection d'un module ombragé par des diodes by-pass
- Figure 2.16 Caractéristique  $I(V)$  d'un module PV
- Figure 2.17 Caractéristiques  $P(V)$  d'un module solaire PV
- Figure 2.18 Les différentes zones de la caractéristique  $I(V)$

### Chapitre 3

- Figure 3.1 Circuit équivalent d'une cellule PV
- Figure 3.2 Bloc schématique d'un module photovoltaïque simulé sous Matlab/Simulink
- Figure 3.3 La caractéristique I(V) sous différents niveaux d'irradiation à  $T=25^{\circ}\text{C}$
- Figure 3.4 La caractéristique P(V) sous différents niveaux d'irradiation à  $T=25^{\circ}\text{C}$
- Figure 3.5 La caractéristique I(V) sous différentes températures à  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$
- Figure 3.6 La caractéristique P(V) sous différentes températures à  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$
- Figure 3.5 Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de  $R_s$  à  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et à  $T=25^{\circ}\text{C}$
- Figure 3.7 Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de  $R_s$  à  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et à  $T=25^{\circ}\text{C}$
- Figure 3.8 La caractéristique I(V) pour différentes valeurs de  $R_{sh}$  à  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et à  $T=25^{\circ}\text{C}$
- Figure 3.9 La caractéristique P(V) pour différentes valeurs de  $R_{sh}$  à  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et à  $T=25^{\circ}\text{C}$
- Figure 3.10 Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de  $n$  à  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et à  $T=25^{\circ}\text{C}$
- Figure 3.11 Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de  $n$  à  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et à  $T=25^{\circ}\text{C}$

### Chapitre 4

- Figure 4.1 Les différentes couches constituant le module photovoltaïque "Condor 155p"
- Figure 4.2 Le module photovoltaïque utilisé
- Figure 4.3 Schéma descriptif du banc de test
- Figure 4.4 Photo du circuit de caractérisation
- Figure 4.5 Interface graphique de commande et d'affichage utilisée
- Figure 4.6 Photo du capteur d'irradiation et de température
- Figure 4.7 Module photovoltaïque ombragé
- Figure 4.8 Caractéristiques I(V) avant et après l'ombrage
- Figure 4.9 Caractéristiques P(V) avant et après l'ombrage
- Figure 4.10 Photo du module avec et sans salissure
- Figure 4.11 Caractéristiques I(V) avec et sans salissure
- Figure 4.12 Caractéristiques P(V) avec et sans salissure
- Figure 4.13 Caractéristique I(V) pour différentes irradiances et température
- Figure 4.14 Caractéristique P(V) pour différentes irradiances et température
- Figure 4.15 Variation du courant de court-circuit  $I_{cc}$  avec l'irradiation.
- Figure 4.16 Variation de la puissance maximale  $P_{max}$  avec l'irradiation.
- Figure 4.17 Variation du courant de puissance maximale  $I_{mp}$  avec l'irradiation

## Liste des tableaux

### Chapitre 4

Tableau 4.1 Relevé des mesures effectuées avec le module photovoltaïque au silicium monocristallin avec et sans ombrage

Tableau 4.2 Relevé des mesures effectuées avec le module photovoltaïque au silicium monocristallin avec et sans salissure

Tableau 4.3 Relevé des mesures effectuées avec le module photovoltaïque au silicium monocristallin pour différentes irradiations et températures

# Sommaire

## Introduction générale

### Chapitre 1 : Etude de la cellule photovoltaïque

#### Introduction

1.1 Le rayonnement solaire .....	03
1.2 La masse d'air (AM) .....	04
1.3 L'effet photovoltaïque .....	05
1.4 La cellule photovoltaïque .....	06
1.4.1 La définition de la cellule photovoltaïque .....	06
1.4.2 La structure de la cellule photovoltaïque .....	06
1.4.3 Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	07
1.4.4 Le schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque .....	08
1.4.4.1 Le générateur de courant $I_{ph}$ .....	09
1.4.4.2 La résistance série $R_s$ .....	09
1.4.4.3 La résistance parallèle $R_{sh}$ .....	09
1.4.5 Les modèles de la cellule photovoltaïque .....	09
1.4.6. Les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque .....	14
1.4.6.1 Sans éclairage .....	14
1.4.6.2 Sous éclairage .....	15
1.4.6.2.1 Le courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	15
1.4.6.2.2 La tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	15
1.4.6.3 Le facteur de forme FF .....	16
1.4.6.4 Le rendement .....	16
1.4.7 Les différentes technologies de la cellule photovoltaïque .....	17
1.4.7.1 Les cellules photovoltaïques au silicium cristallin .....	17
1.4.7.1.1 La technologie monocristalline .....	17
1.4.7.1.2 La technologie poly-cristalline (multi cristalline) .....	18
1.4.7.1.3 La technologie amorphe .....	18
1.4.7.2. Les couches minces .....	19
1.4.7.2.1 Silicium en couches minces (amorphe) .....	20
1.4.7.2.2 Les cellules au Tellure de Cadmium (CdTe) .....	20
1.4.7.2.3. Les cellules basées sur les alliages cuivre-indium/ galium-sélénium (CIGS) .....	20
Conclusion	

### Chapitre 2 : Les modules photovoltaïques au silicium monocristallin

#### Introduction

2.1. Le silicium monocristallin .....	22
2.2. Les méthodes d'élaboration du silicium monocristallin .....	22
2.2.1. La méthode de BRIDGEMAN .....	22
2.2.2. La méthode de tirage (CZOCHRALSKI) .....	23
2.2.3. La méthode de la zone flottante .....	24
2.3. La structure du Silicium monocristallin .....	25
2.4. Les propriétés électroniques et optiques du Silicium monocristallin .....	26

2.5. Les avantages et les inconvénients du Silicium monocristallin .....	27
2.6. Du lingot à la cellule solaire au silicium monocristallin .....	28
2.7. De la cellule solaire au module photovoltaïque .....	29
2.7.1. La définition d'un module photovoltaïque .....	29
2.7.2. La constitution d'un module photovoltaïque .....	29
2.7.3. L'association des cellules photovoltaïques .....	30
2.7.3.1. Association série .....	31
2.7.3.2. Association parallèle .....	32
2.7.3.3. Association hybride (série/parallèle).....	33
2.7.3.4. La puissance crête .....	34
2.7.3.5. La protection par diode parallèle (by-pass) .....	35
2.7.3.6. La protection par diode série (anti-retour) .....	36
2.8. Les caractéristiques d'un module photovoltaïque .....	36
2.8.1. La caractéristique courant-tension I(V) .....	36
2.8.2. La caractéristique puissance-tension P(V) .....	37
2.9. Les zones de fonctionnement du module photovoltaïque .....	37
Conclusion	

### **Chapitre 3 : Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin**

#### Introduction

3.1. La modélisation d'un module photovoltaïque.....	40
3.2. La simulation d'un module photovoltaïque.....	42
3.2.1. L'effet de l'éclairement .....	42
3.2.2. L'effet de la température .....	44
3.2.3. Influence de la résistance série ( $R_s$ ) .....	45
3.2.4. Influence de la résistance parallèle ( $R_{sh}$ ) .....	46
3.2.5. Effet de facteur d'idéalité de la diode (optionnel) .....	47

#### Conclusion

### **Chapitre 4: Caractérisation d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin**

#### Introduction

4.1. La description du banc de test expérimentale .....	50
4.1.1. Le module photovoltaïque monocristallin.....	50
4.1.2. Le circuit de caractérisation .....	51
4.1.3. Les capteurs d'irradiation et de température .....	53
4.2. L'effet de l'ombrage .....	54
4.3. L'effet de la salissure .....	56
4.4. Les performances du module pour différentes irradiances et températures .....	58

#### Conclusion

#### **Conclusion générale**

#### Bibliographie

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'épuisement des ressources énergétiques fossiles associées à l'augmentation continue de la demande et de la consommation de l'électricité ainsi que la pollution causée par l'utilisation de ces carburants et le réchauffement climatique engendré par les gaz à effet de serre rendent l'investissement dans le domaine des énergies renouvelables une des meilleures solutions dans de nombreux pays du monde.

Toute source d'énergie inépuisable, qui se renouvelle rapidement est considérée comme une source d'énergie renouvelable tels que l'énergie solaire, hydraulique, éolienne et biomasse.

Parmi toutes ces énergies renouvelables, notre travail se concentrera sur l'énergie solaire photovoltaïque qui consiste à convertir directement l'énergie solaire en électricité. Le phénomène physique produit par cette conversion est l'effet photovoltaïque découvert en 1839 par le français Antoine-César Becquerel.

L'élément de base de ce phénomène est bien la cellule photovoltaïque exposée à la lumière du soleil.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a porté sur l'étude, la modélisation, la simulation et la caractérisation d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin.

Pour y faire, nous allons le présenter ainsi :

Dans le premier chapitre, nous décrivons en premier lieu le rayonnement solaire et ses différents types, la masse d'air qui est le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre le sol et l'épaisseur à la verticale du lieu. Puis, nous présentons en détails l'élément principal de l'effet photovoltaïque; en donnant sa structure, son fonctionnement, son circuit électrique équivalent en prenant compte des différents facteurs limitatifs ensuite nous décrivons les principaux types de la photopile ainsi que ses principales caractéristiques après avoir défini les paramètres photovoltaïques à partir desquels nous évaluons les performances des cellules solaires.

Dans la première partie du deuxième chapitre, nous nous concentrons sur le module photovoltaïque qui est un équipement d'une surface de l'ordre de  $1 \text{ m}^2$ , il est composé d'un ensemble de cellules solaire de  $10$  à  $20 \text{ cm}^2$  reliées entre elles. Les cellules sont fabriquées à partir de plaquettes d'un matériau semi-conducteur, c'est-à-dire qui a la propriété de pouvoir conduire un courant électrique dans certaines conditions uniquement; le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium.

Selon la technologie monocristalline qu'on a étudié, la transformation du silicium en module photovoltaïque en passant d'abord par le tirage des lingots de silicium cristallisé en un seul cristal par trois méthodes principales (la méthode de BRIDGEMAN, la méthode de tirage (CZOCHRALSKI) et la méthode de la zone flottante) dans lesquelles seront découpés en plaquettes de silicium dites wafers nécessaires à la fabrication des cellules monocristallines.

Dans la deuxième partie, nous décrivons les structures cristallographiques du silicium monocristallin, ses propriétés optiques et électroniques et nous présentons aussi les avantages et les inconvénients liés à cette structure avant de passer à l'association des cellules en série, parallèle ou hybride (série-parallèle) pour constituer un module photovoltaïque.

Dans la dernière partie du même chapitre, nous passons aux caractéristiques fondamentales du module photovoltaïques qui varient proportionnellement en fonctions de l'éclairement et de la température. Nous commençons par la caractéristique courant-tension  $I(V)$  qui se trace sous un éclairement fixe et une température constante ensuite la caractéristique puissance-tension  $P(V)$  du module qui peuvent délivrer une puissance maximale dans les conditions de références (STC) : une irradiation du  $1000 \text{ W/m}^2$ , une température de  $25^\circ\text{C}$  et un spectre de référence AM 1.5.

Le troisième chapitre est consacré pour la modélisation et la simulation d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin sous Matlab/Simulink. En premier lieu, nous commençons par la modélisation mathématique en utilisant le modèle de la cellule à une diode puis nous tirons les caractéristiques mathématiques.

Dans la deuxième partie, nous passons à la simulation d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin (modèle Condor 155p) composé de 36 cellules. Nous montrons par les résultats de simulation l'influence des paramètres qui rentrent dans la performance et la production électrique du module comme l'effet de l'éclairement et la température, la variation de la résistance série ( $R_s$ ), la résistance parallèle ( $R_{sh}$ ) et le facteur d'idéalité  $n$ .

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présentons les résultats de mesures effectuées sur le module photovoltaïque de technologie monocristalline dans les conditions réelles d'utilisation sur la plateforme de caractérisation photovoltaïque installée au CDER (Centre de Développement des Energies Renouvelables).

Nous étudions l'effet d'ombrage, l'effet de la salissure sur les performances du module ainsi que l'impact de différentes irradiations et températures.

Nous finissons notre travail par une conclusion générale.

# **Chapitre 1**

## **Etude de la cellule photovoltaïque**

## Introduction

Dans ce chapitre, il est décrit premièrement, le principe de la conversion directe du rayonnement lumineux en électricité (effet photovoltaïque), après avoir défini le composant de base qui est la cellule solaire (photovoltaïque).

Dans la deuxième partie, le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, ainsi que ses caractéristiques seront étudiés.

La dernière partie citera les différentes technologies de la cellule solaire.

### 1.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire reçu par la terre avoisine les  $1350 \text{ W/m}^2$  en incidence normale, avant d'aborder la couche atmosphérique [1].

Il est partiellement absorbé et diffusé en traversant l'atmosphère.

On distingue alors quatre types de rayonnement, au sol.

- **Le rayonnement direct:** c'est le rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un **Pyrhéliomètre**.
- **Le rayonnement diffus:** c'est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un **Pyranomètre** avec écran masquant le soleil.
- **Le rayonnement réfléchi** ou **l'albédo du sol:** c'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).
- **Le rayonnement global:** c'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 [2].

Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend ainsi de plusieurs paramètres comme:

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre.
- la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude.
- la période de l'année.
- l'instant considéré dans la journée.

- la nature des couches nuageuses [3].

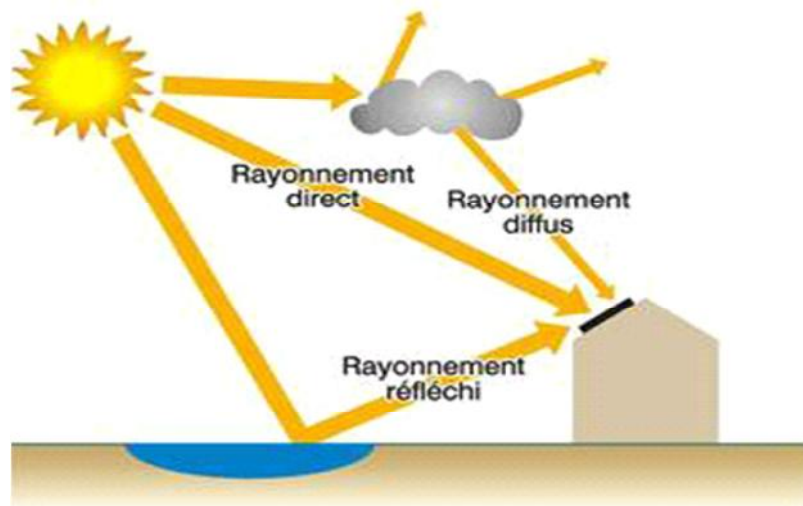


Figure 1.1 Les différentes composantes du rayonnement solaire [4]

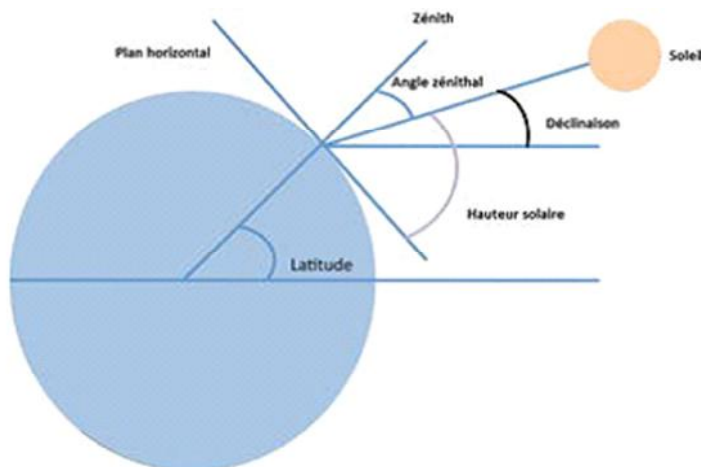


Figure 1.2 Systèmes de coordonnées pour repérer la position apparente du soleil [4]

## 1.2 La masse d'air (Air Mass) AM

Elle est définie comme le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire directe pour atteindre le sol et l'épaisseur à la verticale du lieu.

Sa valeur varie en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration  $\theta$  est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande.

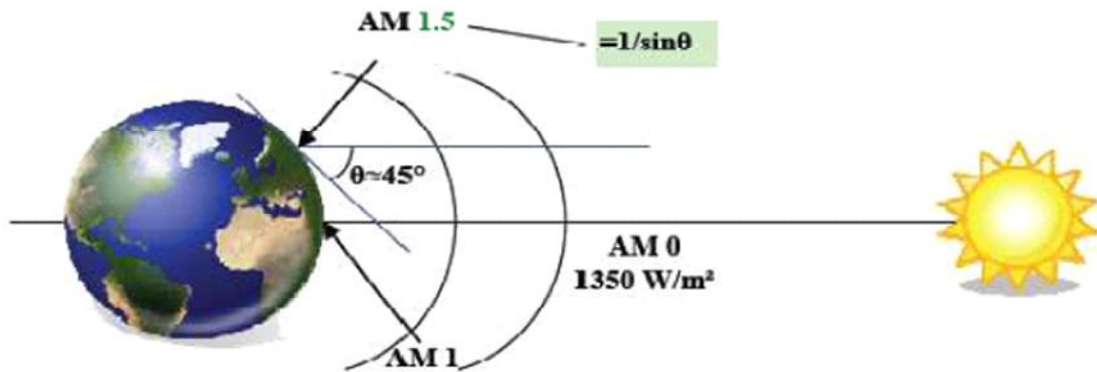


Figure 1.3 Normes de mesure du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [1]

La valeur de la masse d'air est donnée par l'équation suivante:

$$AM = \frac{1}{\sin \theta} \quad (1.1)$$

$\theta$  : est l'angle que fait le soleil avec son zénith.

**AM 0** : correspond aux conditions hors atmosphère.

**AM 1** : correspond à l'irradiation hors atmosphère.

**AM 1.5** : c'est quand le soleil fait un angle de  $45^\circ$  par rapport au zénith [3]

### 1.3 L'effet photovoltaïque

C'est le phénomène physique qui permet la conversion directe de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion consiste en l'apparition d'une force électromotrice aux bornes de la cellule photovoltaïque exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre 0.3 Volts et 0.7 Volts en fonction du matériau utilisé, sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

L'effet photovoltaïque a été découvert par Henri Becquerel en 1839.

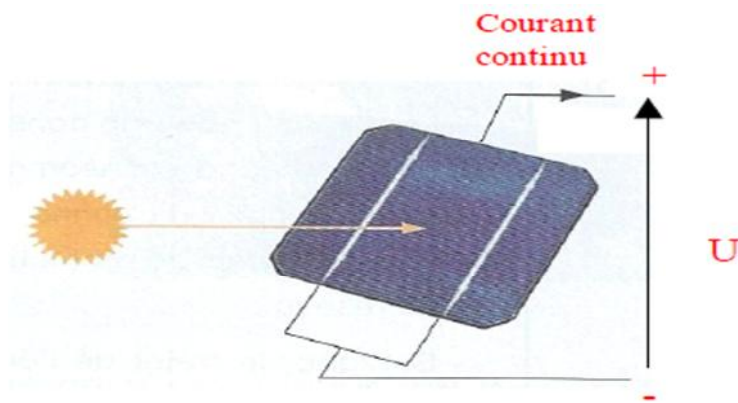


Figure 1.4 Description de l'effet photovoltaïque

## 1.4 La cellule photovoltaïque

### 1.4.1 La définition de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque appelée aussi photopile, est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur (généralement Silicium), lorsqu'elle est exposée au soleil transforme directement le rayonnement lumineux en électricité (énergie électrique).

### 1.4.2 La structure de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée de :

- Verre (A).
- Revêtement antireflet (B).
- Grille conductrice (C).
- Semi-conducteur dopé N (D).
- Semi-conducteur dopé P (E).
- Conducteur (F).

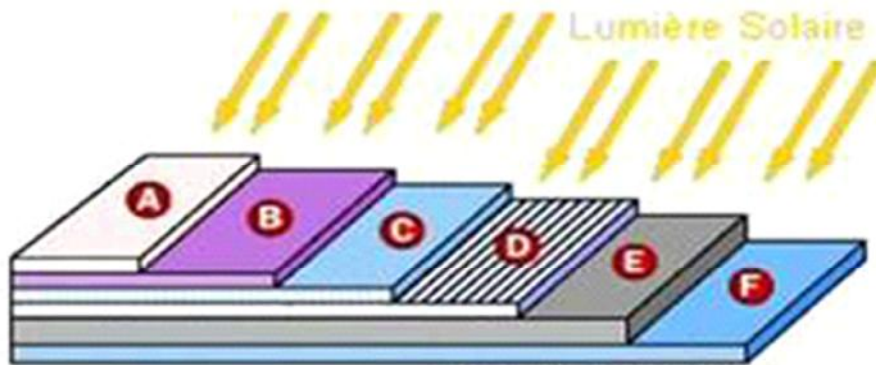


Figure 1.5 Structure basique d'une cellule solaire [3]

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont l'énergie est transférée aux électrons, le rayon traverse le verre puis la grille. Le revêtement antireflet subit un simple passage du rayon.

Pour rendre l'une des couches semi-conductrice négative, on intègre au silicium des atomes de phosphore (Silicium dopé N), une barrière de potentiel sera ainsi créée.

Quand le semi-conducteur absorbe un photon énergétique, la rupture d'une liaison entre un électron et son atome est produite, un électron est libéré et un trou est créé.

L'électron libéré se déplace entre l'anode et la cathode, c'est-à-dire création d'un courant électrique, l'effet photovoltaïque est donc réalisé.

### 1.4.3 Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La transformation de la lumière en électricité est basée sur les quatre étapes suivantes:

#### 1.4.3.1 Absorption de la lumière dans le matériau semi-conducteur

C'est grâce au phénomène d'absorption qu'une partie du flux lumineux sera restituée sous forme d'électricité.

Le gap est la caractéristique la plus importante pour l'absorption; c'est l'écart entre le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence d'un matériau.

La bande de valence doit être occupée par les électrons et la bande de conduction vide.

Lorsque l'énergie du photon est inférieure à celle du gap ( $E = h \nu < E_g$ ); le photon n'est pas absorbé.

Dans le cas d'un photon suffisamment énergétique ( $E = h \nu \geq E_g$ ); l'interaction (photon/semi-conducteur) se traduit par la génération d'une paire (électron/trou) qui modifie localement la conductivité du matériau.

### **1.4.3.2 Transfert de l'énergie des photons en énergie électrique : création des paires (électron/trou) dans le semi-conducteur**

Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes.

Si l'énergie apportée par le photon est supérieure à celle du gap du matériau; les électrons seront donc libérés de l'attraction de l'atome. Il y aura donc création d'une paire (électron/trou).

La circulation des électrons ( $e^-$ ) dans un sens et les trous ( $e^+$ ) dans l'autre formeront un courant électrique, lorsqu'une charge sera branchée.

### **1.4.3.3 Collecte des charges**

Le fait de créer des paires (électron/trou) ne suffit pas car celles-ci peuvent se recombiner naturellement provoquant uniquement de l'énergie thermique. Il faut séparer les charges pour qu'elles puissent circuler sans se recombiner.

### **1.4.3.4 Diffusion et recombinaison des porteurs**

Des recombinaisons au sein de la cellule auront lieu malgré le champ électrique créé par la jonction PN. Pour évaluer ces recombinaisons qui dépendent de la qualité du matériau, on utilise la longueur de diffusion des porteurs de charge ( $L_d$ ). Elle correspond à la distance moyenne que les porteurs peuvent parcourir avant de se recombiner. Elle dépend essentiellement de la qualité du matériau utilisé ainsi que de la mobilité ( $\mu$ ) du porteur concerné.

Les principaux mécanismes de recombinaisons sont les recombinaisons radiatives, Auger et Shockley-Read-Hall.

Une cellule solaire photovoltaïque est une diode semi-conductrice qui a été conçue et construite pour obtenir un rendement de conversion optimum des rayons lumineux en courant électrique [1].

## **1.4.4 Le schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque**

Pour reproduire le comportement de la cellule à l'aide des composants électroniques, il existe plusieurs modèles électriques appelés aussi circuits équivalents.

Les circuits à une et à deux diodes sont utilisés généralement pour modéliser les cellules cristallines constituées d'une jonction PN.

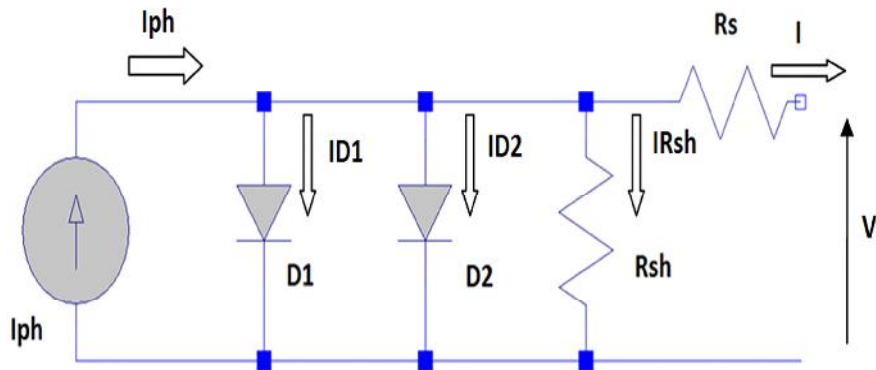


Figure 1.6 Schéma équivalent d'une cellule PV (modèle à deux diodes) [4]

La figure 1.6 propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque en prenant compte les différents facteurs limitatifs suivants :

#### 1.4.4.1 Le générateur de courant $I_{ph}$

Correspondant au courant photo-généré en produisant un courant proportionnel à la quantité de lumière reçue par la cellule.

#### 1.4.4.2 La résistance série $R_s$

Elle est due principalement à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques.

Elle peut-être déterminée à partir de la courbe  $I(V)$  en calculant la dérivée de celle-ci aux environs de  $V_{co}$ .

#### 1.4.4.3 La résistance parallèle $R_{sh}$

La résistance parallèle ou de court-circuit est due aux impuretés proches de la jonction, elle traduit la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur.

Elle peut-être déterminée à partir de la courbe  $I(V)$  en calculant la dérivée de celle-ci aux environs de  $I_{sc}$ .

Comme la cellule photovoltaïque comporte des résistances parasites ( $R_s$  et  $R_{sh}$ ), elle ne peut pas être considérée comme une diode idéale.

#### 1.4.5 Les modèles de la cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux modèles représentatifs pour la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

### 1.4.5.1 Le modèle de base

Le principe de l'effet photovoltaïque est celui d'une diode, lorsque la jonction PN est exposée à la lumière, la cellule étant chargée par une résistance. Il y'aura apparition d'un courant  $I$  qui traverse la charge  $R_{ch}$ , et une tension  $V$  aux bornes de la charge.

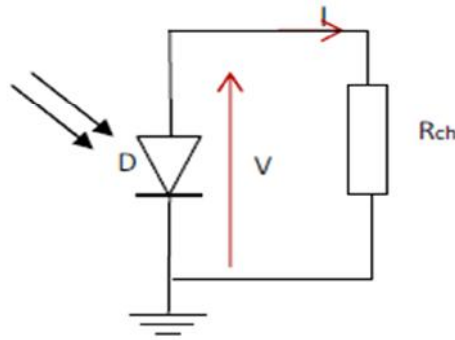


Figure 1.7 Schéma électrique de base de l'effet photovoltaïque [1]

### 1.4.5.2 Le modèle idéal

Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montées en parallèle. Le photo-courant  $I_{ph}$  produit par la source de courant est directement proportionnel à l'éclairement solaire.

C'est le modèle le plus simple pour représenter une cellule solaire puisqu'il tient compte uniquement du phénomène de diffusion.

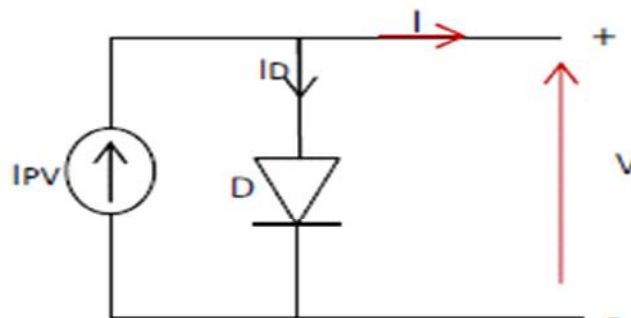


Figure 1.8 Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (modèle idéal) [1]

L'équation courant-tension  $I(V)$  du circuit équivalent est donnée comme suit:

$$I = I_{PV} - I_D \quad (1.2)$$

Avec :

**I** : courant fourni par la cellule

**I<sub>PV</sub>** : photo courant de la cellule proportionnel à l'éclairement.

$$\mathbf{I_D} = \mathbf{I_0}[\mathbf{exp}^{\left(\frac{\mathbf{v}}{\mathbf{aV_T}}\right)} - \mathbf{1}] \quad (1.3)$$

Et :

$$\mathbf{V_T} = \frac{\mathbf{kT}}{\mathbf{q}} \quad (1.4)$$

Donc, l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I_{PV}} - \mathbf{I_0}[\mathbf{exp}^{\left(\frac{\mathbf{v}}{\mathbf{aV_T}}\right)} - \mathbf{1}] \quad (1.5)$$

Avec :

**I<sub>0</sub>** : courant de saturation inverse de la diode.

**V<sub>T</sub>** : potentiel thermodynamique.

**k**: la constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  Joules/Kelvin).

**T**: la température de la cellule en Kelvin.

**q** : la charge d'un électron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C).

**a** : le facteur d'idéalité de la jonction.

**V**: la tension aux bornes de la cellule [1].

### 1.4.5.3 Le modèle avec pertes ohmiques

Dans ce modèle, la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts sont tenues en compte. Cela permet une meilleure représentation du comportement électrique par rapport au modèle idéal.

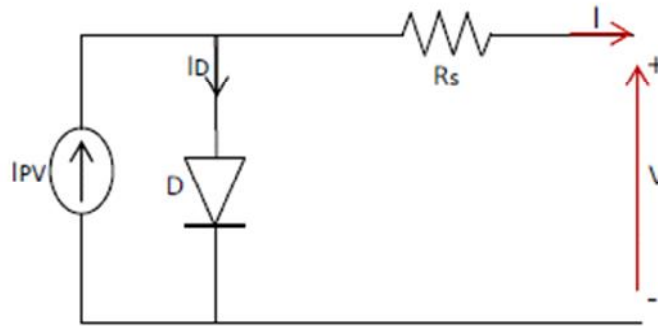


Figure 1.9 Circuit électrique équivalent avec pertes ohmiques d'une cellule photovoltaïque [5]

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

$$I = I_{PV} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{a V_T}\right) - 1 \right] \quad (1.6)$$

Avec :

$R_s$  : La résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.

#### 1.4.5.4 Le modèle réel à une diode

Les constructeurs s'appuient sur ce modèle en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires ; ils le considèrent satisfaisant pour cataloguer les modules solaires.

Ce modèle tient compte des pertes en tension exprimées par  $R_s$  et aussi des fuites de courant exprimées par  $R_p$ .

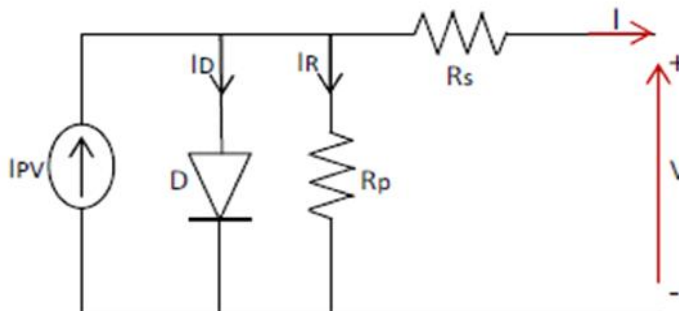


Figure 1.10 Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (modèle à une diode) [5]

L'équation du courant délivré par la cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{\text{PV}} - \mathbf{I}_0 \left[ \exp\left(\frac{\mathbf{V} + \mathbf{I}R_s}{a V_T}\right) - 1 \right] \left[ \frac{\mathbf{V} + \mathbf{I}R_s}{R_p} \right] \quad (1.7)$$

$R_p$  : La résistance modélisant les courants de fuite de la jonction [1].

#### 1.4.5.5 Le modèle réel à deux diodes

Le modèle à deux diodes est le plus proche du comportement réel d'une cellule solaire car il tient compte du phénomène de transfert des charges à l'intérieur de la cellule. La seconde diode permet de reproduire les effets de recombinaison des électrons dans le schéma équivalent.

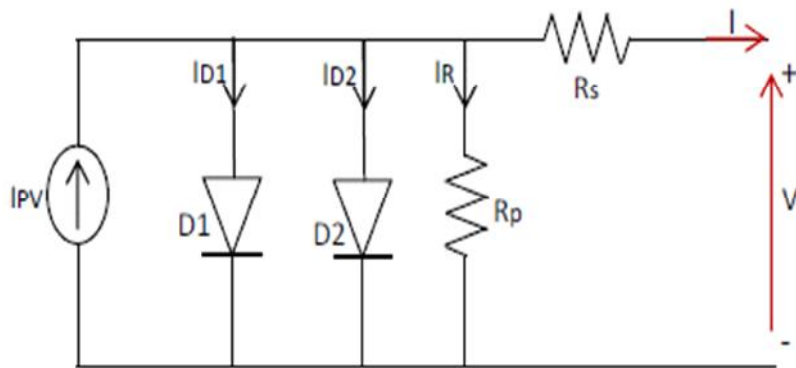


Figure 1.11 Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (modèle à deux diodes) [1]

L'équation suivante décrit le courant de sortie de la cellule photovoltaïque pour le modèle à deux diodes:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{\text{PV}} - \mathbf{I}_{D1} \left[ \exp\left(\frac{\mathbf{V} + \mathbf{I}R_s}{a1 V_{T1}}\right) - 1 \right] - \mathbf{I}_{D2} \left[ \exp\left(\frac{\mathbf{V} + \mathbf{I}R_s}{a2 V_{T2}}\right) - 1 \right] \left[ \frac{\mathbf{V} + \mathbf{I}R_s}{R_p} \right] \quad (1.8)$$

Avec :

$I_{D1}$  : courant de saturation inverse de la diode D1.

$I_{D2}$  : courant de saturation inverse de la diode D2.

$V_{T1}$ : potentiel thermodynamique de la diode D1.

$V_{T2}$ : potentiel thermodynamique de la diode D2. .

$a_1$ : le facteur d'idéalité de la jonction de la diode D1.

$a_2$ : le facteur d'idéalité de la jonction de la diode D2 [1].

#### 1.4.6. Les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque

Pour tirer les principaux paramètres caractérisant une cellule photovoltaïque, on s'intéresse à la caractéristique courant-tension  $I(V)$  suivante :

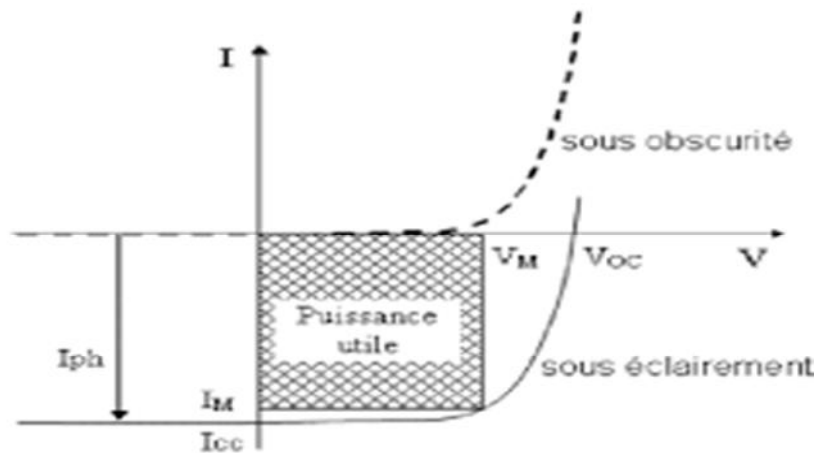


Figure 1.12 Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

##### 1.4.6.1 Sans éclairement (à l'obscurité)

La jonction PN suit la relation caractéristique d'une diode:

$$I_{obsc} = I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (1.9)$$

Avec :

$V$  : tension appliquée à la diode (V)

$V_T = kT/q$  : potentiel thermodynamique (V)

$k$  : constante de Boltzmann (J/K)

$q$  : charge de l'électron (C)

$T$  : température absolue (K)

$I_s$  : courant de saturation de la diode (A)

$I_{\text{obsc}}$  : courant d'obscurité (A) [4].

### 1.4.6.2 Sous éclairement

Lorsque la jonction PN est éclairée, elle fonctionne en générateur en produisant un courant  $I_{\text{ph}}$ .

L'équation  $I(V)$  suivante décrit le comportement en statique :

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_{obsc}} \quad (1.10)$$

Avec:

$$\mathbf{I_{obsc} = I_s [\exp(\frac{V}{V_T}) - 1]} \quad (1.11)$$

On aura:

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_s [\exp(\frac{V}{V_T}) - 1]} \quad (1.12)$$

$I_{\text{ph}}$ : le courant photo-généré [4].

#### 1.4.6.2.1 Le courant de court-circuit $I_{\text{cc}}$

Représente le courant délivré par la cellule lorsque celle-ci est en court-circuit ( $I_{\text{cc}} = I_{\text{ph}}$ ).

Ce courant varie selon le niveau d'éclairément principalement et selon la taille et la technologie de la cellule aussi.

#### 1.4.6.2.2 La tension de circuit ouvert $V_{\text{co}}$

C'est la tension débitée par la cellule lorsqu'elle ne délivre aucun courant ( $I = 0$ ) ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie.

La tension en circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque est comprise entre 0,3V et 0,7V selon le matériau utilisé.

$$\mathbf{V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \frac{I_{ph}}{I_s} + 1} \quad (1.13)$$

Avec:

$kT_c / q$  : représente le potentiel thermodynamique.

$k$ : la constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K).

$q$  : la charge d'un électron.

$T_c$  : la température absolue.

$I_s$  : le courant de saturation.

$I_{ph}$  : le courant photonique [5].

### Remarque :

$V_{co}$  varie linéairement avec la température et augmente avec le logarithme de  $I_{ph}$ .

#### 1.4.6.3 Le facteur de forme FF

C'est le rapport entre la puissance maximale ( $P_{max}$ ) que peut délivrer la cellule ( $I_{max} \cdot V_{max}$ ) et la puissance formée par le rectangle ( $I_{cc} \cdot V_{co}$ ).

Le facteur de forme est aussi un indicateur de la qualité de la jonction ainsi que des résistances série ou parallèle qui s'opèrent dans la cellule.

La cellule est meilleure tant que le facteur de forme se rapproche de 1.

Le facteur de forme est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule, il est défini par :

$$FF = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.14)$$

#### 1.4.6.4 Le rendement

C'est le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule photovoltaïque et la puissance lumineuse incidente.

Le rendement est défini par la relation suivante:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{E \cdot S} \quad (1.15)$$

Avec :

**E** : l'éclairement incident ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

**S** : la surface de ce module ( $\text{m}^2$ ) [1].

On mesure le rendement dans des conditions normalisées dites «STC» Standard Test Conditions suivantes :

- Un éclairement normal de  $1\,000\ \text{W}/\text{m}^2$ .
- La température à la jonction des cellules est de  $25^\circ\text{C}$  [1].

Le rendement est un paramètre très important puisque différentes cellules peuvent être comparées grâce à lui.

### **1.4.7 Les différentes technologies de la cellule photovoltaïque**

On peut distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques :

- Les matériaux solides à base de silicium cristallin.
- Les couches minces.

#### **1.4.7.1 Les cellules photovoltaïques au silicium cristallin**

Les cellules les plus utilisées sont encore aujourd'hui les cellules au silicium cristallin, dites de première génération, 80% des panneaux sur le marché.

##### **1.4.7.1.1 La technologie monocristalline**

Les cellules monocristallines sont les cellules solaires photovoltaïques de la première génération ; elles sont presque carrées ayant une couleur uniforme.

Les cellules sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin. Le silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau, lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer est alors découpé dans le barreau de silicium.

Après traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction PN, dépôt de couches antireflet, pose des collecteurs. Son rendement est de 12% à 18%.

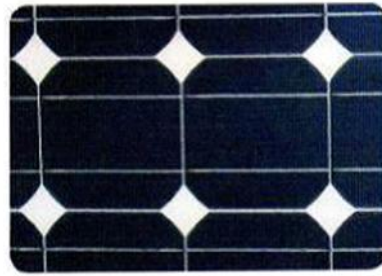


Figure1.13 Cellule au Silicium monocristallin

#### 1.4.7.1.2 La technologie poly-cristalline (multi-cristalline)

Les cellules poly-cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples, on peut voir les différentes orientations des cristaux, de près. Leurs rendement est de 11% à 16% mais leurs coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leurs fabrications par rapport aux cellules monocristallines. Sa durée de vie estimée est de 30 ans.

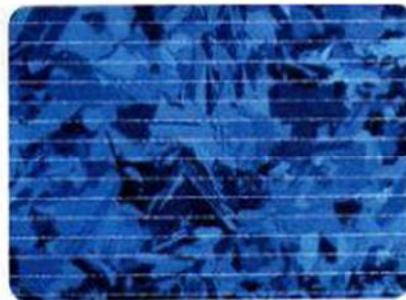


Figure1.14 Cellule au Silicium Poly-cristallin.

#### 1.4.7.1.3 La technologie amorphe

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal par un procédé de vaporisation sous vide.

Ces cellules ont un coût de production bien plus bas mais leurs rendement est de 6% à 10% ; il est moins bon que celui des technologies monocristalline et poly-cristalline.

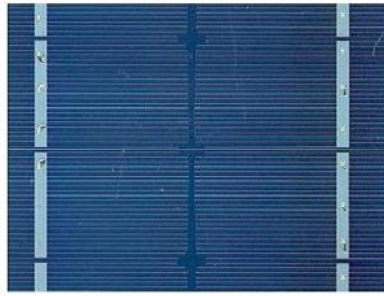


Figure 1.15 Cellule au Silicium amorphe

- **Les avantages et les inconvénients du silicium cristallin**

Elle présente les avantages suivants :

- Ce semi-conducteur se dope facilement.
- Le Silicium est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre après l'oxygène.
- Il possède un oxyde naturel  $\text{SiO}_2$  présentant d'excellentes propriétés électroniques.
- Les technologies de production sont aujourd'hui matures et leur industrialisation ne pose pas de difficulté.
- Les cellules photovoltaïques offrent un rendement de conversion élevé.
- La durée de vie et le vieillissement des cellules photovoltaïques sont maîtrisés.

Les principaux inconvénients de cette technologie sont :

- Un coût de fabrication élevé.
- Une performance qui diminue fortement lorsque la température du module augmente.
- Une performance qui diminue fortement à faible éclaircissement.
- Presque aucune flexibilité d'utilisation (surface rigide...).
- Un gap indirect à 1.12 eV : pour absorber 90% de l'énergie reçue, il faudrait une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$ , ce qui est conséquent notamment par rapport aux couches minces que nous verrons par la suite.

#### **1.4.7.2. Les couches minces**

Cette technologie fait appel à des procédés de fabrication visant la diminution de l'épaisseur des cellules. L'intérêt de cette technologie vient de la faible quantité de matériaux nécessaires à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules de première génération.

Il existe plusieurs technologies de couches minces commercialisées, l'une est basée sur le tellure de cadmium (CdTe) et l'autre sur les alliages cuivre-indium/ galium-sélénium (CIGS) et la plus mûre est celle du silicium amorphe.

### **1.4.7.2.1 Le silicium en couches minces (amorphe)**

Cette technologie est basée sur le silicium non cristallisé. Son processus de fabrication permet d'abaisser les coûts de production.

Malgré le faible rendement de 6% à 7%, cette technologie tend à se développer parce que le coût est très réduit par rapport au prix actuel des cellules de première génération.

### **1.4.7.2.2 Les cellules au Tellure de Cadmium (CdTe)**

Leurs structure consiste en une couche d'absorption de type N de CdTe est déposée sur le substrat de verre puis une couche de CdTe de type P, d'environ de 2  $\mu\text{m}$  et une couche conductrice de carbone servant de deuxième contact.

Cette technologie présente des rendements de l'ordre de 7% à 9% en industrie (en dessous du cristallin) qui dépend de la manière dont les couches sont déposées, mais bénéficie d'un faible coût à la production.

### **1.4.7.2.3. Les cellules basées sur les alliages (Cuivre-Indium/ Galium-Sélénium) CIGS**

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

Cette technologie produit actuellement le meilleur rendement de production.

L'avantage de cette technologie couches minces CIGS est la réduction du prix du matériau.

- **Les avantages et les inconvénients des couches minces**

Elles présentent les avantages suivants :

- Un fort potentiel de réduction des coûts liés à des processus de fabrication peu onéreux : utilisation de verre de faible qualité ou de polymères comme substrat, sur lesquels on dépose une

mince couche active.

- Une flexibilité de mise en œuvre des matériaux, notamment avec l'utilisation de substrats souples.

- La possibilité d'obtenir des cellules semi-transparentes.

Les principaux inconvénients sont :

- Le rendement encore faible.

- La rareté de certains matériaux.

- La toxicité de certains matériaux.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le phénomène photovoltaïque en expliquant le principe de fonctionnement de la cellule solaire. Ensuite, nous avons vu que la cellule photovoltaïque présente une caractéristique  $I(V)$  non linéaire, elle peut-être modélisée par un circuit électrique équivalent.

## **Chapitre 2**

# **Les modules photovoltaïques au silicium monocristallin**

## Introduction

Dans le premier chapitre, l'élément de base du photovoltaïque ainsi que ses différentes technologies sont étudiés.

Dans ce deuxième chapitre, nous nous intéressons à la technologie monocristalline, les différentes méthodes d'élaboration du silicium monocristallin ainsi que ses propriétés électroniques et optiques, dans la première partie.

Dans la deuxième partie, nous présentons la constitution du module photovoltaïque qui nécessite une association série, parallèle ou hybride des cellules solaires ainsi que ses caractéristiques électriques.

### 2.1. Le silicium monocristallin

Le Silicium monocristallin est une matière première d'une grande pureté, il comporte des grains bien ordonnés de taille supérieure à 10 cm.

Il permet d'obtenir de meilleurs rendements en cellules solaires [4].

### 2.2. Les méthodes d'élaboration du silicium monocristallin

La mono cristallisation est généralement obtenue par trois méthodes principales :

#### 2.2.1. La méthode de BRIDGEMAN

La technique de BRIDGEMAN peut-être utilisée pour le tirage des lingots de silicium monocristallin. Elle consiste à la solidification de la phase liquide contenue dans le creuset par le refroidissement progressif à partir d'un germe. L'appareillage consiste essentiellement en un creuset en silice mobile dans l'enceinte d'un four à gradient de température. Le déplacement progressif du creuset dans le sens des températures décroissantes induit la cristallisation du bain à partir du germe [4].

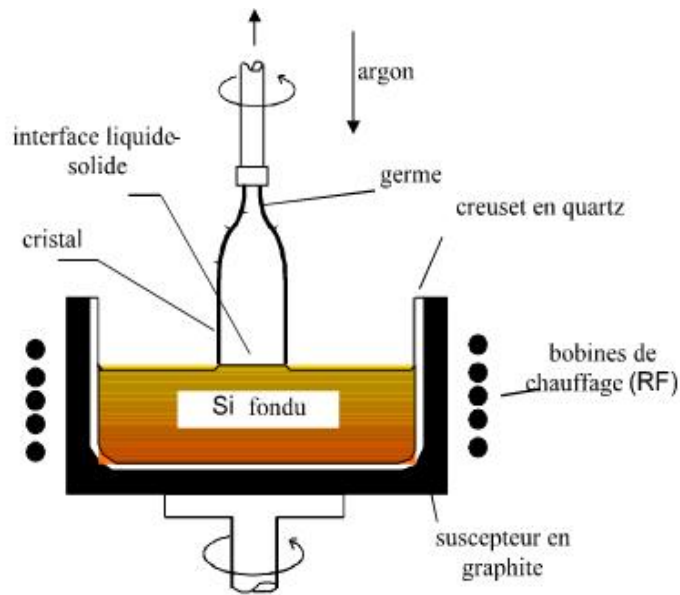


Figure 2.1 Méthode de BRIDGEMAN [6]

### 2.2.2. La méthode de tirage (CZOCHEWALSKI)

Dans cette méthode, le silicium est fondu dans un creuset de quartz chauffé par induction. Dans un gradient de température convenable, un germe monocristallin correctement orienté est déposé à la surface du silicium liquide qui se solidifie sur ce germe en continuant à l'identique le réseau cristallin du germe et sur la même orientation cristallographique. Le dopage s'obtient évidemment en introduisant dans le bain liquide le dopant en concentration prédéfinie. Le diamètre ainsi obtenu est lié aux paramètres physiques au cours du tirage [7].

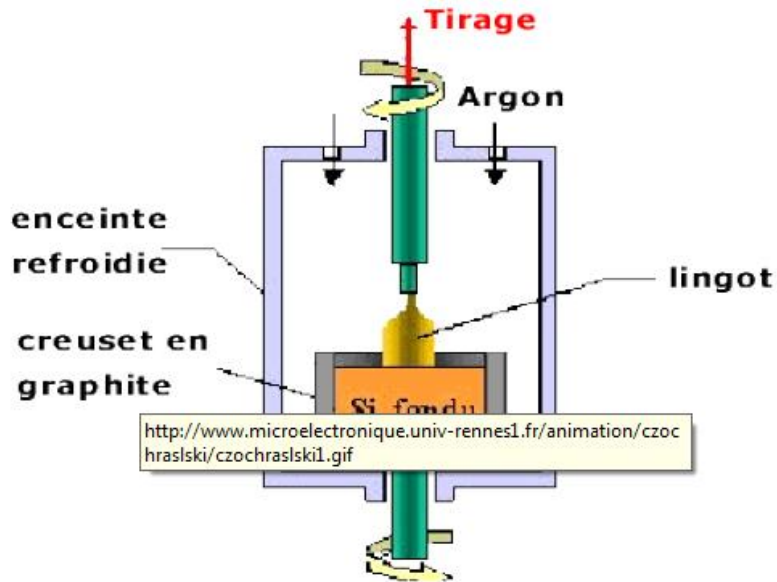


Figure 2.2 Méthode de CZOCHRALSKI [6]

Des monocristaux de silicium de grand diamètre ( $> 10\text{cm}$ ) et d'une longueur considérable ( $> 1\text{m}$ ) peuvent être produits industriellement par cette méthode [6].

### 2.2.3. La méthode de la zone flottante

Dans la méthode de la zone flottante, il n'y a pas de creuset, ce qui permet de résoudre, en même temps, que les problèmes de contraintes, ceux qui résultent d'une haute réactivité de matériaux ou de contamination par les impuretés contenues dans le creuset. Un barreau polycristallin du matériau semi-conducteur, silicium, disposé verticalement est chauffé localement par induction jusqu'à ce que soit formée une étroite zone fondue.

Celle-ci reste stable entre les deux parties solides du barreau par effet de capillarité. Le déplacement lent de l'enroulement chauffant s'accompagne de celui de la zone flottante, par fusion du silicium polycristallin d'un côté, par cristallisation de l'autre, comme dans les méthodes précédentes, un germe convenablement taillé, placé à l'extrémité du barreau permet d'amorcer et d'orienter la croissance du cristal selon la direction cristallographique voulue [6].

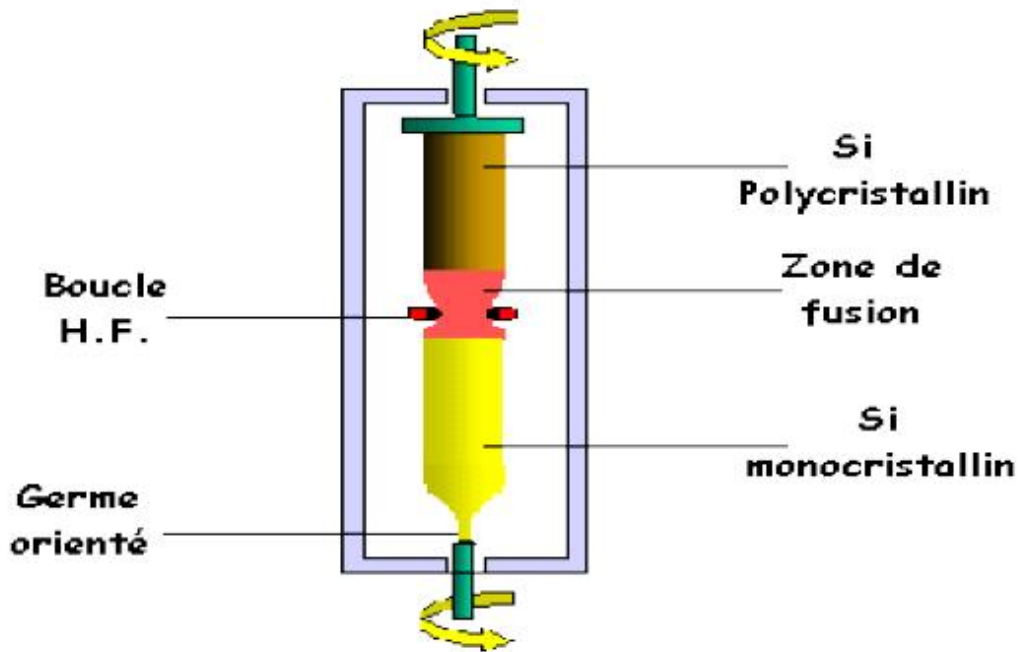


Figure 2.3 Méthode de la zone flottante [6]

### 2.3. La structure du Silicium monocristallin

La structure cristallographique du silicium monocristallin est une structure cubique diamant dans laquelle deux réseaux cubiques à faces centrées s'interpénètrent (figure 2.4).

Chaque atome d'un des réseaux est entouré par quatre proches voisins équidistants de l'autre réseau formant un tétraèdre [Gerl 1997]. Les liaisons entre les atomes sont de type covalent avec une distance interatomique de  $2.35 \text{ \AA}$  et un paramètre de maille  $a=5.43 \text{ \AA}$  [Sze 2007]. La bande interdite (gap), séparant la bande de valence de la bande de conduction est égale à  $E_g=1.12 \text{ eV}$  à température ambiante. Il correspond à un gap indirect puisque le minimum de la bande de conduction est séparé en un point autre que le maximum de la bande de valence dans la zone de Brillouin.

La figure 2.5 représente la répartition des niveaux d'énergie du silicium monocristallin et illustre le gap indirect [8].

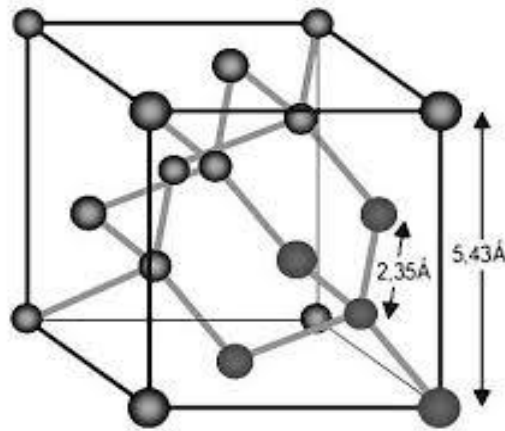


Figure 2.4 structure cristallographique du silicium monocristallin (type diamant) [Sze 2007]

[8]

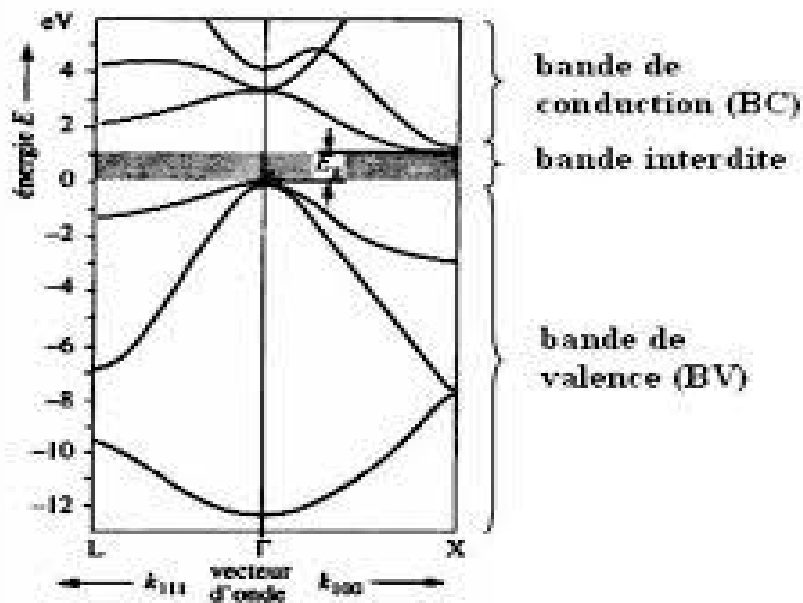


Figure 2.5 structure des bandes du silicium monocristallin [Lévy 1995] [8]

#### 2.4. Les propriétés électroniques et optiques du Silicium monocristallin

Nous présentons dans cette partie les propriétés optoélectroniques du silicium monocristallin.

La figure 2.6 montre la variation des propriétés optiques du silicium monocristallin, à savoir le coefficient de réflexion  $R$  et le coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de la longueur d'onde, mesurés à température ambiante [Von Allmen 1995]. Le spectre du coefficient de réflexion révèle deux pics localisés autour de  $\lambda=275$  nm et  $\lambda=365$  nm, caractéristiques du silicium

monocristallin. Ces pics sont associés respectivement à l'ordre à longue distance et à courte distance dans la structure cristalline. Le coefficient d'absorption est faible dans l'infrarouge à cause des faibles énergies d'excitation. La longueur d'absorption pour laquelle 63% du faisceau lumineux est absorbé dans le matériau est de  $100 \mu\text{m}$  pour des photons de longueur d'onde  $\lambda$  égale à  $2 \mu\text{m}$ . Elle prend cependant des valeurs très faibles aux faibles longueurs d'onde, jusqu'à  $10 \text{ nm}$  dans l'ultra-violet. En particulier, on peut noter qu'à la longueur d'onde  $808 \text{ nm}$ ; le coefficient de réflexion du silicium monocristallin est de  $0.35$  et le coefficient d'absorption est environ égal à  $7 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$  [13].

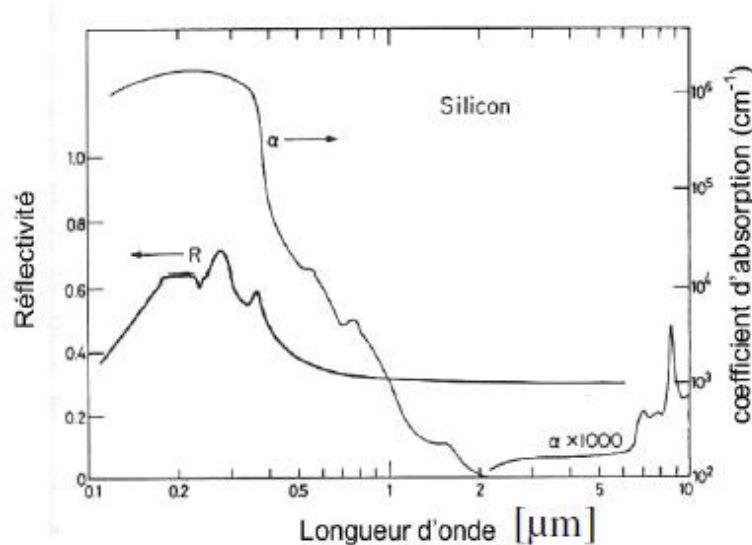


Figure 2.6 Coefficient de réflexion  $R$  et d'absorption  $\alpha$  du silicium monocristallin en fonction de la longueur d'onde [Von Allmen 1995] [13]

## 2.5. Les avantages et les inconvénients du Silicium monocristallin

- **Avantages :**

- Avec cette technologie, la production des modules solaires est optimale; les cellules monocristallines offrent le meilleur rendement (jusqu'à 23%).
- Les modules issus de cette technologie ont une bonne durée de vie (jusqu'à 30 ans).

- **Inconvénients :**

- Le coût de production est élevé et les modules sont donc chers à la vente.

- On constate avec cette technologie peu de rendement par mauvais temps [9].

## 2.6. Du lingot à la cellule solaire au silicium monocristallin

Après la fabrication d'un disque cristallin de type P, les étapes suivantes sont nécessaires afin d'obtenir un module photovoltaïque fonctionnel :

- Préparation de la surface pour la nettoyer des défauts venant du procédé de découpage.
- Gravure de la surface dans le but de créer de petites pyramides sur la surface pour une absorption plus élevée de photons (par conséquent, une orientation non optimale dans l'espace de la cellule photovoltaïque est ainsi moins critique).
- Diffusion du phosphore pour créer une couche mince de type N sous la surface (par conséquent créer la jonction photovoltaïque PN).
- Dopage de la face postérieure avec une couche de P+.
- Ajout d'un film anti-réflexion sur la surface.
- Connecter le contact en métal entre la couche N et la surface.
- Ajouter une électrode en aluminium sur la face arrière et le contact arrière [10].

La figure suivante montre une vue en coupe d'une cellule solaire au silicium monocristallin :

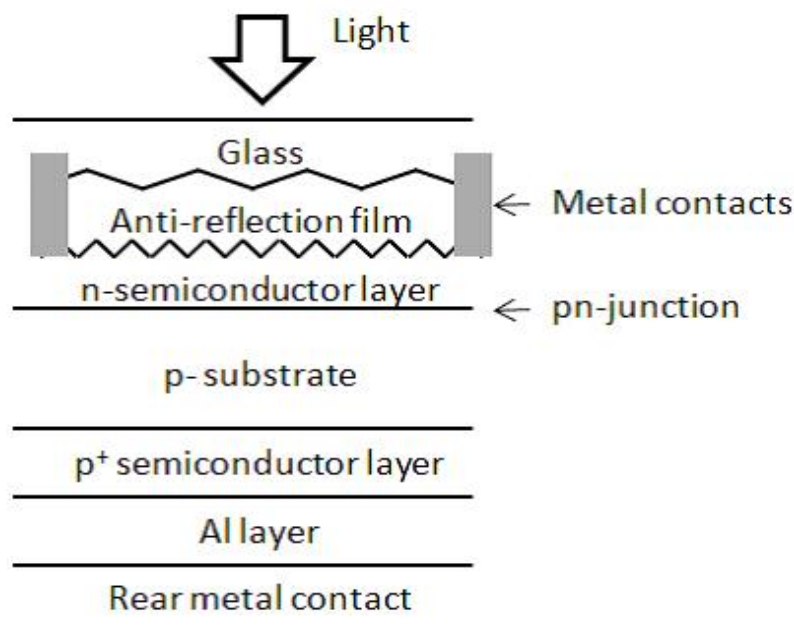


Figure 2.7 Vue en coupe schématique d'une cellule solaire mono-Silicium [10]

## **2.7. De la cellule solaire au module photovoltaïque**

### **2.7.1. La définition d'un module photovoltaïque**

Le module photovoltaïque est composé de plusieurs cellules interconnectées en série ou en parallèle ou bien les deux à la fois (série/parallèle), encapsulées et disposées en rangées de façon à obtenir les niveaux de courant et de tension souhaités.

L'assemblage se fait de manières différentes suivant les technologies et peut entraîner des pertes supplémentaires (électriques et optiques).

### **2.7.2. La constitution d'un module photovoltaïque**

#### **2.7.2.1. L'assemblage des modules photovoltaïques**

L'assemblage sert à protéger les cellules du milieu extérieur et à faciliter leur mise en œuvre en limitant les pertes optiques et les baisses de rendement dues à l'échauffement des cellules en fonctionnement.

#### **2.7.2.2. Le câblage des modules au silicium monocristallin**

Pour connecter les cellules en série, grâce à un contact à base d'étain ou d'argent; on relie le contact négatif (-) en face avant d'une cellule au contact positif (+) de la face arrière de la cellule suivante.

#### **2.7.2.3. L'encapsulation**

On encapsule les cellules dans une résine transparente et d'indice proche de celui du verre (au film Tedler), une fois les connexions faites.

Il faut protéger la face arrière, la sortie des connexions ainsi que les bords du panneau contre toutes les agressions atmosphériques (l'humidité par exemple ).

La face avant doit résister aux ultra-violets, la grêle et à toutes les intempéries.

#### **2.7.2.4. Le boîtier de connexion électrique**

Chaque module est équipé d'une boîte de jonction contenant des diodes de protection permettant son raccordement électrique.

Ce boîtier de connexion est en général fixé sous le module.

### 2.7.2.5. L'isolation électrique

L'encapsulation doit être capable de supporter une différence de potentiel supérieure à celle délivrée par le panneau.

Pour les modules dont le  $V_{co}$  est supérieur à 50 Volts, le cadre métallique doit être relié à la terre.

### 2.7.2.6. Les protections mécaniques

Les modules doivent accepter un certain degré de torsion lors de leur montage et leur fonctionnement sur site, ils doivent être à la fois rigides et résistants.

- L'assemblage des cellules est une étape très importante au regard de la durée de vie du module.

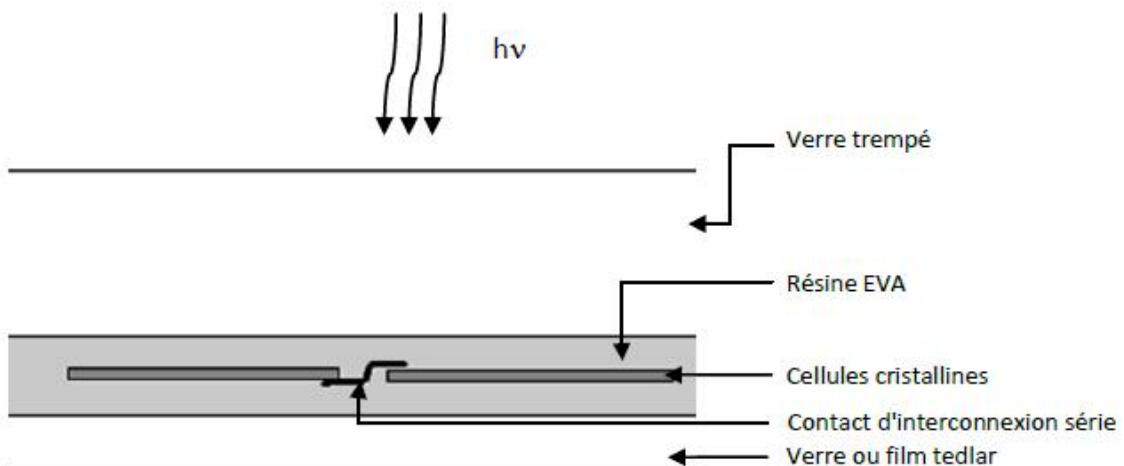


Figure 2.8. Représentation schématique d'une vue en coupe d'un module au silicium cristallin

[4]

### 2.7.3. L'association des cellules photovoltaïques

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut donc associer plusieurs cellules solaires pour constituer un module photovoltaïque afin d'augmenter la tension et le courant d'utilisation.

Un module photovoltaïque est un ensemble en série ou en parallèle de cellules solaires.

### 2.7.3.1. Association série

Lorsqu'on additionne des cellules photovoltaïques identiques en série, la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules solaires et le courant de la branche reste le même limité par le courant de la cellule la plus faible.

Lorsque les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou certaines sont partiellement ombragées, la tension d'utilisation sera légèrement diminuée.

Les caractéristiques électriques d'une association série sont résumées par l'équation suivante :

$$V_{CON_S} = N_S \cdot V_{CO} ; \quad I_{CC} = I_{CCN_S} \quad (2.1)$$

Avec :

$V_{CON_S}$  : la somme des tensions en circuit ouvert de  $N_S$  cellules en série.

$I_{CCN_S}$  : courant de court-circuit de  $N_S$  cellules en série.

$N_S$  : nombre de cellules en série [5].

Les résistances séries s'ajoutent.

L'augmentation de la résistance série induit une perte de puissance.

L'association série est généralement le système le plus utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce [1].

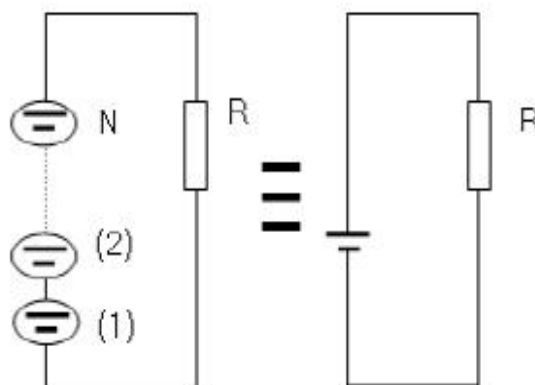


Figure 2.9 Association des cellules solaires en série [16]

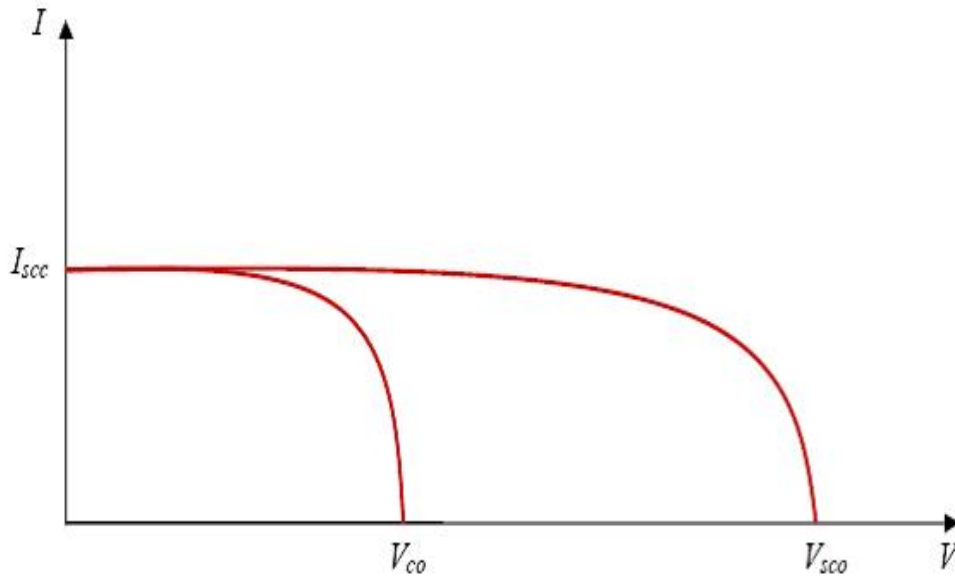


Figure 2.10 Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $N_s$  cellules identiques [16]

### 2.7.3.2. Association parallèle

Lorsqu'on additionne des cellules photovoltaïques identiques en parallèle, l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle, et la tension de la branche est égale à celle de chaque cellule.

Lorsque les cellules ne sont pas identiques ou quelques-unes sont ombragées, le courant total d'utilisation sera un peu plus faible.

Les caractéristiques électriques d'une association parallèle sont résumées par l'équation suivante :

$$V_{CONP} = N_P \cdot V_{CO} ; \quad I_{CC} = I_{CCN_P} \quad (2.2)$$

Avec :

$V_{CONP}$  : la somme des tensions en circuit ouvert de  $N_p$  cellules en parallèle.

$I_{CCN_p}$  : courant de court-circuit de  $N_p$  cellules en parallèle.

$N_p$  : nombre de cellules en parallèle [5].

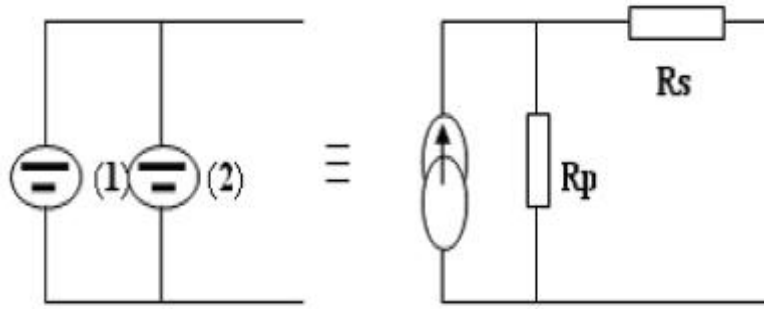


Figure 2.11 Association des cellules solaires en parallèle [16]

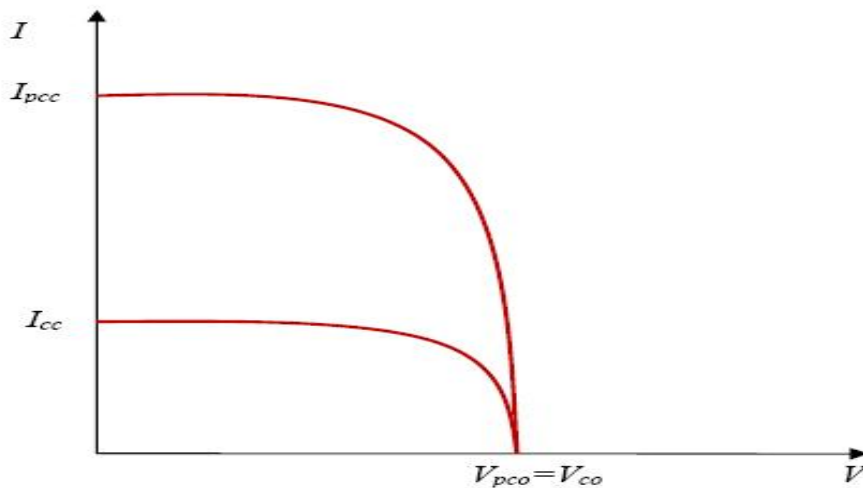


Figure 2.12 Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $N_p$  cellules identiques [16]

### 2.7.3.3. Association hybride (série/parallèle)

Ce montage série/parallèle permet de régler la tension et le courant à la fois, selon les caractéristiques de la charge.

Les cellules photovoltaïques sont montées en série et les modules en parallèle.

On équipe donc les modules avec des diodes by-pass pour protéger les cellules qui deviennent passives et on utilise aussi des diodes anti-retour pour éviter le retour du courant des autres modules.

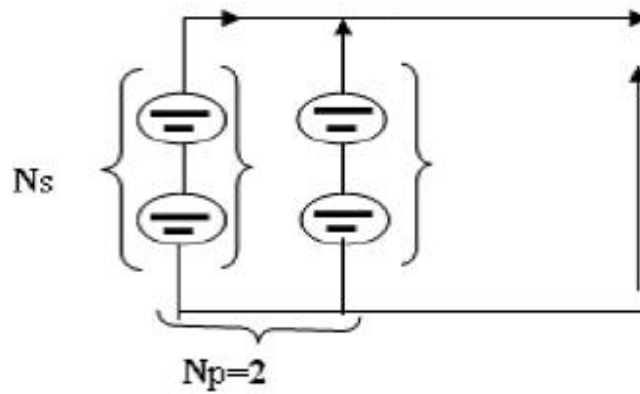


Figure 2.13 Association mixte des modules [2]

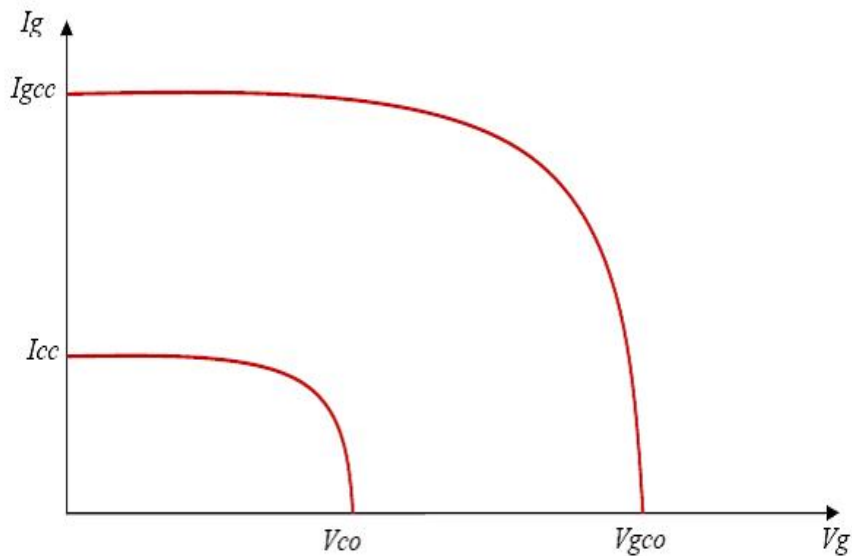


Figure 2.14 Caractéristique résultante d'un groupement mixte [2]

#### 2.7.3.4. La puissance crête

C'est la puissance maximale délivrée par un module photovoltaïque dans les conditions de référence (STC) suivante s'il est connecté à sa charge maximale :

- Une irradiation normale de  $1000 \text{ W/m}^2$ .
- Une température des cellules de  $25^\circ\text{C}$ .

- Un spectre de référence AM 1.5 qui correspond à un rayonnement global sous certaines conditions atmosphériques, sur une surface plate orientée sud ayant un angle de  $37^\circ$  par rapport à l'horizontal [4].

Elle s'exprime en Watts Crête.

#### **2.7.3.5. Protection par diode parallèle (by-pass)**

La tension inverse à laquelle est soumise une cellule ombragée est plus élevée quand le nombre de cellules connectées en série est très important.

Pour éviter l'échauffement intense de ces cellules, les fabricants ont implantés des diodes parallèles dites «by-pass » dans le boîtier de connexion des modules, dont le principe est de court-circuiter les cellules ombragées; lorsqu'une des cellules est ombragée, la diode devient passante c'est-à-dire qu'elle limite la tension inverse par sa tension directe.

#### **Exemple**

Considérons que notre module photovoltaïque dispose de 3 diodes by-pass (D1, D2 et D3), chacune étant associée à un sous-réseau de 20 cellules. Supposons que la cellule ombragée appartienne au sous-réseau n°1. La diode by-pass D1 va donc court-circuiter le sous-réseau n°1 en laissant passer le courant directement vers le sous-réseau n°2.

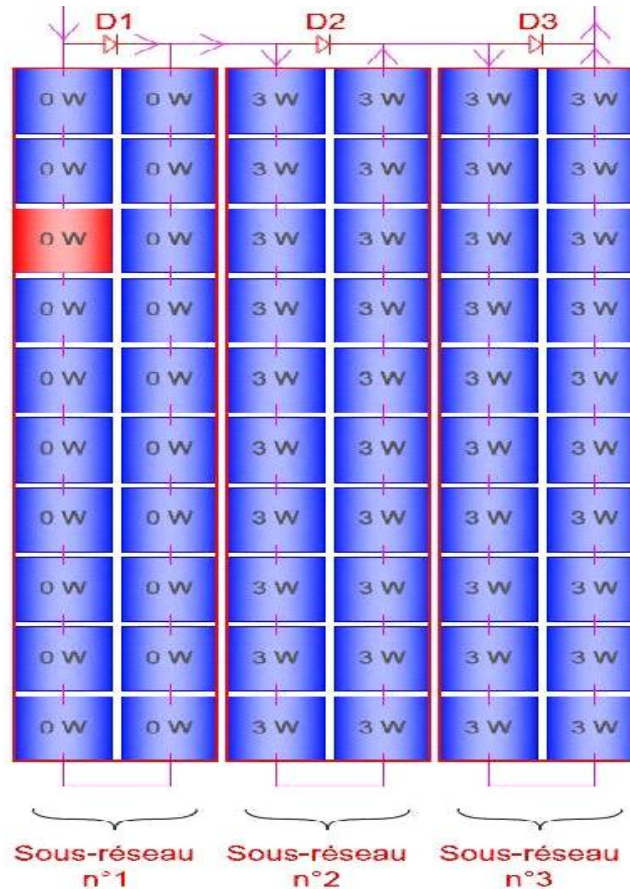


Figure 2.15. Protection d'un module ombragé par des diodes by-pass.

**2.7.3.6. Protection par diode série (anti-retour)**

Il faut connecter une diode en série sur chacune des branches pour empêcher un ensemble de cellules reliées en série dans une branche de recevoir de l'énergie électrique provenant d'autres branches mises en parallèle.

Ces diodes doivent supporter le courant généré par la branche quand elle fonctionne normalement.

Elles ont aussi le rôle d'empêcher le retour de l'énergie stockée lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables ou durant la nuit.

**2.8. Les caractéristiques d'un module photovoltaïque**

**2.8.1. La caractéristique courant-tension I(V)**

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire d'un nombre de cellule (Ns) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec

un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante.

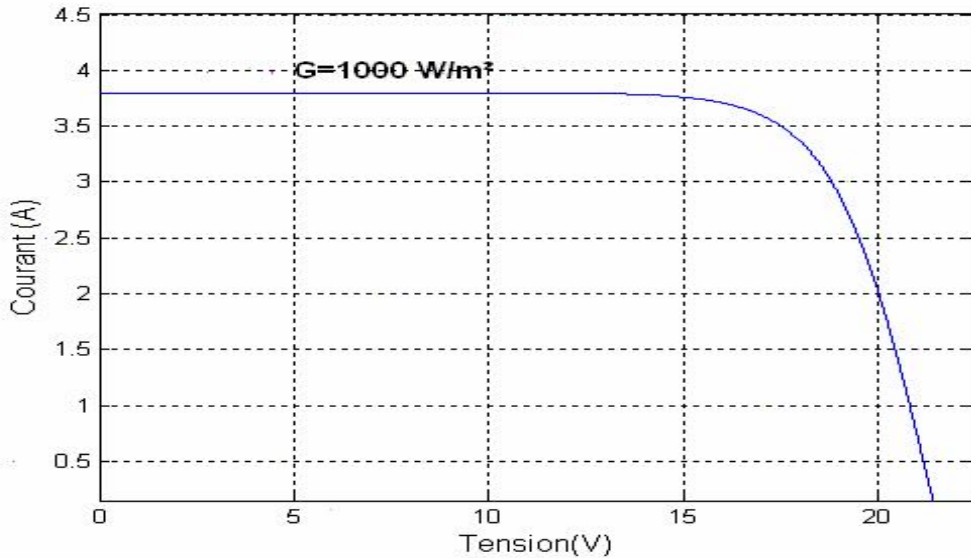


Figure 2.16 Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque [2]

**2.8.2. La caractéristique puissance-tension P(V)**

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes. Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

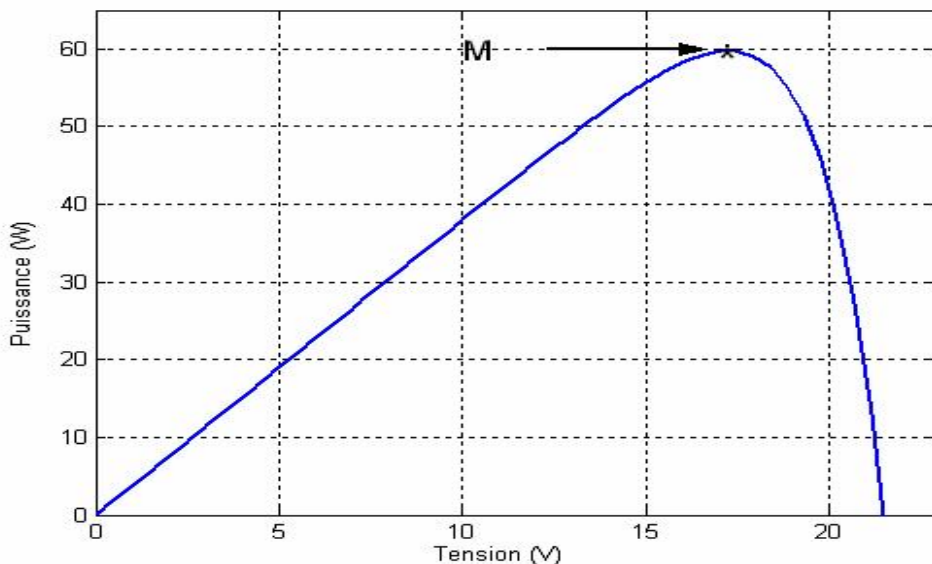


Figure 2.17 Caractéristique P(V) d'un module solaire photovoltaïque [2]

## 2.9. Les zones de fonctionnement du module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur photovoltaïque et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement.

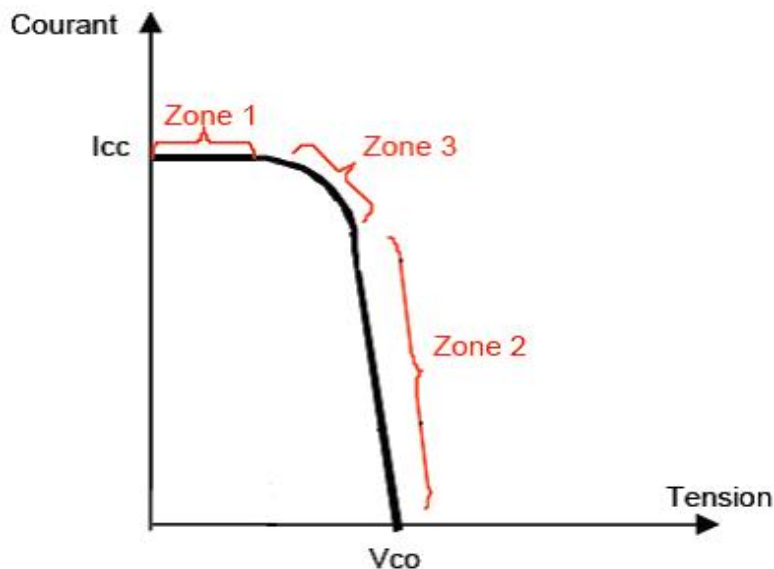


Figure 2.18 Les différentes zones de la caractéristique I (V) [3].

La caractéristique d'un générateur photovoltaïque 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). Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en trois zones :

- Une zone assimilable à un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par (Zone 1).
- Une zone assimilable à un générateur de tension  $V_{co}$  d'impédance interne équivalente à la résistance série  $R_s$  (Zone 2).

- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de  $R_s$  à  $R_{sh}$  (zone 3), c'est dans la zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple  $(I_{max}, V_{max})$ , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées [3].

### **Conclusion**

Nous avons vu dans ce chapitre que le silicium monocristallin est généralement élaboré par trois méthodes, il est largement utilisé dans les applications photovoltaïques pour son très bon rendement.

Ensuite, on a présenté les caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

## **Chapitre 3**

# **Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin sous Matlab/simulink**

## Introduction

Notre objectif de travail est l'étude de l'influence de quelques paramètres sur un module photovoltaïque à partir de la modélisation et la simulation de ce dernier sous Matlab/Simulink.

Dans la première partie, la modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension.

Dans la deuxième partie, nous montrons par les résultats de simulation l'influence des paramètres qui entrent en jeu dans la performance des systèmes solaires de production de l'énergie électrique comme l'irradiation solaire, la température, la résistance série, la résistance parallèle (shunt) et le facteur d'idéalité.

### 3.1. La modélisation d'un module photovoltaïque

Une cellule solaire ne génère pas suffisamment de tension entre (0.3 V et 0.7 V selon la technologie), il faut donc associer plusieurs cellules en série pour générer une tension plus importante à la sortie du module.

La tension du module est :

$$V_m = N_s \times V \quad (3.1)$$

Avec :

$V_m$  : la tension du module.

$N_s$  : nombre de cellules en série par module [11].

La caractéristique  $I(V)$  du module PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent (modèle à une diode). Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_{sh}$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

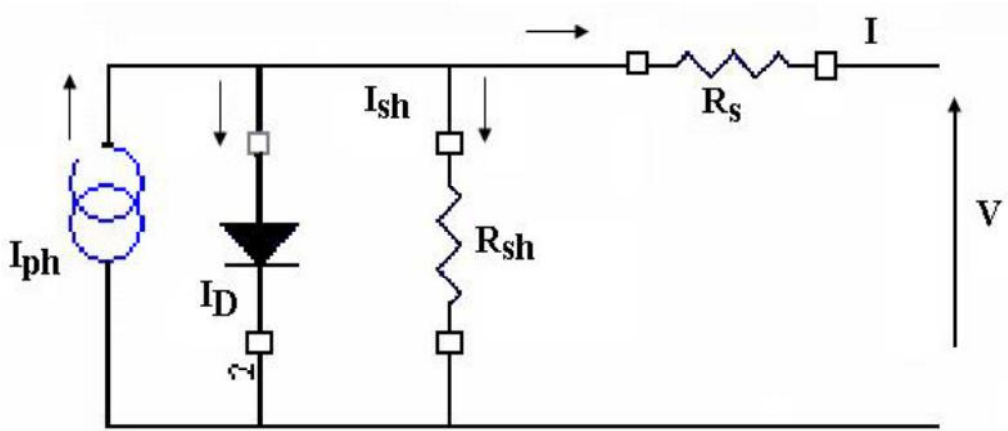


Figure 3.1 Circuit équivalent d'une cellule PV [12]

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit [13] :

- Le courant photo généré :

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (3.2)$$

- Le courant de saturation :

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_{g0} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n \cdot k}\right] \quad (3.3)$$

- Le courant de saturation inverse :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{CO}}{n \cdot N_s \cdot kT}\right)} - 1} \quad (3.4)$$

- Le courant de la résistance parallèle :

$$I_{sh} = \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (3.5)$$

- le courant de sortie :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + I.R_s)}{n.k.N_s.T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (3.6)$$

### 3.2. La simulation d'un module photovoltaïque

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de la simulation sous MATLAB/Simulink d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin (modèle condor 155p) sous des conditions d'ensoleillement et de température variantes pour en déduire l'effet de chaque paramètre sur notre module PV avec les valeurs suivantes des résistances série et parallèle:

$R_s = 0.154000 \Omega$  et  $R_{sh} = 306.600866 \Omega$  ainsi que la variation du facteur d'idéalité  $n$ .

La figure suivante illustre le bloc schématique sous MATLAB/SIMULINK du module photovoltaïque au silicium monocristallin utilisé :

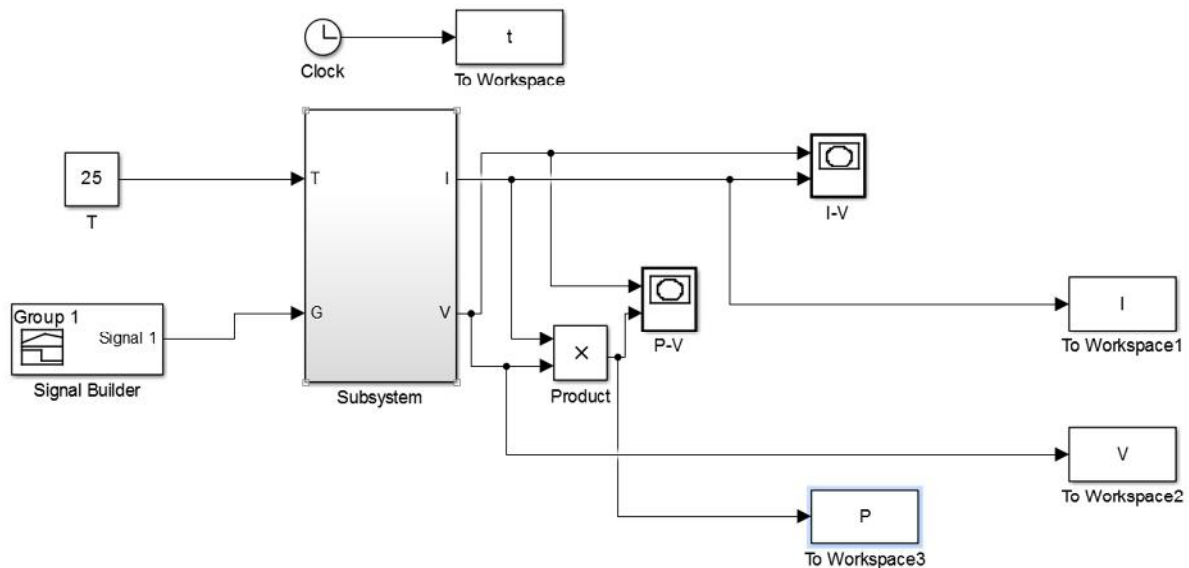


Figure 3.2 Bloc schématique d'un module photovoltaïque simulé sous Matlab/Simulink

#### 3.2.1. Effet de l'éclairement

##### Les caractéristiques I(V) et P(V) sous différents niveaux d'irradiation à T=25°C

D'après la courbe ci-dessous, nous remarquons que l'irradiation a un impact très remarquable sur l'intensité du courant photovoltaïque I.

## Chapitre 3 Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît, les courbes I(V) se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante.

La caractéristique courant-tension du module fait apparaître un point de puissance maximale dont la tension est proche des 17-18 Volts à 25°C et 1000 W/m<sup>2</sup>.

Nous pouvons conclure que le rendement d'un module PV augmente proportionnellement avec l'augmentation de l'irradiation G.

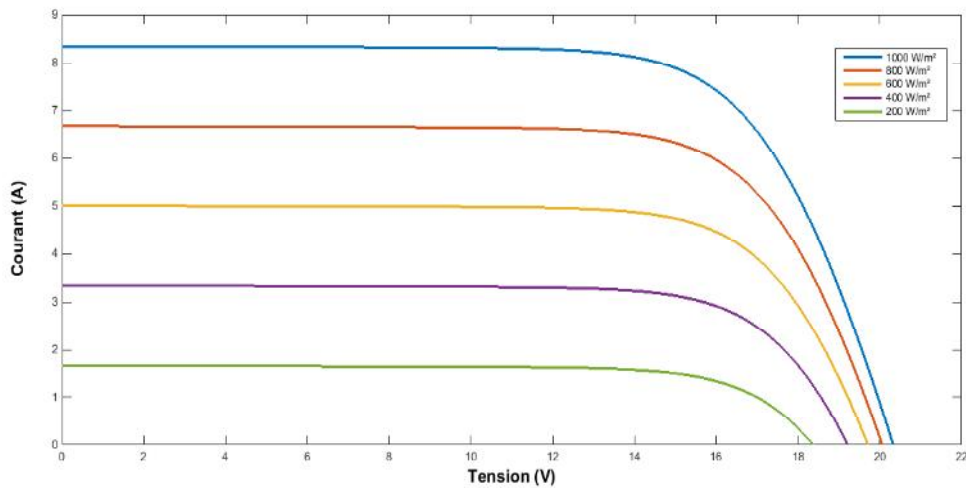


Figure 3.3 La caractéristique I(V) sous différents niveaux d'irradiation à T=25°C

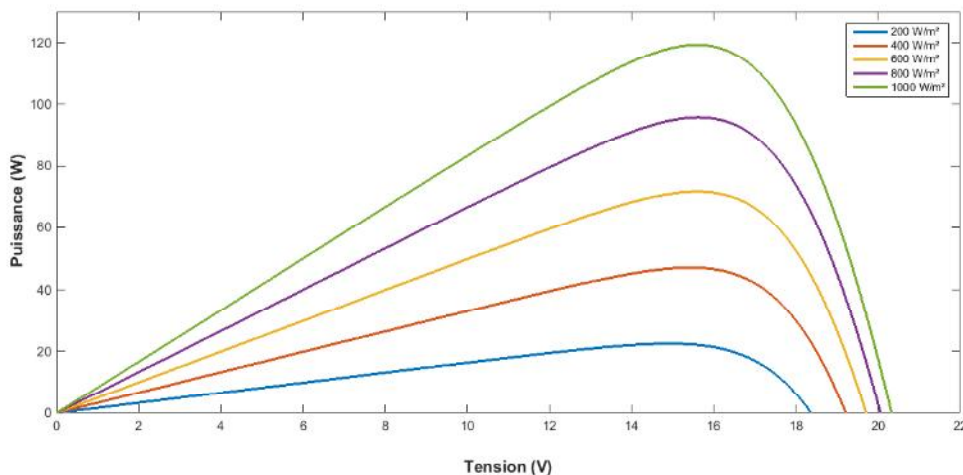


Figure 3.4 La caractéristique P(V) sous différents niveaux d'irradiation à T=25°C

## 3.2.2. Effet de la température

### Les caractéristiques I(V) et P(V) sous différentes températures à $G=1000W/m^2$

L'évolution de la caractéristique I(V) en fonction de la température montre que le courant augmente très lentement lorsque la température s'élève et engendre une décroissance de la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  comme le démontre la courbe ci-dessous.

Ce qui donne une variation importante des courbes de puissance.

Nous pouvons conclure que la température a un impact négatif sur le rendement d'un module PV.

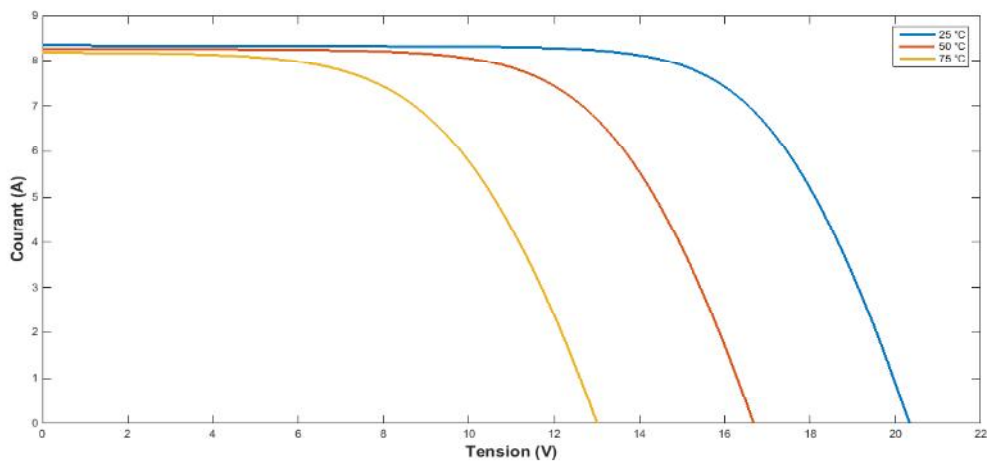


Figure 3.5 La caractéristique I(V) sous différentes températures à  $G=1000W/m^2$

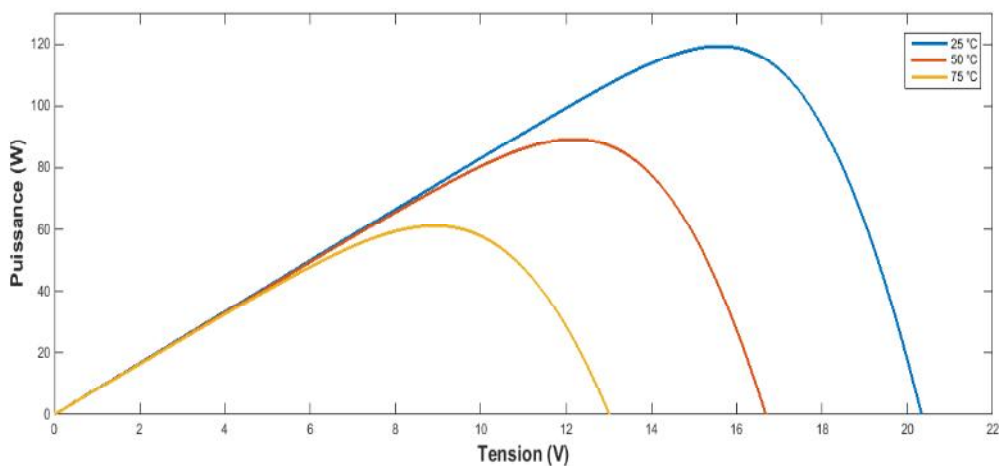


Figure 3.6 La caractéristique P(V) sous différentes températures à  $G=1000W/m^2$

### 3.2.3. Influence de la résistance série ( $R_s$ )

**Les Caractéristiques I(V) et P(V) pour différentes valeurs de  $R_s$  à  $G=1000W/m^2$  et à  $T=25^\circ C$**

La figure ci-dessous montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I(V). Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe I(V) dans la zone où le panneau fonctionne comme générateur de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par le panneau.

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance.

Quand la résistance  $R_s$  augmente, les performances du module PV diminuent, il faut que la résistance  $R_s$  soit la plus petite possible pour avoir un bon rendement.

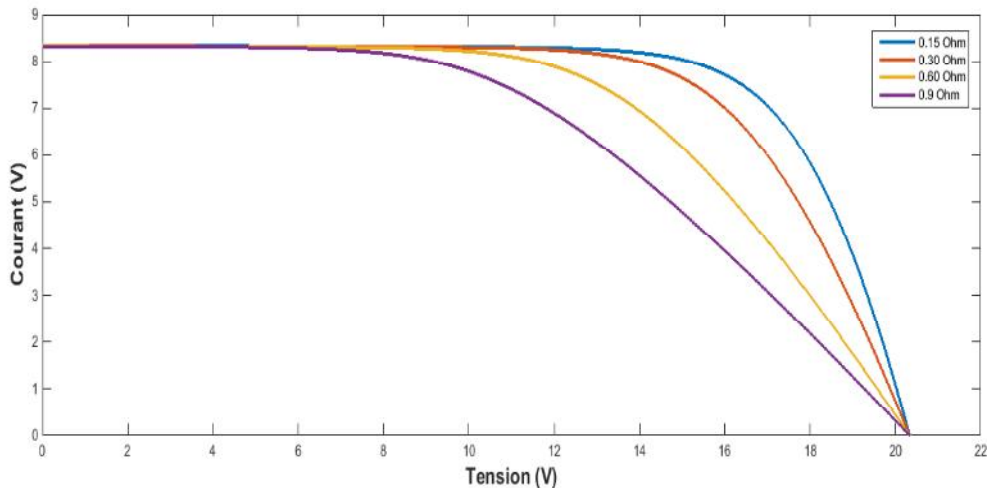


Figure 3.5 Caractéristique I(V) sous différentes valeurs de  $R_s$  à  $G=1000W/m^2$  et à  $T=25^\circ C$

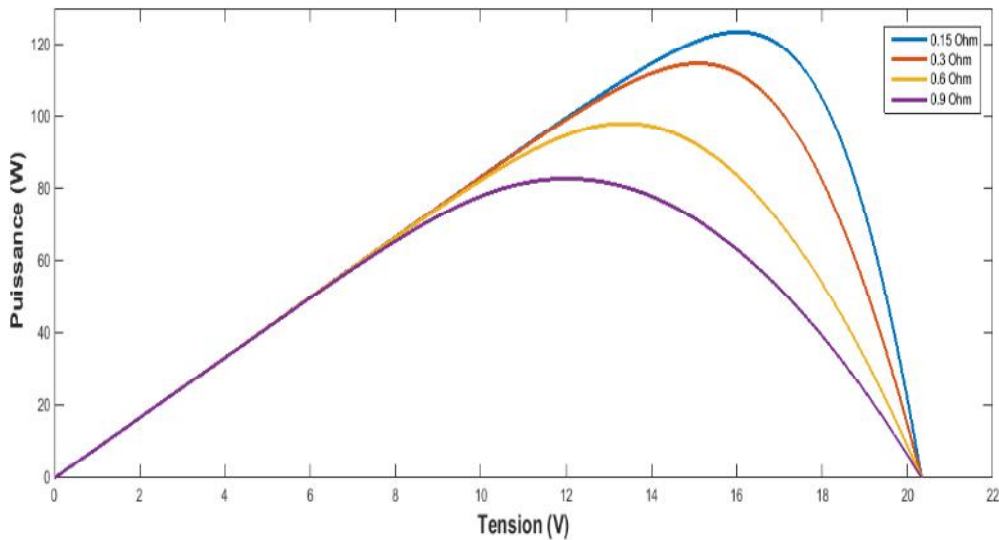


Figure 3.7 Caractéristique P(V) sous différentes valeurs de  $R_s$  à  $G=1000\text{W/m}^2$  et à  $T=25^\circ\text{C}$

### 3.2.4. Influence de la résistance parallèle ( $R_{sh}$ )

**Les caractéristiques I(V) et P(V) pour différentes valeurs de  $R_{sh}$  à  $G=1000\text{W/m}^2$  et à  $T=25^\circ\text{C}$**

L'influence de la résistance parallèle ( $R_{sh}$ ) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe I(V) de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant.

La puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante.

Les performances du module PV diminuent quand la résistance  $R_{sh}$  diminue, ainsi pour avoir un bon rendement il faut que la résistance  $R_{sh}$  soit la plus grande possible.

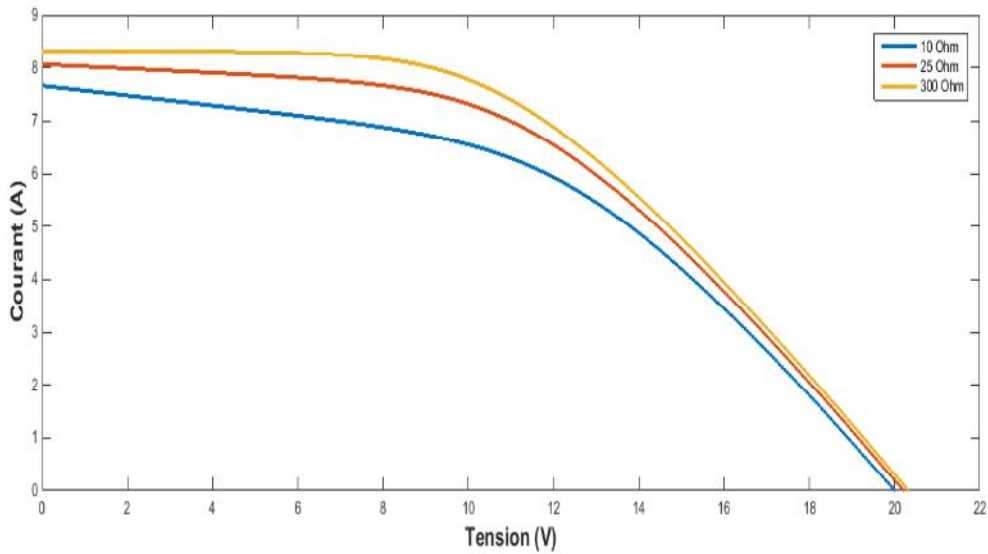


Figure 3.8 La caractéristique I(V) sous différentes valeurs de  $R_{sh}$  à  $G=1000W/m^2$  et à  $T=25^\circ C$

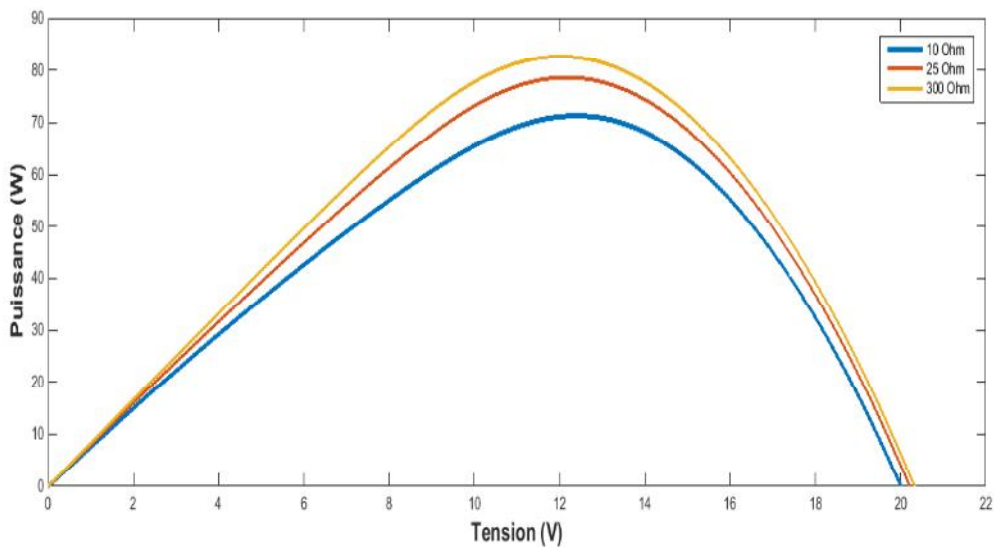


Figure 3.9 La caractéristique P(V) sous différentes valeurs de  $R_{sh}$  à  $G=1000W/m^2$  et à  $T=25^\circ C$

### 3.2.5. Effet du facteur d'idéalité de la diode (optionnel)

Les caractéristiques I(V) et P(V) pour différentes valeurs de  $n$  à  $G=1000W/m^2$  et à  $T=25^\circ C$

Pour une diode idéale, le facteur d'idéalité est égal à 1.

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur la zone ou le point de puissance maximale, cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement. L'effet de la variation de facteur d'idéalité peut être vu dans les caractéristiques suivantes :

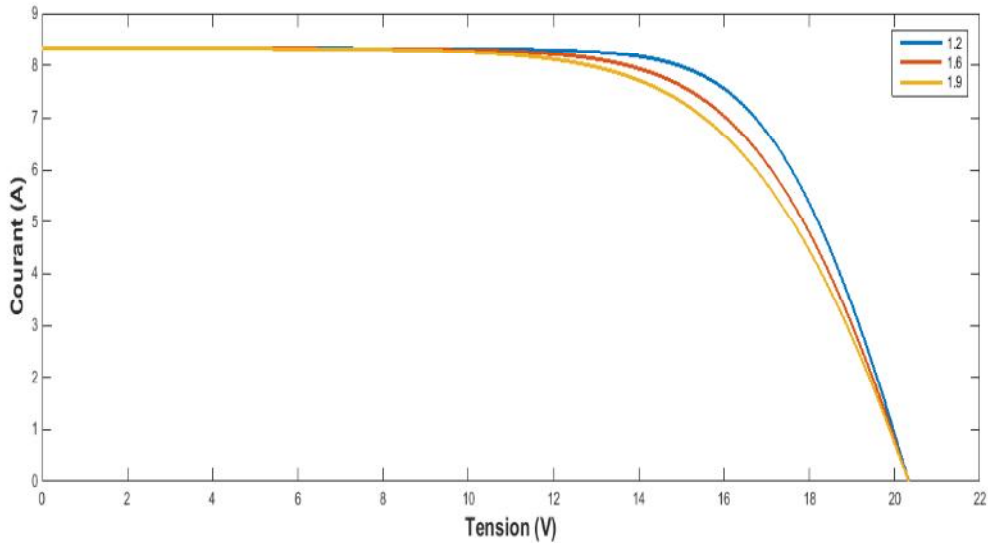


Figure 3.10 Caractéristique I(V) sous différentes valeurs de n à  $G=1000W/m^2$  et à  $T=25^{\circ}C$

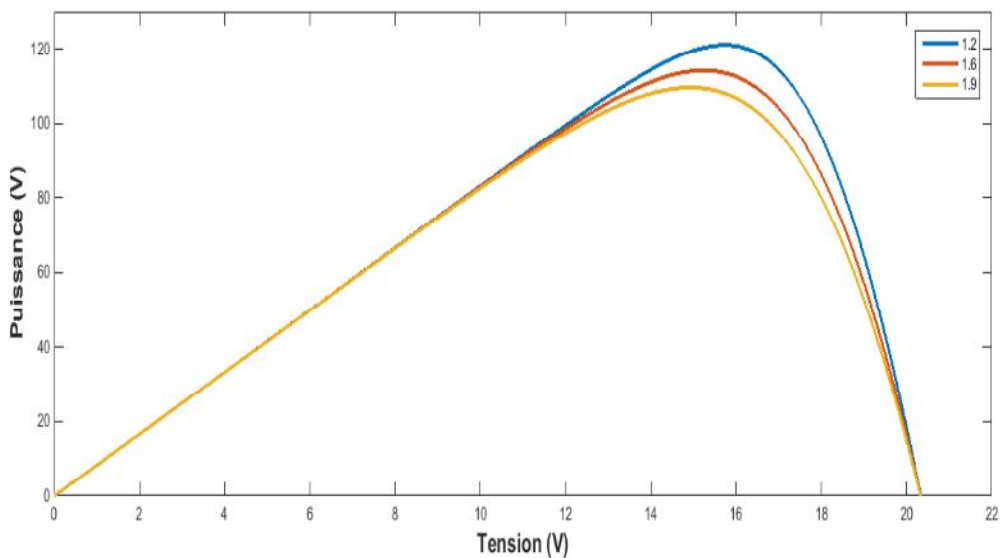


Figure 3.11 Caractéristique P(V) sous différentes valeurs de n à  $G=1000W/m^2$  et à  $T=25^{\circ}C$

### **Conclusion**

Dans ce travail, nous avons d'abord modélisé un module PV au silicium monocristallin (modèle à une diode) puis nous avons simulé sous Matlab/Simulink, son fonctionnement électrique sous différentes conditions.

Les résultats obtenus montrent que les performances d'un module PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température du module PV ainsi que la résistance série, la résistance parallèle et le facteur d'idéalité.

Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre.

## **Chapitre 4**

### **Caractérisation d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin**

## Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de la caractérisation effectuée sur le module photovoltaïque de technologie monocristalline installé sur la plateforme de caractérisation photovoltaïque du CDER seront présentés et suivis d'interprétations. Les données expérimentales nous ont permis l'obtention des courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  et l'observation du comportement réel du module photovoltaïque sous l'effet de différentes températures, différents éclairagements, l'impact de l'ombrage et la salissure.

### 4.1. La description du banc de test expérimentale

Un banc de test est utilisé pour effectuer différents tests sur un module photovoltaïque de technologie monocristalline. Il se compose d'un circuit de caractérisation, d'un module photovoltaïque de technologie monocristalline, d'un capteur d'irradiations et de température ainsi qu'un QAPC pour la commande, l'affichage et la sauvegarde des données.

#### 4.1.1. Le module photovoltaïque monocristallin

Un module photovoltaïque monocristallin "Condor 155p" est utilisé pour effectuer les différents tests. Le module se compose de 36 cellules monocristallines, branchées en série et enrobées dans une résine protectrices "EVA".

La face avant du module est protégé par du verre "solaire" et par sa face arrière par un film multicouche "tedlar".

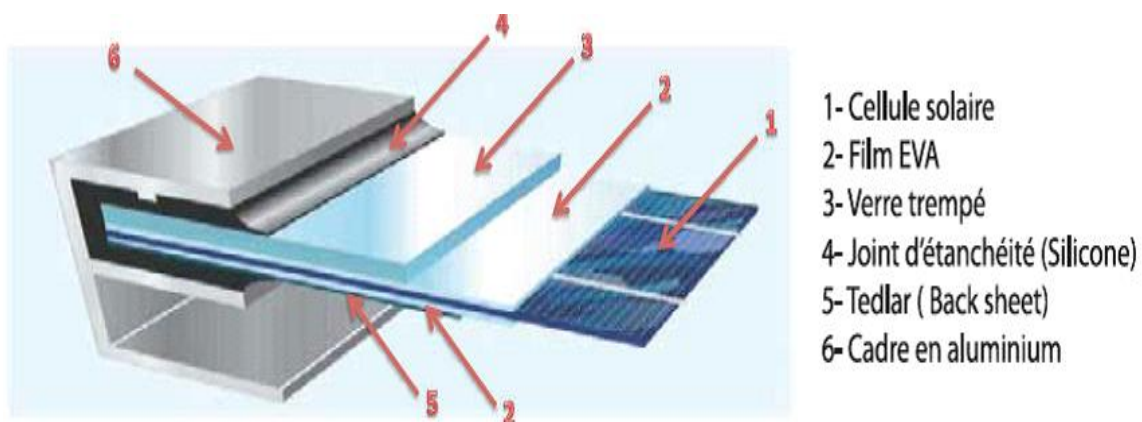


Figure 4.1 Les différentes couches constituant le module photovoltaïque "Condor 155p"

Le module photovoltaïque est protégé par des diodes by-pass afin de minimiser les effets de l'ombrage et de l'échauffement localisés « HOT SPOT ».

Le module est placé sur une structure support orienté vers le sud et inclinée d'un angle de  $26^\circ$ .



Figure 4.2 Le module photovoltaïque utilisé

#### 4.1.2. Le circuit de caractérisation

Un circuit électronique pour la caractérisation des modules photovoltaïques est utilisé pour tracer les courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  du module. Le circuit est développé au sein du CDER.

Le système proposé permet de tracer les courbes de courant et de puissance en fonction de la tension et d'extraire les paramètres électriques du module photovoltaïque. Le schéma descriptif du système proposé est représenté dans la figure 4.3.

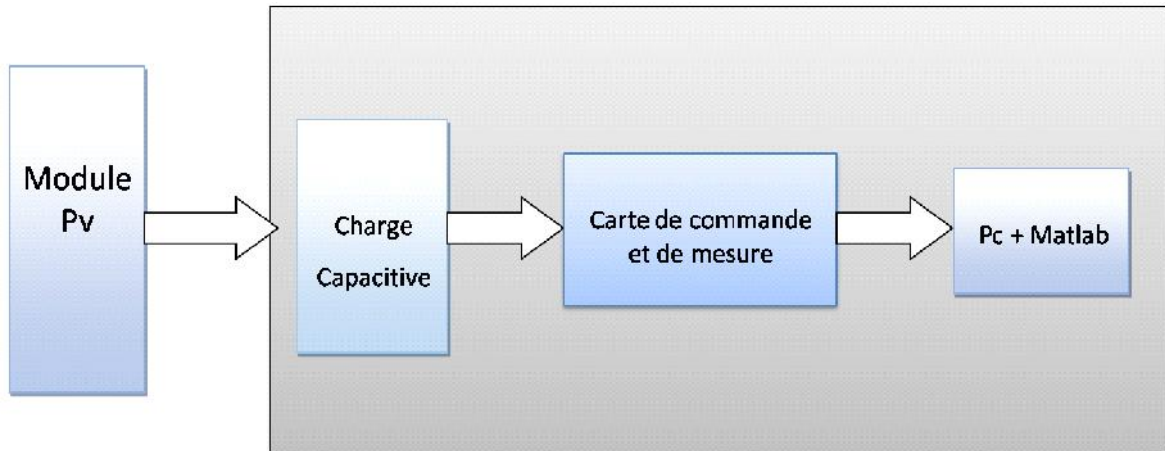


Figure 4.3 Schéma descriptif du banc de test

Le circuit se compose d'une charge capacitive, d'une carte de commande et de mesure, ainsi que d'une interface graphique. Le circuit permet de caractériser des modules photovoltaïques avec une tension maximale de 50V et un courant de court-circuit de 20A.



Figure 4.4 Photo du circuit de caractérisation

Une interface graphique développée sous MATLAB permet de commander la caractérisation, d'afficher et de sauvegarder les données (Figure 4.5).

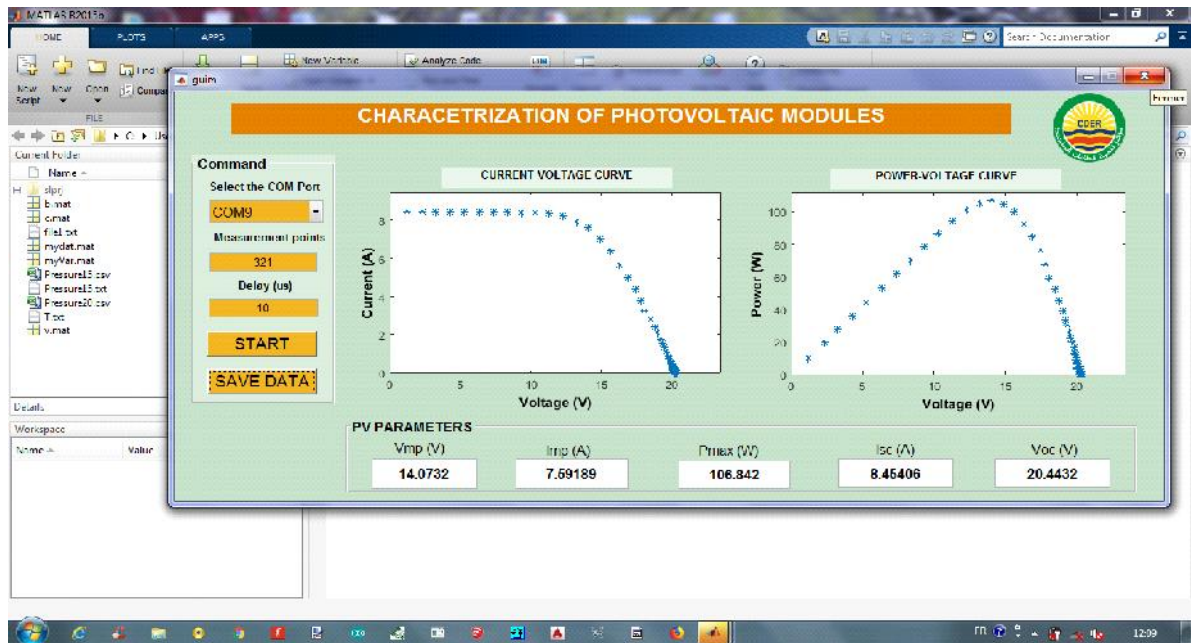


Figure 4.5 Interface graphique de commande et d'affichage utilisée

### 4.1.3. Les capteurs d'irradiation et de température

La mesure de l'irradiation et de la température du module a été effectuée en utilisant une cellule de référence placée sur le même plan que celui du module de test. La cellule de référence est composée d'une cellule photovoltaïque monocristalline court-circuitée à travers une résistance shunt. La température du module a été estimée comme étant la même que celle de la cellule de référence. L'acquisition de l'irradiation et de la température a été effectuée en utilisant une acquisition de données. Les deux systèmes ont été synchronisés par un PC.



Figure 4.6 Photo du capteur d'irradiation et de température

## 4.2. L'effet de l'ombrage

Dans cette partie, on s'intéresse à étudier l'effet de l'ombrage sur les performances du module photovoltaïque. Les courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  du module avec et sans ombrage sont tracées. L'ombrage est réalisé en couvrant une des cellules du module photovoltaïque comme le montre la figure 4.7. Les tests sont effectués durant une journée ensoleillée (le 14/06/2018 à 11h56). L'irradiation solaire est de  $1001.37 \text{ W/m}^2$  et la température du module est de  $52^\circ\text{C}$ . Les résultats du test sont représentés dans les figures et le tableau suivants.

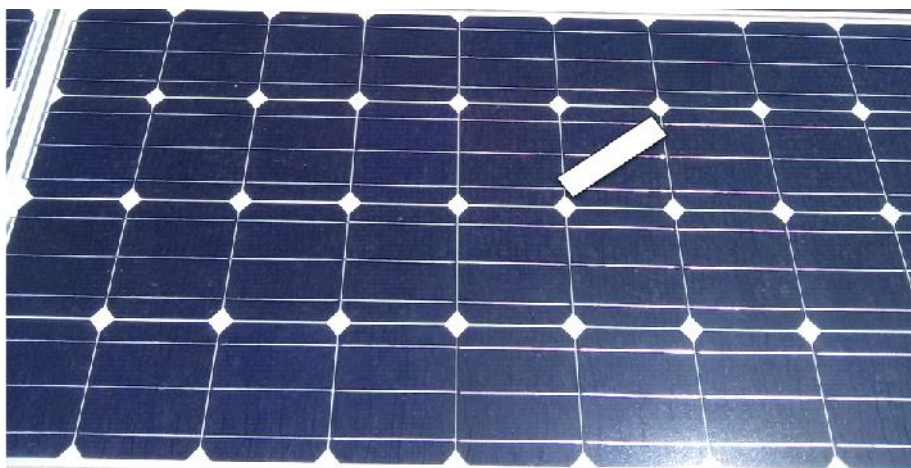


Figure 4.7 Module photovoltaïque ombragé

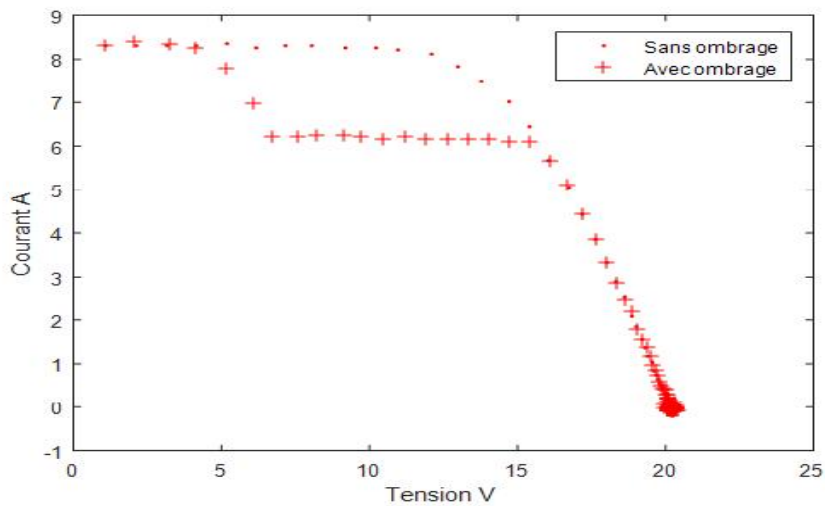


Figure 4.8 Caractéristique I(V) avant et après l'ombrage

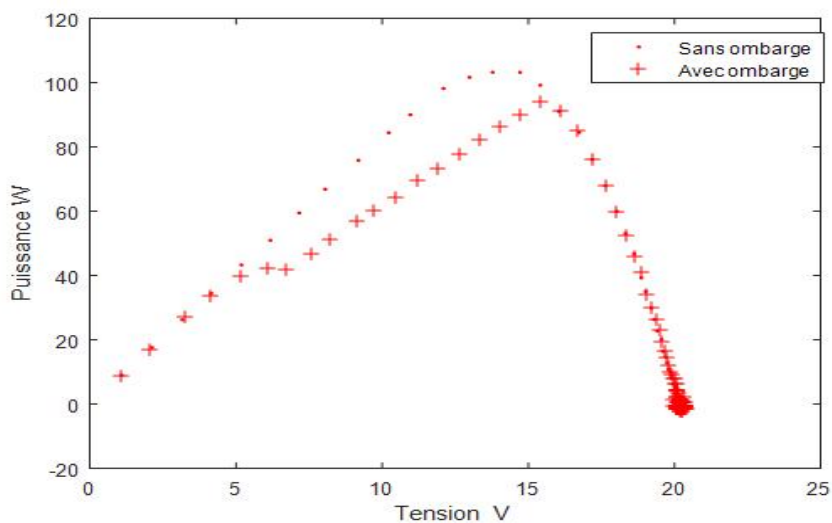


Figure 4.9 Caractéristique P(V) avant et après l'ombrage

	Isc (A)	Vco (V)	Pmax(W)	Imp(A)	Vmp(V)
Sans ombrage	8.35	20.34	103.27	7.49	13.77
Avec ombrage	8.34	20.39	94.08	6.10	15.40

Tableau 4.1 Relevé des mesures effectuées avec le module photovoltaïque au silicium monocristallin avec et sans ombrage

D'après les figures (4.8) et (4.9) et le tableau ci-dessus, on remarque un changement des allures des courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  après l'ombrage. Les valeurs de courant de court-circuit  $I_{sc}$  ainsi que la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  restent pratiquement les mêmes. Une baisse de la puissance  $P_{max}$  est observée de 103.27W à 94.08 W, cette baisse de puissance engendre le changement du point de puissance maximale ( $I_{mp}, V_{mp}$ ) de (7.49A, 13.77V) à (6.10A, 15.40V). On remarque aussi la présence de deux points de puissance maximale sur la courbe  $P(V)$ . Ce qui peut fausser les algorithmes de recherche de point de puissance maximale.

Ce test confirme que le phénomène de l'ombrage, même partiel (une cellule) influe directement sur les performances électriques du module, principalement sur le point de puissance maximale.

### 4.3. L'effet de la salissure

Dans cette partie, on s'intéresse à étudier l'effet de la salissure sur les performances du module photovoltaïque. Le test est effectué sur un module laissé plusieurs semaines sans nettoyage. Les courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  sont tracées pour le module avant et après nettoyage. Le test est effectué durant la journée du 14/06/2018 à 11h47. L'irradiation est de  $981.16\text{W/m}^2$  et la température est de  $51.99\text{C}^\circ$ . L'état du module avec et sans salissure est montré dans la figure (4.10) :



Figure 4.10 Photo du module avec et sans salissure

Les résultats du test sont représentés sur les figures ainsi que sur le tableau suivants :

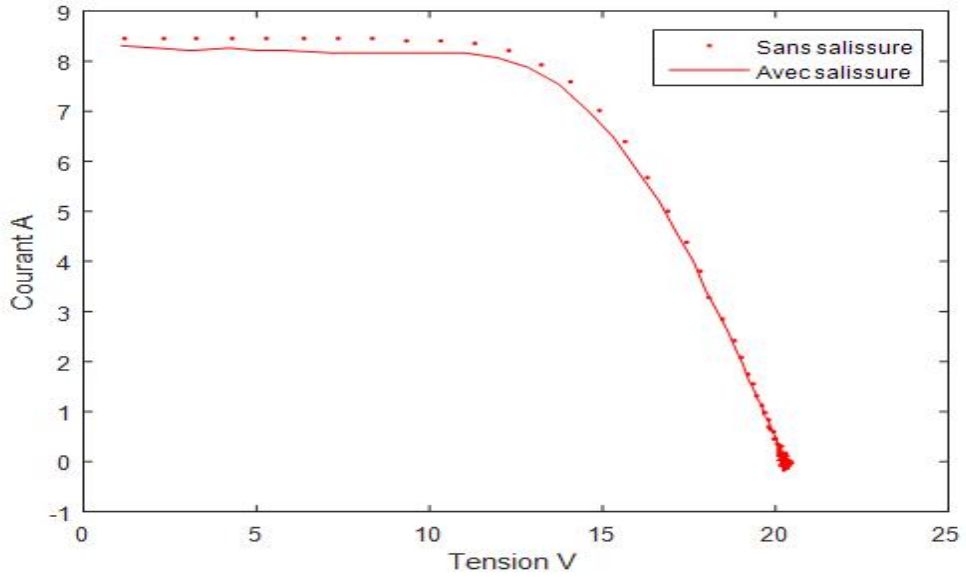


Figure 4.11 Caractéristique I(V) avec et sans salissure

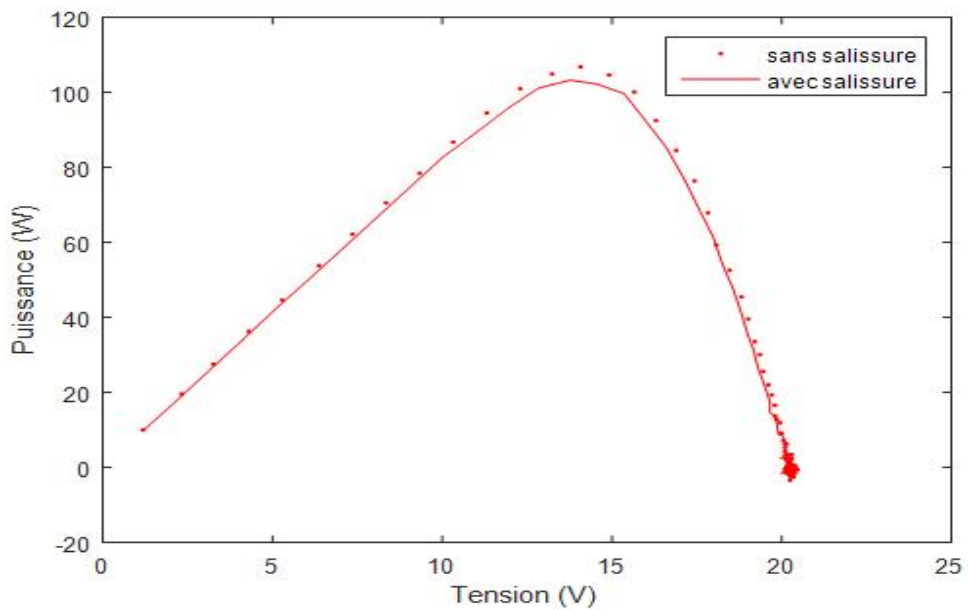


Figure 4.12 Caractéristique P(V) avec et sans salissure

	Isc	Voc	Pmax	Imp	Vmp
Sans salissure	8.45	20.44	106.84	7.59	14.07
Avec salissure	8.31	20.39	103.27	7.49	13.77

Tableau 4.2 Relevé des mesures effectuées avec le module photovoltaïque au silicium monocristallin avec et sans salissure

D'après les résultats obtenus, on peut constater que le phénomène de salissure influe principalement sur le courant de court-circuit ainsi que la puissance maximale. En effet, on remarque une baisse des valeurs de courant de court-circuit  $I_{sc}$  de 8.45 A sans salissure à 8.31 A avec salissure et une puissance  $P_{max}$  de 106.84 W sans salissure à 103.27W avec salissure. Cette baisse de performances est causée par la poussière déposée sur la face avant du module et qui joue un rôle de filtre qui diminue le taux d'irradiation reçue par le module.

On peut conclure que le nettoyage du module joue un rôle très important pour éviter la baisse de performances du module causée par le dépôt de poussière.

#### **4.4. Les performances du module PV monocristallin pour différentes irradiances et températures**

Dans ce test, on s'intéresse à observer la réponse du module photovoltaïque sous différentes irradiances et températures.

Le test est effectué en caractérisant le module photovoltaïque de façon continue, avec un pas de 5 minutes durant la journée du 17/06/2018, de 8h39 à 13h. Les résultats du test sont représentés dans les figures (4.13) et (4.14) et le tableau (4.3) suivants :

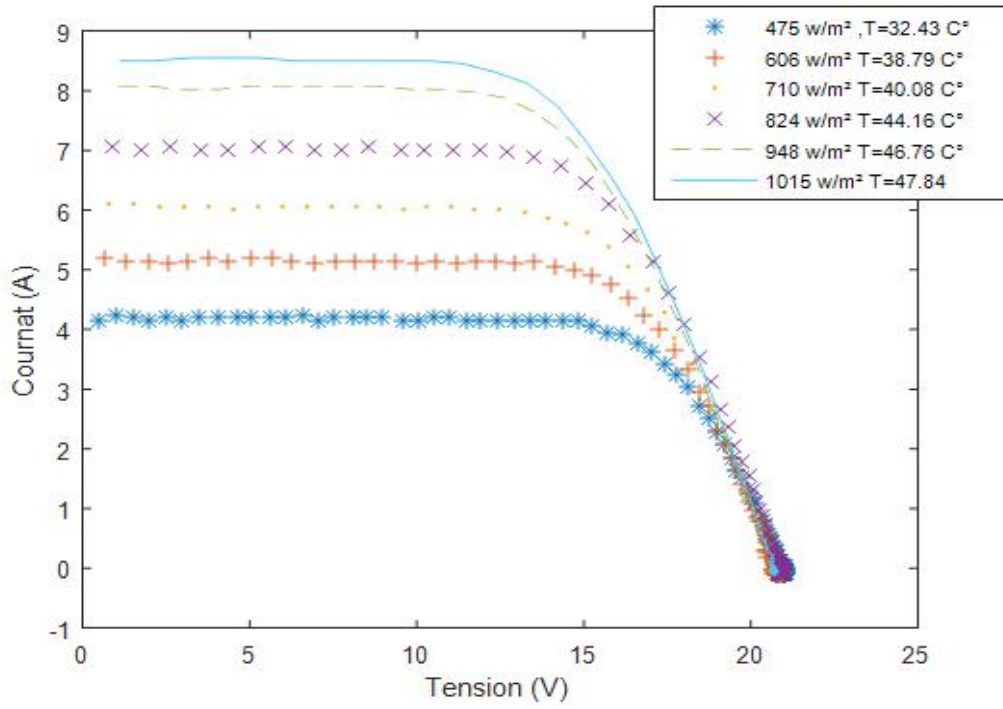


Figure 4.13 Caractéristique I(V) pour différentes irradiances et températures

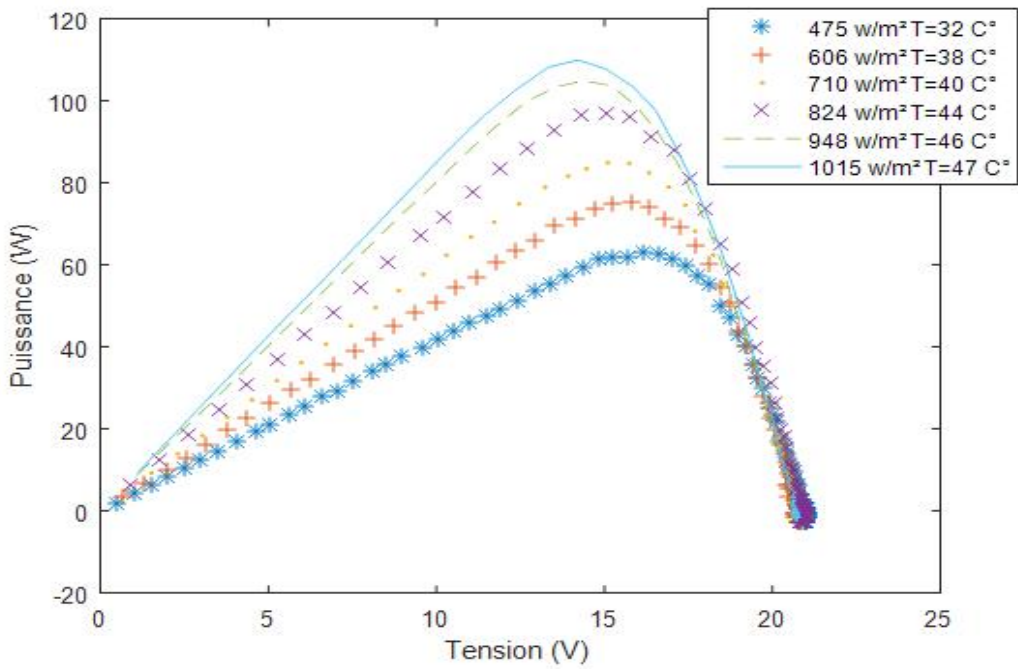


Figure 4.14 Caractéristique P(V) pour différentes irradiances et températures

Heure	G, T	Isc (A)	Voc (V)	Pmax (W)	Imp(A)	Vmp(V)
8h39	475 w/m <sup>2</sup> T=32 C°	4.19	21.03	63.15	3.90	16.17
9h14	606 w/m <sup>2</sup> T=38 C°	5.14	20.93	75.23	4.76	15.78
9h44	710 w/m <sup>2</sup> T=40 C°	6.05	20.88	84.98	5.62	15.10
10h24	824 w/m <sup>2</sup> T=44 C°	7.06	21.03	96.96	6.44	15.05
11h19	948 w/m <sup>2</sup> T=46 C°	8.02	20.78	104.92	7.30	14.36
12h39	1015 w/m <sup>2</sup> T=47 C°	8.54	20.83	109.98	7.73	14.21

Tableau 4.3 Relevé des mesures effectuées avec le module photovoltaïque au silicium monocristallin pour différentes irradiations et températures

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'irradiation solaire augmente pour atteindre son maximum à 12h30 environs .La température du module augmente aussi mais de façon plus lente que l'irradiation solaire, elle atteint une valeur maximale de 47 degrés à 12h39 environs.

Concernant les paramètres électriques du module, on constate une augmentation de Isc, Pmax, et Imp de façon linéaire avec l'irradiation .La tension de circuit ouvert Vco reste pratiquement constante durant le test. Le tracé des valeurs de Imp, Isc et Pmax en fonction de l'irradiation permet de trouver la relation linéaire entre ces paramètres et l'irradiation solaire.

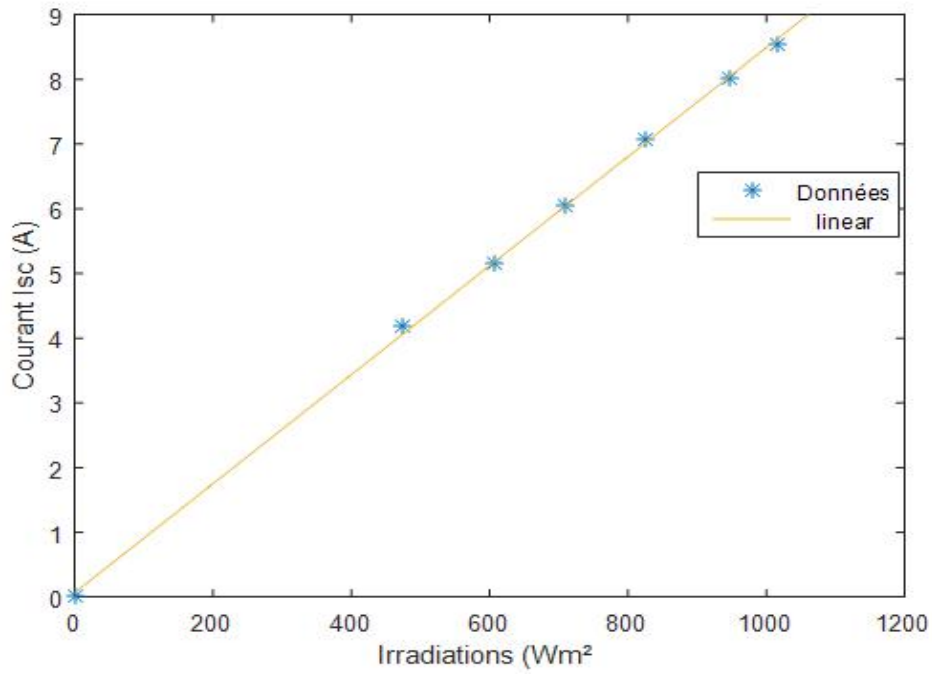


Figure 4.15 Variation du courant de court-circuit  $I_{cc}$  avec l'irradiation.

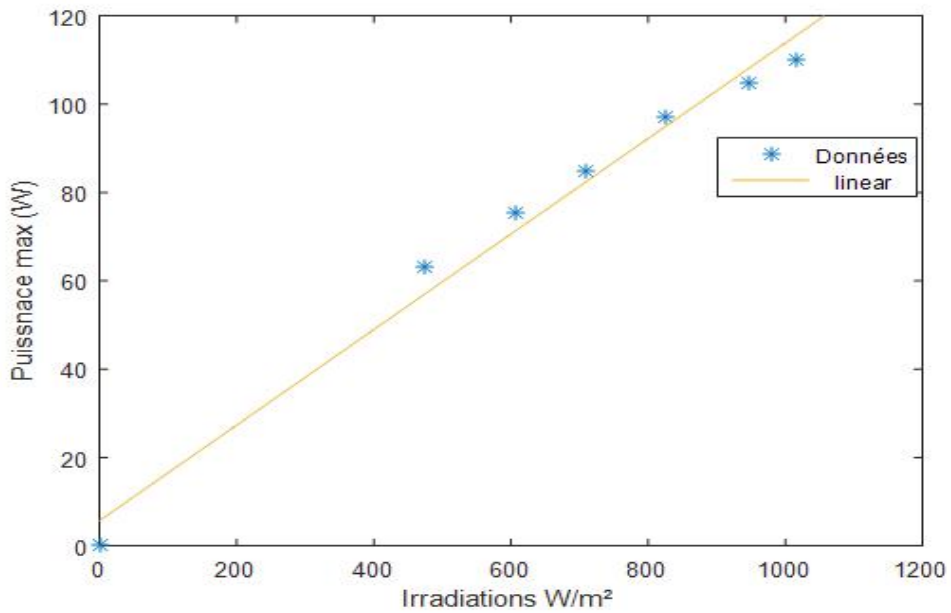


Figure 4.16 Variation de la puissance maximale  $P_{max}$  avec l'irradiation.

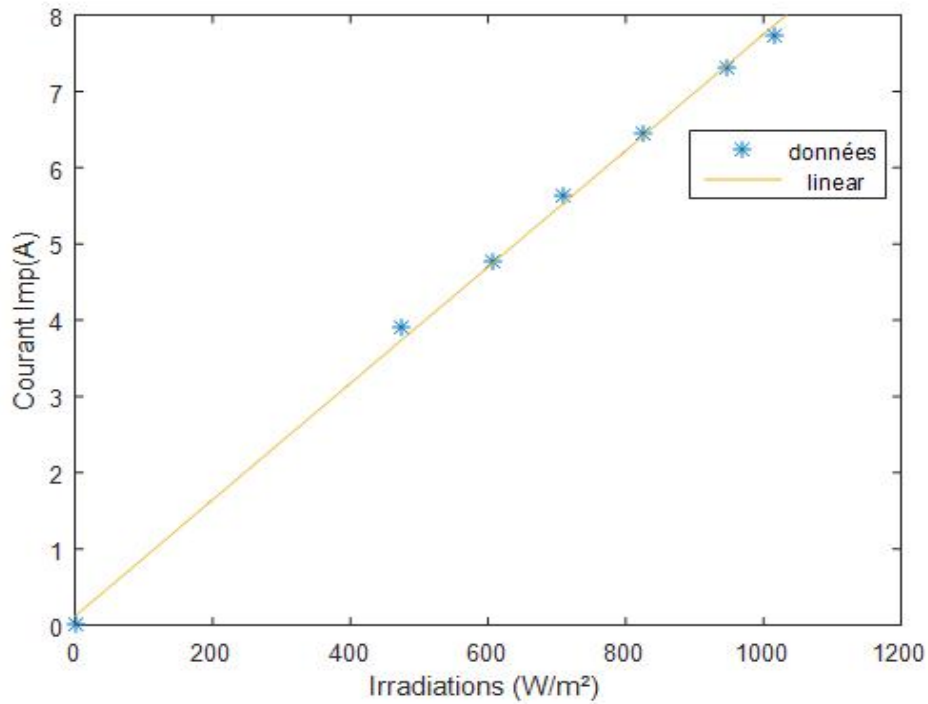


Figure 4.17 Variation du courant de puissance maximale  $I_{mp}$  avec l'irradiation

## Conclusion

Les résultats de la caractérisation obtenus montrent que le comportement du module photovoltaïque utilisé, de technologie monocristalline dépend de l'éclairement, la température, l'ombrage et la salissure dans les conditions d'utilisations réelles.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Notre travail est basé sur l'étude et la caractérisation d'un module photovoltaïque à base de silicium monocristallin.

La plateforme de caractérisation photovoltaïque installée au CDER nous a permis de caractériser le module photovoltaïque au silicium monocristallin (Condor 155p) dans les conditions réelles d'utilisation, nous avons pu d'ailleurs observer le comportement électrique de ce module en fonction de l'éclairement et la température qui varient au cours de la journée.

Nous avons pu obtenir les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  en fonction des différentes températures et irradiations après avoir effectué plusieurs mesures pendant une journée, en temps réel.

Les résultats de la caractérisation du panneau photovoltaïque au silicium monocristallin montrent que :

- Malgré le coût élevé de production des panneaux photovoltaïques au silicium monocristallin, ils offrent un meilleur rendement et une bonne durée de vie (jusqu'à 30 ans) par rapport aux autres technologies.
- Le phénomène d'ombrage influe directement sur la production électrique des modules photovoltaïques au silicium monocristallin avec une dégradation de la puissance maximale  $P_{max}$ , principalement sur la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .
- La salissure influe principalement sur le courant de court-circuit  $I_{cc}$  ainsi que sur la puissance maximale  $P_{max}$ .
- La température a une influence négligeable sur le courant de court-circuit par contre la tension de circuit ouvert baisse assez fortement donc lorsque la température augmente le rendement du module photovoltaïque diminue.
- Les performances d'un module photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que  $R_s$  est grande ou que  $R_{sh}$  est faible.
- Le rendement du module photovoltaïque augmente proportionnellement avec l'irradiation  $G$ .
- Tant que le facteur d'idéalité est proche de 1, la diode est idéale ; le rendement est meilleur.

La plateforme de caractérisation du CDER nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement du module photovoltaïque au silicium monocristallin.

## Bibliographie

- [1] : Thomas Mambrini, thèse de doctorat, caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies - PARIS -16 décembre 2014.
- [2] : GUENOUNOU Abderrezak, mémoire de magister, mise au point de nouveaux procédés de mesure des caractéristiques directe et inverse des modules photovoltaïques de différentes technologies- Tlemcen -2009.
- [3] : AMARA Karima, mémoire de magister, contribution à l'étude d'une conception d'une centrale photovoltaïque (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension – Tizi Ouzou - 2015.
- [4] : BENCHERRAT Abdennebi, mémoire de master, Etude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellules solaires à faibles budget thermique - Tlemcen -2012.
- [5] : MEZIANI Zahra, mémoire de magister, modélisation de modules photovoltaïque - Batna -2012.
- [6] : Helali Kamelia, mémoire de magister, modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative – Tizi Ouzou -25.06.2012.
- [7] : <https://sites.google.com/site/tpeepv/structure-et-fonctionnement>.
- [8] : Cécile Miquel, Synthèse, Système photovoltaïques : fabrication et impact environnemental – juillet 2009.
- [9] : [www.ecosunenergy.fr](http://www.ecosunenergy.fr)

[10] : DJELLOUT Thilleli et MAKOUR Sarah, mémoire de master, Etude de l'effet de la température et de l'éclairage sur les performances des modules photovoltaïques à base de Silicium amorphe – Tizi Ouzou - 04/07/2017.

[11] : BIRANE Mouhoub, mémoire de magister, Etude et simulation des systèmes photovoltaïques avec micro-convertisseurs – Ecole Nationale Polytechnique d'El-Harrach – Alger – 2011.

[12] : AOUCHICHE Nedjma, mémoire de magister, Mise au point d'un banc d'essai photovoltaïque - Ecole Nationale Polytechnique d'El-Harrach –Alger – Septembre 2010.

[13] : Zabardjade SAIDBACAR, thèse de doctorat, élaboration et caractérisations du silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe – Université Paris Sud – 19 mars 2012.

[14] : AMIRA Khaled, mémoire de magister, Elaboration de nouvelles phases de silicium en couches minces – Constantine – 02 juillet 2008.

[15] : Thomas Zimmer, Chapitre 6 : Types des cellules photovoltaïques –Université de Bordeaux France.

[16] : Article généralités sur les cellules photovoltaïques.

[17] : Energie solaire photovoltaïque, Lycée des métiers De l'énergie de la Métallurgie et de la vente - JEAN CAILLAUD - 2010.

[18] : OUADA Mahdi, Etude et caractérisation sous Matlab Simulink d'un générateur photovoltaïque – Ghardaia – 2012.

[19] : Revue des Energies Renouvelables, Etude et caractérisation d'un générateur photovoltaïque – Sénégal – 2008.

[20]: Vidéo; mathematical modelling of solar PV array in Simulink (MATLAB 2015), cell or module - YouTube\_2

### Liste des mots clés

Rayonnement solaire    Cellule solaire    Module    Photovoltaïque    Eclairment  
Température    Irradiation    Silicium    Monocristallin    Effet photovoltaïque  
Caractéristiques    Courant    Tension    Puissance    Semi-conducteur    Caractérisation  
Modélisation    Simulation    Technologie    Série    Parallèle    Hybride    Rendement  
Matlab/Simulink    CDER

## *Résumé*

L'étude s'inscrit dans le cadre de la caractérisation d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin. La performance de ce module est décrite en termes de caractéristiques électriques courant-tension et puissance-tension à des conditions standard de test (STC).

Les équations mathématiques développées pour la modélisation de la performance du module photovoltaïque sont basées sur la caractéristique courant – tension. Le modèle de simulation a été validé à partir des données expérimentales d'un module photovoltaïque monocristallin installé sur la plateforme de caractérisation de CDER. Les résultats de simulation nous ont permis de montrer l'influence des paramètres qui entrent en jeu dans la performance de production de l'énergie électrique.

Les résultats de la caractérisation obtenus montrent que le comportement du module photovoltaïque utilisé, de technologie monocristalline dépend de l'éclairement, la température, l'ombrage et la salissure dans les conditions d'utilisations réelles.