

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

## **MAGISTER**

**Option : Energétique et Mécanique des Fluides**

Par

**MEDJHED ADEL**

*Thème :*

**Extraction des paramètres des cellules solaires en utilisant  
le modèle à deux exponentielles**

Soutenu le : 10/11/2011

Devant le Jury Composé par :

<b>Président :</b>	Dr. Kassali Kamel	Professeur	UFA Sétif
<b>Rapporteur :</b>	Dr. Chegaar Mohamed	Professeur	UFA Sétif
<b>Examineur:</b>	Dr. Ouennoughi Zahir	Professeur	UFA Sétif
<b>Examineur:</b>	Dr. Guellal Messaoud	Maître de Conférences (A)	UFA Sétif

# Remerciements

*Avant tout, je remercie DIEU qui ma aidé à terminer ce modeste travail.*

*J'exprime mes chaleureux remerciements à Monsieur Chegaar Mohamed, professeur à l'université de Sétif, de m'avoir accueilli et encadré tout au long de ce travail, et je lui exprime toute ma reconnaissance pour ses encouragements, ses qualités humaines et sa disponibilité.*

*Je remercie sincèrement Monsieur Kassali Kamel, professeur à l'université de Sétif, pour l'honneur qu'il m'a accordé en acceptant de présider le jury de soutenance.*

*Je remercie aussi Monsieur Ouennoughi Zahir, professeur à l'université de Sétif, pour avoir répondu aimablement afin de juger ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à Monsieur Guellal Messaoud, maître conférences à l'université de Sétif, de me faire l'honneur de juger ce travail.*

# *DEDICACES*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma Mère*

*A mon Père*

*A mon neveu Abdessamad*

*A mes Frères et Sœurs*

*A tous mes Amis*

*Adel Medjhed*

# TABLE DES MATIERES

Sommaire.....	i
Glossaire.....	iv
Introduction générale.....	1

## CHAPITRE I : LE RAYONNEMENT SOLAIRE

Introduction.....	4
I- Généralités sur le rayonnement solaire.....	4
I-1- Le soleil.....	4
I-2- La constante solaire.....	5
I-3- Mouvement de la terre.....	5
I-4- Mouvement apparent du soleil.....	7
I-5- Durée maximale d'ensoleillement.....	9
II- Effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.....	10
II-1- Composition de l'atmosphère.....	10
II-2- Structure de l'atmosphère.....	10
II-3- Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	12
II-4- Effets de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.....	14
III- Calcul du rayonnement solaire.....	16
III-1- L'irradiation solaire en dehors de l'atmosphère.....	16
III-2- L'irradiation solaire au niveau du sol.....	17
Conclusion.....	17

## CHAPITRE II : LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Introduction.....	18
I- Les semi-conducteurs.....	18
II- Les cellules solaires.....	20
II-1- Structure d'une cellule photovoltaïque.....	20
II-2- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	21
III- Le circuit équivalent d'une cellule solaire.....	22

IV- La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire.....	23
V- Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire.....	25
VI- Effet de l'illumination sur la caractéristique I-V.....	26
VII- Effet de la température sur la caractéristique I-V.....	27
VIII- Principaux facteurs limitant le rendement de la conversion.....	28
VIII-1- Le courant de court circuit.....	28
VIII-2- La résistance série.....	28
VIII-3- La résistance parallèle.....	30
IX- Modules photovoltaïques.....	31
IX-1- Connexion en série.....	32
IX-1- Connexion en parallèle.....	33
IX-1- Connexion mixte.....	33
X- Déséquilibre dans un module photovoltaïque.....	34
X-1- Déséquilibre dans une connexion en série.....	35
X-2- Déséquilibre dans une connexion en parallèle.....	36
XI- Diode de protection.....	37
XI-1- Diode by-pass.....	37
XI-1- Diode anti-retour.....	38
XII- Différents types de cellules solaires.....	38
Conclusion.....	39

### **CHAPITRE III : EXTRACTION DES PARAMETRES DES CELLULES SOLAIRES**

Introduction.....	40
I- Méthode de simulation de la caractéristique courant-tension.....	40
II- Méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires sous illumination.....	41
II-1- Méthodes à une seule exponentielle.....	41
II-1-1- Méthode d'optimisation verticale.....	41
II-1-1- Méthode de Bouzidi et al.....	42
II-2- Méthodes à deux exponentielles.....	45

II-2-1- Méthode de Kaminski et al.....	46
II-3- Méthode proposée.....	48
II-3-1- Description informelle.....	49
II-3-2- Fonction objectif.....	50
II-3-3- Initialisation des paramètres.....	50
II-3-4- Facteur d'inertie.....	51
II-3-5- Description algorithmique.....	51
II-3-6- Application de la méthode.....	53
II-3-7- Résultats et discussion.....	54
Conclusion.....	58
Conclusion générale.....	59
Références bibliographiques.....	61

## GLOSSAIRE

TWh	Térawatt-heure
j	Numéro du jour de l'année
AU	Unité astronomique ; 1AU=149 597 870,7 km
E	Le flux du rayonnement solaire ( $W /m^2$ )
$E_0$	La Constante solaire égale à $1367 W /m^2$
$\delta$	Déclinaison
h	La hauteur du soleil
a	L'azimut du soleil
L	La latitude du lieu
H	L'altitude
$\ell$	Longitude du lieu
$\omega$	L'angle horaire
$\omega_0$	L'angle horaire au levée du soleil
TSV	Temps solaire vrai
TSM	Temps solaire moyen
TL	Temps légal
TU	Temps universel
$E_t$	Equation du temps
$SS_0$	Durée du jour
AM	Masse d'air
$E_{h\lambda}$	Irradiation solaire directe
$E_j$	Irradiation solaire journalière
$E_{s\lambda}$	Irradiation solaire diffuse
$E_{g\lambda}$	Irradiation solaire globale
$K_T$	Indice de clarté
$E_g$	Energie de la bande interdite (Gap)
$E_c$	Energie de la bande de conduction
$E_v$	Energie de la bande de valence
$E_F$	Energie du niveau de Fermi
BSF	Back Surface Field ou surface arrière de la cellule
$I_{obs}$	Courant d'obscurité
$I_{ph}$	Courant photogénéré ou photocourant
$I_s$	Courant de saturation
$I_{cc}$	Courant de court circuit

$I_m$	Courant maximum
$V$	Tension
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert
$V_m$	Tension maximale
$P_{max}$	Puissance électrique maximale
$n$	Facteur d'idéalité
$R_s$	Résistance série
$R_{sh}$	Résistance shunt ou parallèle
$G_{sh}$	Conductance shunt
$\eta$	Rendement de la cellule
$q$	Charge électrique
$k$	Constante de Boltzmann
RMSE	Erreur relative quadratique



## *Introduction Générale*

Durant les dernières décennies les besoins énergétiques mondiaux ne cessent d'augmenter en raison du développement industriel, agricole et démographique. Aussi face aux épuisements de façon dangereuse des énergies fossiles, tels que : le charbon, le pétrole, le gaz naturel; estimés pour quelques dizaines d'années prochaines pour les générations futures.

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution de l'atmosphère.

En vertu du protocole de Kyoto, plusieurs pays sont engagés à trouver d'autres sources d'énergies fiables, rentables et renouvelables. Parmi ces sources on compte : l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, la géothermie et la biomasse. Contrairement aux énergies fossiles. Les énergies nouvelles ne sont pas polluantes, ont pas d'émissions de gaz à effet de serre et non dangereuse conformément au protocole de Kyoto, pour les futures générations. A l'exception de l'énergie géothermique ; les autres sources proviennent directement ou indirectement du soleil, elles sont donc inimitables tant que ce dernier rayonnera.

L'une des filières des énergies renouvelables étudiée dans cette thèse est : l'énergie solaire photovoltaïque. C'est la source la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

L'effet photovoltaïque (PV) été découvert par le physicien français Antoine César Becquerel en 1839 qui constata des effets électriques : Lorsque des électrodes de platine sont recouverts de bromure d'argent ou de chlorure d'argent puis exposés aux rayons solaires et dans une solutions aqueuse ; les électrodes deviennent illuminés. Puis en 1877 William Grylls Adams et R E Day décrivaient l'effet photovoltaïque du sélénium. Russell Shoemaker Ohl décrivit en 1940 la première réalisation d'une jonction P - N dans le silicium à effet photovoltaïque. La toute première cellule solaire vit le jour en 1955 dans les laboratoires Bell Téléphone par les chercheurs américains : C S Fuller, G L Pearson et M B Prince.

L'utilisation des cellules solaires a débuté dans les années 50 avec la naissance de l'industrie spatiale (satellite et navettes). Les recherches ont permis d'améliorer les performances et les tailles des cellules solaires.

La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales du pétrole, du charbon et du gaz. La production d'électricité photovoltaïque connaît une croissance importante depuis les années 1999 pour dépasser les 21 TWh en 2009.

Le photovoltaïque se présente donc comme l'alternative possible aux énergies développées jusqu'alors pour les sites isolés. Son caractère non polluant et illimité fait de l'énergie solaire un candidat idéal pour les années à venir. Si elle répond de manière parfaite aux critères « écologiques » exigés, en revanche le prix de revient actuel du kilowattheure la rend prohibitive pour de nombreuses applications et du fait, empêche son essor industriel. Afin d'inverser la tendance, les recherches dans ce domaine, jonglent entre les notions de rendement et du prix de revient pour lui assurer une compétitivité future.

Parallèlement aux investigations menées aux laboratoires, des études théoriques nombreuses sont faites, en vue de mieux cerner les facteurs limitant les performances des cellules solaires. Parmi elles, les études de simulation revêtent une grande importance du fait qu'elles permettent de prédire de manière satisfaisante les propriétés électriques et photovoltaïques de ces dispositifs fonctionnant dans des conditions spécifiques précises. Dans notre travail nous nous intéressons à extraire les principaux paramètres caractéristiques d'une cellule solaire tel que le courant de saturation  $I_s$ , le photo courant  $I_{ph}$ , le facteur d'idéalité  $n$  et les résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_p$ ; en utilisant le modèle à deux exponentielles; du fait de sa grande importance et pour mieux étudier le comportement des cellules solaires. L'implication de ces paramètres a un effet direct sur le rendement qui est le facteur principal de la cellule, et un autre effet sur le facteur de forme.

Ce manuscrit se présente de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre nous nous intéressons à la source d'énergie que représente le soleil, ses caractéristiques, ainsi que l'effet de l'atmosphère terrestre sur le rayonnement solaire.
- Le deuxième chapitre touche l'étude de la conversion photovoltaïque, la structure et le fonctionnement d'une cellule solaire. Les paramètres caractéristiques des cellules solaires et leurs effets ainsi que les différents types de cellules solaires sont aussi étudiés.
- Le troisième chapitre est basé sur l'extraction des paramètres par différentes méthodes existantes pour les deux modèles (à une exponentielle et à deux exponentielles). Une nouvelle méthode est proposée et les résultats obtenus sont développés et discutés.
- En dernier lieu on termine par une conclusion générale.

***Chapitre I :***  
***Généralités sur le Rayonnement Solaire***

## Introduction :

Le rayonnement solaire est la source de la plus part des énergies renouvelables. Dans ce chapitre nous abordons en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie que représente le soleil et son application dans le domaine photovoltaïque.

Nous décrivons ensuite l'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire et on termine par la distribution spectrale de ce dernier.

## I- Généralités sur le rayonnement solaire :

### I-1 Le Soleil :

Le soleil est une grande étoile de forme pseudo sphérique, la plus proche de notre planète ; une boule de gaz dont le diamètre est de 1 391 000 Km soit 109 fois plus grand que celui de la terre. Le soleil est situé à environ de 149 598 000 Km de notre planète. Cette distance est la cause pour la quelle sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise à la vitesse de  $3 \times 10^8$  m/s. La distance terre-soleil varie quotidiennement selon la relation [1] :

$$d = 1,5 \times 10^{11} \left\{ 1 + 0,017 \sin \frac{360 (j - 93)}{365} \right\}; \quad \text{en mètre} \quad (I.1)$$

Ou : j est le numéro du jour de l'année comptée à partir du 1<sup>er</sup> janvier.

$$j = 1 \text{ à } 365.$$

Le volume du soleil peut contenir 1 300 000 Terres ; sa masse est de 330 000 fois que celle de la terre soit  $1,989 \times 10^{30}$  Kg.

Le soleil est composé de 70% d'hydrogène, 28% d'hélium, et les 2% restants représentent la plupart des autres éléments présents dans l'univers. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés, tel que OH (radical hydroxyle), CH (radical méthylique) et aussi du titane, etc....

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Emise sous forme de photons ; elle représente un chiffre considérable de l'ordre  $3,82 \times 10^{26}$  Watts.

Cette énergie radiative est due à une fusion nucléaire. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène ( $H_2$ ) convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium (He), la perte de 4 millions de tonnes par seconde se

traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque  $\text{cm}^2$  de sa surface émet une énergie de  $4 \times 10^{17} \text{ W}$  ; mais il n'arrive sur terre que  $1.8 \times 10^{17} \text{ W}$  de cette puissance.

La fusion d'hydrogène en hélium est donnée par la réaction suivante :



Le transfert d'énergie du centre vers la surface du soleil s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère, épaisse de 200 Km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle.

### ***I-2 La Constante solaire :***

La valeur du flux de rayonnement solaire  $E$  reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère, sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil où sa valeur moyenne  $E_0$  est appelée la constante solaire.

La constante solaire est estimée à  $1367 \text{ W/m}^2$  par Claus Frohlich et Christoph Wehrli du centre radiométrique mondial de Davos en Suisse, après des résultats de mesures faites entre 1969 et 1980 [2]. La valeur de la constante solaire était adoptée par la commission des instruments des méthodes d'observation (CIMO) de l'organisation météorologique mondiale (OMM) en octobre 1981.

D'une façon générale on peut calculer la valeur de  $E$  en fonction du numéro du jour de l'année par la relation suivante [3] :

$$E = E_0 [1 + 0,003 \cos(0,984 j)] \quad \text{en } \text{W/m}^2 \quad (\text{I.3})$$

Où :  $E_0$  : est la constante solaire égale à  $1367 \text{ W/m}^2$ .

$j$  est le numéro du jour de l'année comptée à partir du 1<sup>ier</sup> janvier.

$j=1$  à 365.

### ***I-3 Mouvement de la Terre :***

La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe un foyer. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. Un minimum de distance de 0,983 UA (Unité astronomique :  $150 \cdot 10^6 \text{ Km}$ ) le 21 décembre et un maximum de distance de 1,017 UA le 21 juin. La distance terre-soleil varie au cours de l'année du fait de l'excentricité de l'orbite terrestre ( $e=0,017$ ). Cela explique la variation de la constante solaire. On peut

schématiser le mouvement de la terre au tour du soleil par la figure I-1. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur

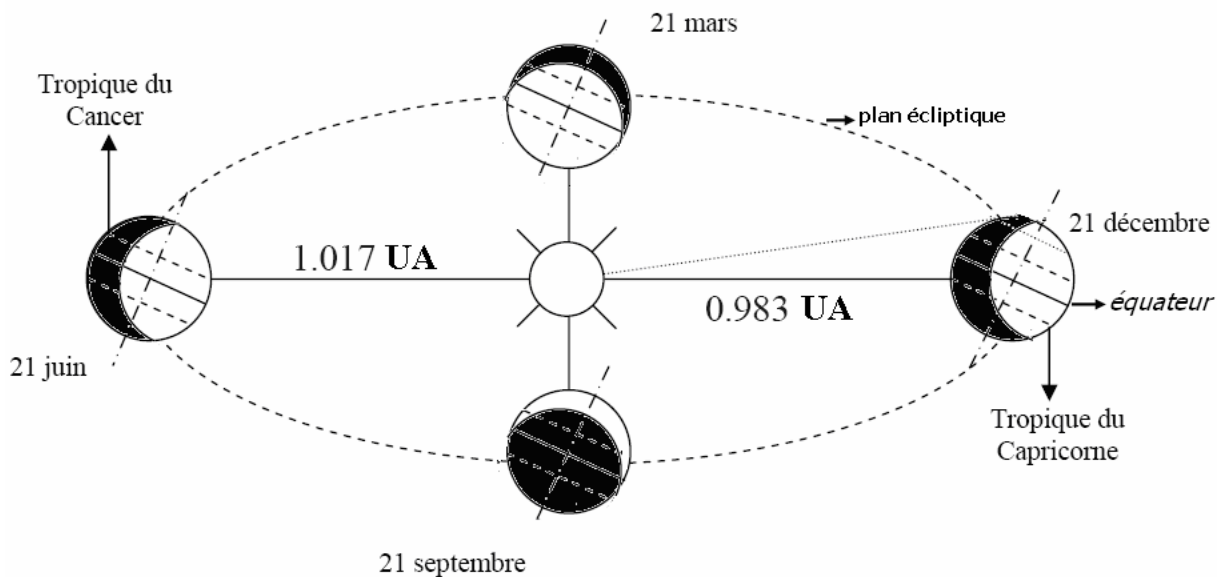


Figure I-1 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.

Or l'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique ; l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé déclinaison et qui vaut  $23,45^\circ$ . La rotation de la terre nous donne la notion de la journée qui est le temps qui sépare deux passages successifs du soleil au méridien d'un lieu. L'évolution de la terre autour du soleil définit l'année.

On appelle déclinaison  $\delta$ , l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial présenté dans la figure I-2, elle varie au cours de l'année entre  $-23,45^\circ$  et  $+23,45^\circ$ , elle est nulle aux équinoxes (21 Mars et 21 Septembre) et maximale au solstice d'été (21 Juin) et minimale au solstice d'hiver (21 Décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la formule [4] :

$$\delta = 23,45 \times \sin[0,980 (j + 284)] \text{ en degré } (^\circ) \quad (\text{I.4})$$

Ou : j est le numéro du jour de l'année.



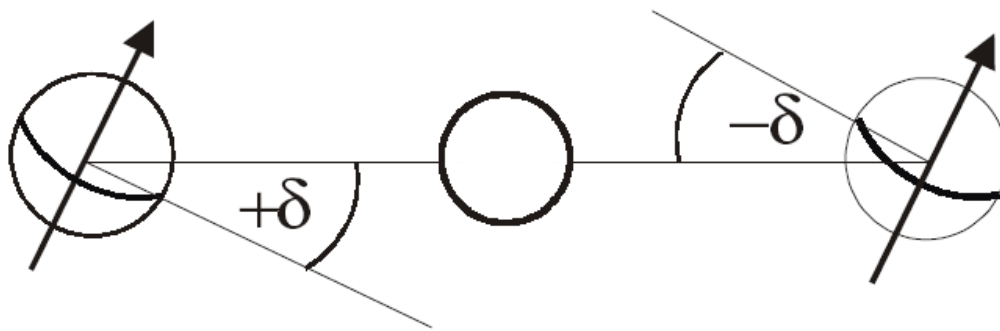


Figure I-2 : La Déclinaison.

#### I-4 Mouvement Apparent du Soleil :

Le mouvement apparent du soleil vu par un observateur fixé en un point de latitude  $L$  au nord de l'équateur est représenté par la Figure I-3 :

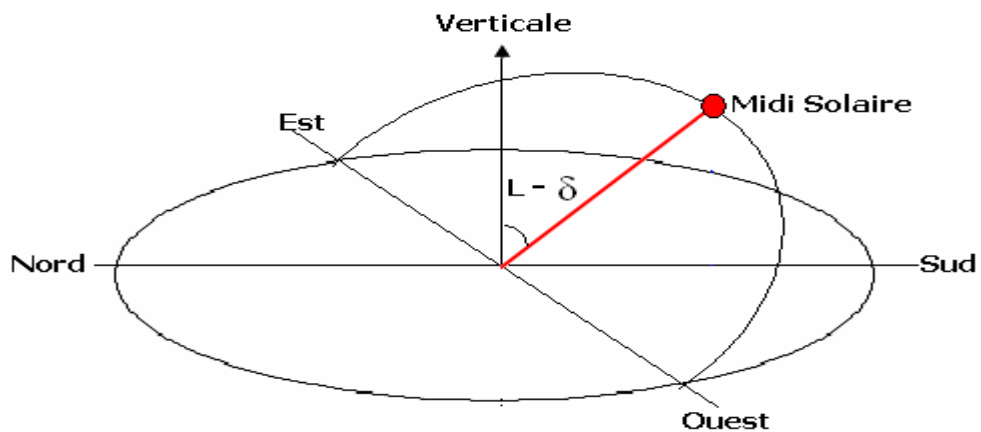


Figure I-3 : Mouvement du soleil.

Aux équinoxes à midi solaire, l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale du lieu est égal à  $L$ . Le repérage du soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles ; figure I-4 :

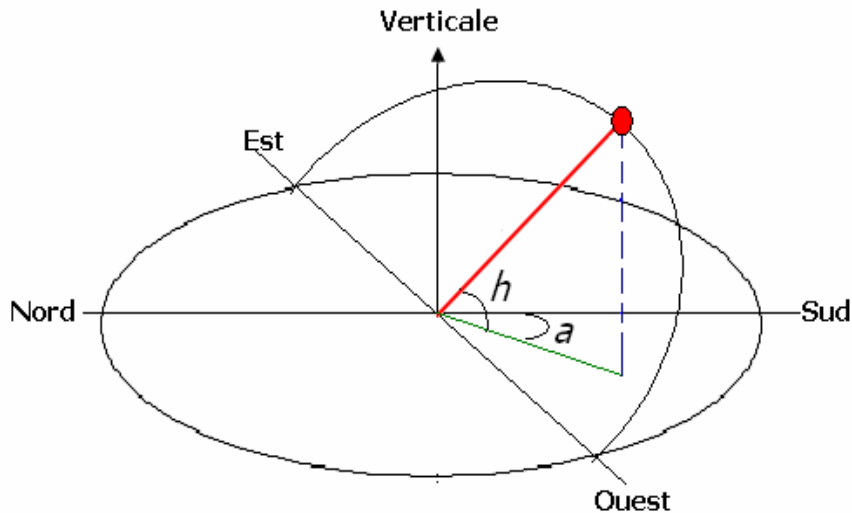


Figure I-4 : Repérage du soleil.

**I-4-1 La hauteur du soleil ( $h$ ) :**

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal du lieu « tangente au sol », et qui est donnée par [4] :

$$\sin(h) = \sin(\delta) \sin(L) + \cos(\delta) \cos(L) \cos(\omega) \quad (\text{I.5})$$

Où:  $L$  : La latitude du lieu.

$\delta$  : La déclinaison du soleil.

$\omega$  : L'angle horaire.

**I-4-2 L'azimut du soleil ( $a$ ) :**

C'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud du lieu, cet angle est compté positivement vers l'Ouest, il est donné par [4]:

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{I.6})$$

Où:  $h$  : La hauteur.

$\delta$  : La déclinaison du soleil.

$\omega$  : L'angle horaire.

**I-4-2 L'angle horaire du soleil :**

Il s'agit de l'angle compris entre le méridien origine passant pas le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, est défini par [4] :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (I.7)$$

$$TSV = TSM + E_t \quad (I.8)$$

$$E_t = -0,0002 + 0,4197 \cos\left(\frac{360j}{366}\right) - 7,3509 \sin\left(\frac{360j}{366}\right) - 3,2265 \cos\left(2\frac{360j}{366}\right) - 9,3912 \sin\left(2\frac{360j}{366}\right) - 0,0903 \cos\left(3\frac{360j}{366}\right) - 0,3361 \sin\left(3\frac{360j}{366}\right) \quad (I.9)$$

$$TSM = TU + \frac{\ell}{15} \quad (I.10)$$

$$TU = TL \pm C_1 + C_2 \quad (I.11)$$

Avec :

$\omega$  : L'angle horaire.

TSV : temps solaire vrai ; Le temps solaire vrai est égal ; au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

TSM : Temps solaire moyen

$E_t$  : Correction de l'équation du temps.

TU : Temps Universel

$\ell$  : Longitude de lieu.

TL : Temps légal (Donné par une montre).

$C_1$  : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich. (Égale 1 pour l'Algérie).

$C_2$  : Correction de saison (par exemple pour la France :  $C_2=0$  en hiver et  $C_2=+1$  en été).

**I-5 Durée maximale d'enseillement :**

La durée maximale d'enseillement pour un lieu donné peut être définie comme suit: C'est la durée du jour, ou c'est la durée maximale pendant laquelle le soleil le long de sa trajectoire diurne peut être vu, ou bien ; c'est la durée maximale que peut enregistrer un appareil de mesure de haute sensibilité. Mais en pratique on utilise la durée du jour qui est définie par la durée qui sépare deux passages consécutifs du soleil [5].

La durée du jour est donnée par [6] :

$$SS_0 = \frac{2}{15} \text{Arc cos}[tg(L) tg(\delta)] \quad (\text{I.12})$$

Où: L : La Latitude du lieu.

$\delta$  : La déclinaison du soleil.

## **II- Effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire:**

### ***II-1 Composition de l'atmosphère :***

L'atmosphère représente la couche gazeuse qui entoure la terre jusqu'à 800 Km d'altitude. Les gaz qui la composent sont indispensables pour la vie.

La composition de l'atmosphère est pratiquement constante jusqu'à 80Km d'altitude, elle est de 78% d'azote, 21% d'oxygène, 0,9% d'argon et 0,03 de carbone, et d'autres traces de gaz dont l'ozone vers 18 Km [7]. Un peu près de la surface de la terre on trouve de la vapeur d'eau en quantité et densité très variables, suivant l'altitude, la latitude, et les conditions météorologiques (glace, nuage, pluie,...). Elle contient enfin des particules en suspension extrêmement fines solides ou liquides ou mixtes constituant les aérosols atmosphériques où leurs tailles sont de l'ordre de micromètre ( $\mu\text{m}$ ).

### ***II-2 Structure de l'atmosphère :***

Les ingénieurs météorologiques et autres scientifiques ont structuré l'atmosphère en différentes zones, cette division peut sembler arbitraire mais relève de l'études de certaines caractéristiques qui apparaissent suffisamment différentes pour entraîner ce découpage, c'est le cas de la température. Ces zones sont [8] :

#### ***1. la troposphère :***

Elle s'étend du sol jusqu'à une altitude d'environ 11 Km. La température moyenne y est continûment croissante avec un gradient de  $-6,5$  °C tous les 1000 m, selon l'équation [8] :

$$T(Z) = 288 - 6,5 Z \quad (\text{I.13})$$

Ou T est mesuré en Kelvin, et Z en Kilomètre.

La troposphère contient  $\frac{5}{6}$  de la masse atmosphérique totale, c'est là qu'on rencontre la plus part des phénomènes météorologiques. Ceci s'explique par le fait que passé 10 Km d'altitude l'air est pratiquement sec, toute la vapeur d'eau s'étant condensée à cause de l'abaissement de la température, il n'y a donc quasiment plus de nuages.

### **2. la stratosphère :**

Une couche très pure s'étend de 11 Km jusqu'à 50 Km à une épaisseur de 39 Km d'environ ; dans cette couche se trouve une mince pellicule composée d'oxygène triatomique (Ozone), d'où elle contient la couche d'ozone. Le rôle le plus important est d'arrêter les rayons ultraviolets en provenance du soleil et entraîne une augmentation de la température à cette altitude.

Cet oxygène triatomique se forme par transformation de l'oxygène diatomique en oxygène monoatomique puis par recombinaison en  $O_3$  grâce à l'énergie apportée par le rayonnement ultraviolet. La réaction de formation de l'ozone s'écrit :



### **3. la mésosphère :**

Elle est située entre la stratosphère et la thermosphère. Elle s'étend de 50 Km à 85 Km d'altitude, à sa limite supérieure la température est d'environ  $-90^\circ C$ .

### **4. la thermosphère :**

A partir de 85 Km jusqu'à 700 Km ; se développe la thermosphère ; zone de haute atmosphère, les gaz ont tendance à se dissocier en gaz monoatomiques puis en ions positifs et électrons, les atomes les plus lourds tel que l'azote et l'oxygène tendent à disparaître au profit d'atomes plus légers. Ainsi on trouve des atomes d'hélium, d'hydrogène. L'énergie solaire absorbée explique l'accroissement de température que l'on constate en s'élevant avec l'altitude jusqu'à  $1600^\circ C$  et la conséquence de cette absorption sélective du spectre solaire fait disparaître tout rayonnement X en dessous de cette couche.

### 5. *l'exosphère :*

A partir d'une altitude de 700 Km ce développe cette zone, c'est un milieu extrêmement raréfié, il s'agit d'un mélange d'atomes quasiment indépendants. Les molécules de diazote et de dioxygène sont présentes, ionisées et elles absorbent les rayons gamma.

### ***II-3 Répartition spectrale du rayonnement solaire :***

Le spectre du soleil est un rayonnement électromagnétique, cette distribution est déterminée à partir de la température de sa surface. On simule souvent le comportement des radiations solaires hors atmosphère à celles d'un corps noir à la température de 5900 K figure (I-5).

L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie dans les divers domaines de longueur d'onde, la plus grande partie est rayonnée dans la gamme [0,2 $\mu$ m - 4 $\mu$ m] à un pourcentage de 99,2% de la totalité d'énergie émise par le soleil.

La répartition de la densité d'éclairement énergétique est résumée comme suit :

- La bande de l'Infrarouge (IR): Pour la longueur d'onde supérieure à 0,7 $\mu$ m avec un éclairement énergétique de 695 W.m<sup>-2</sup> soit 50,8%.
- La bande du visible: Pour la longueur d'onde comprise entre 0,4 $\mu$ m à 0,7 $\mu$ m avec un éclairement énergétique de 559 W.m<sup>-2</sup> soit 40,9%.
- La bande de l'Ultraviolet (UV): Pour la longueur d'onde comprise entre 0,2 $\mu$ m à 0,4 $\mu$ m avec un éclairement énergétique de 113 W.m<sup>-2</sup> soit 8,3%.

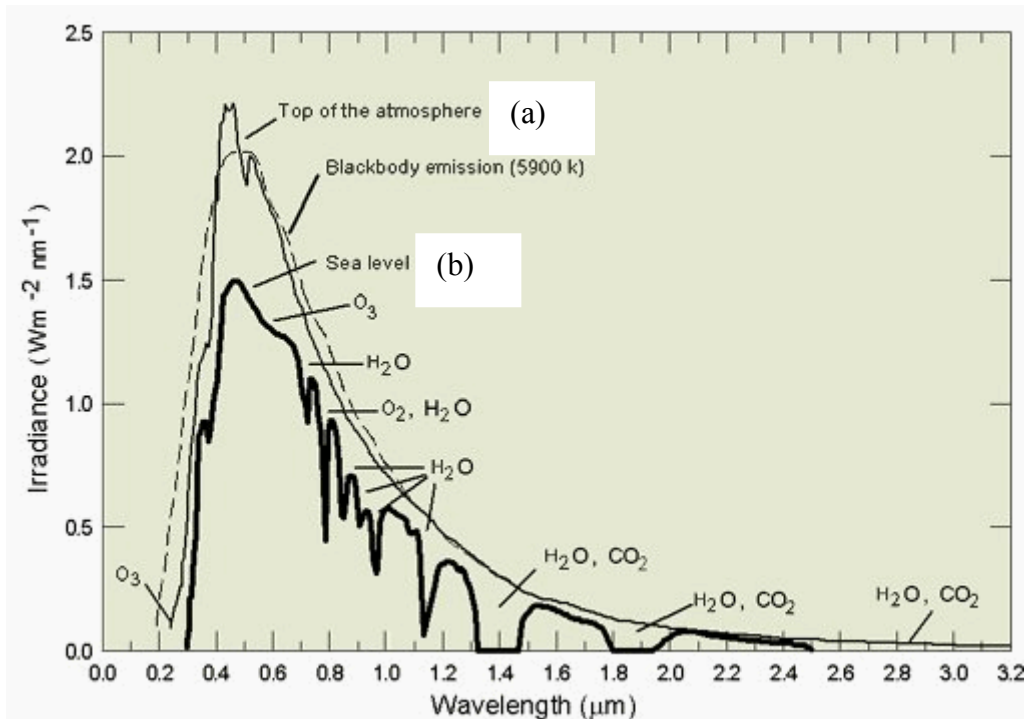


Figure I-5 : Distribution spectrale du rayonnement solaire [7] :

- a) Hors atmosphère (AM0).
- b) Au niveau de la mer (AM1.5).

L'atténuation observée après le passage à travers l'atmosphère est due à la masse d'air.

### ➤ La masse atmosphérique

On appelle Masse d'Air ou Air Mass en anglais, la masse atmosphérique traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre le sol de la terre. Par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer, elle est définie par :

$$AM = \frac{P}{1013} \frac{1}{\sin A} \exp\left(\frac{-Z}{7.8}\right) \quad (\text{I.15})$$

Avec : P : Pression en  $\text{N/m}^2$

A : Elévation du soleil sur l'horizon en degré.

Z : Altitude en Km.

Pour des conditions normales de pression et de température l'expression devient :

$$AM = \frac{1}{\sin A} \quad (\text{I.16})$$

AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement solaire arrivant au dessus de notre atmosphère à une incidence normale (spectre du rayonnement solaire en d'hors de l'atmosphère) développé pour l'usage aérospatiale figure (I-6).

AM1 correspond à une masse d'air non nulle pour une lumière arrivant à la surface de la terre (sol) à une position du soleil au zénith.

AM1.5 est le spectre standard le plus utilisé pour une masse d'air rencontrée par la lumière arrivant à  $48,2^\circ$  par rapport au zénith. La surface de la terre dans ce cas reçoit une lumière plus faible car la couche atmosphérique traversée est épaisse.

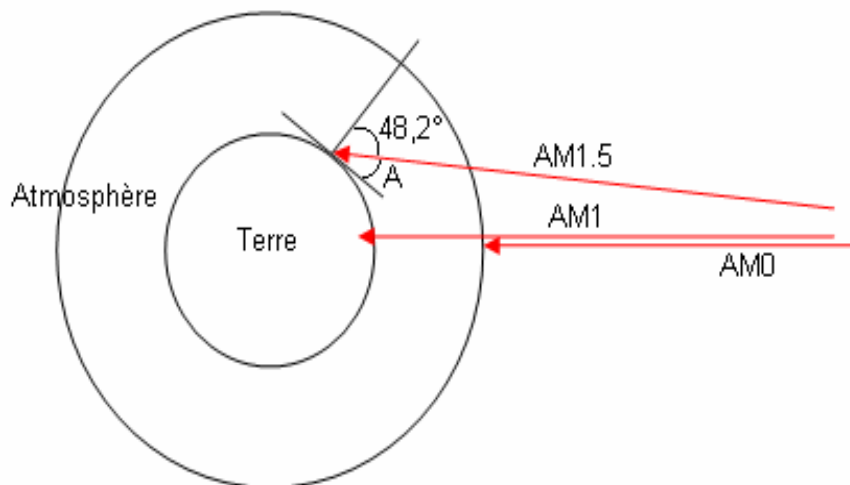


Figure I-6 : Description de différentes masses d'air.

Ces spectres standards sont modélisés en utilisant SMARTS 'Simple Model for Atmospheric Radiative Transmission of Sunshine' de Gueymard [9]. L'AM0, ou spectre extraterrestre utilisé pour générer le spectre de référence terrestre a été développé par ce dernier [10].

#### **II-4 Effets de l'atmosphère sur le rayonnement solaire :**

Lors de sa propagation dans l'atmosphère, le rayonnement solaire atteint le sol de la terre après avoir subi plusieurs modifications qui sont dues aux éléments constituant celui-ci, parmi ces changements on distingue :



### 1. L'absorption atmosphérique :

Les composants gazeux de l'atmosphère absorbent une partie du rayonnement solaire, cette absorption est dite sélective, car elle s'opère pour des valeurs bien déterminées de longueur d'onde. Les principales bandes d'absorption sont dues à :

#### ➤ L'Ozone

Le rayonnement ultraviolet est totalement absorbé par celui-ci dont la bande varie entre (0,2 $\mu\text{m}$  à 0,4 $\mu\text{m}$ ).

#### ➤ Dioxyde de Carbone :

Le CO<sub>2</sub> est absorbé à des bandes étroites de 1,9 $\mu\text{m}$ , et une forte absorption à 2,75 $\mu\text{m}$ .

#### ➤ L'oxygène :

Il est absorbé à une longueur d'onde de 0,85 $\mu\text{m}$ , alors que son influence n'est pas importante.

#### ➤ La vapeur d'eau :

L'absorption est essentielle autour des longueurs d'ondes suivantes : 0.9 ; 1.1 ; 1.4 ; 1,9 $\mu\text{m}$ , donc principalement dans la région de l'infrarouge.

### 2. La diffusion atmosphérique :

Le phénomène de diffusion se produit dans un milieu contenant de fines particules ou des molécules et dépendent fortement de la taille des ces dernières, puisqu'il fait intervenir les lois de l'optique géométrique (diffraction, réfraction et réflexion).

Les particules atmosphériques responsables de la diffusion sont les molécules, les aérosols, les gouttelettes et les cristaux des nuages ; ou chacune d'entre elles déterminent un type de diffusion. Les lois qui régissent ce phénomène ont été établies par Mie [11] :

$$\tau_{\lambda} = \beta \exp(-\alpha) \quad (\text{I.17})$$

Où :  $\tau_{\lambda}$  : Coefficient d'extinction.

$\beta$  : Clarté de l'atmosphère.

$\alpha$  : Coefficient dépendant du type et de la taille des particule (varie entre 0 – 4).

### III- Calcul du rayonnement solaire:

On partage d'une manière générale le rayonnement solaire parvenant au sol de la terre en deux composantes, qui sont [12]:

- Le rayonnement direct : c'est le rayonnement provenant directement du soleil après avoir traverser l'atmosphère sans subir de modifications.
- Le rayonnement diffus : c'est le rayonnement diffusé par les particules solides ou les aérosols en suspension dans l'atmosphère, il n'a pas de direction privilégié.

#### III-1 L'irradiation solaire en dehors de l'atmosphère :

L'éclairement solaire à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, situé à une altitude H sur un plan horizontal pour un rayonnement solaire sous une incidence normale de ce plan est désigné par  $E_{h\lambda}$  ; or en d'hors de l'atmosphère la seule composante qui existe c'est la composante directe donc :

$$E_{h\lambda} = E_0 \sin(h) \quad (I.18)$$

Avec :  $E_0$  : Constante solaire qui égale à  $1367 \text{ W.m}^{-2}$

$h$  : La hauteur du soleil

L'irradiation journalière  $E_j$  reçue sur une surface horizontale s'obtient en intégrant l'équation (I.18) par rapport au temps on trouve :

$$E_j = \int_{\text{journée}} E_{h\lambda} dt = \int_{TSL}^{TSC} E_0 \sin(h) dt \quad (I.19)$$

Ou : TSC et TSL correspondent aux heures de lever et coucher du soleil

$h$  : la hauteur du soleil.

En remplaçant  $\sin(h)$  par son expression donnée par (I.5) on trouve :

$$E_j = E_0 \int_{TSL}^{TSC} (\sin(\delta) \sin(L) + \cos(\delta) \cos(L) \cos(\omega)) dt \quad (I.20)$$

Une heure de temps correspond à une variation de  $15^\circ$  de l'angle horaire  $\omega$  :

$$dt = \frac{12}{\pi} d\omega$$

qui nous donne alors l'irradiation journalière :

$$E_j = \frac{24}{\pi} \frac{E_0}{1000} [\omega_0 \sin(\delta) \sin(L) + \sin(\omega_0) \cos(\delta) \cos(L)] \quad (I.21)$$

Ou  $\omega_0$  l'angle horaire au levée du soleil.

### **III-2 L'irradiation solaire au niveau du sol :**

L'éclairement solaire global ( $E_{g\lambda}$ ) au niveau du sol terrestre est la somme de l'éclairement solaire direct ( $E_{h\lambda}$ ) et l'éclairement solaire diffus ( $E_{s\lambda}$ ) qui est donné par :

$$E_{g\lambda} = E_0 \sin(h) + E_{s\lambda}$$

A partir de la connaissance de la moyenne mensuelle de l'irradiation globale journalière, on peut déduire l'irradiation diffuse journalière moyenne par la corrélation de Collares-Pireira et Rabl [13] :

$$E_{sh} = \{0,775 + 0,00606(\omega_0 - 90) - [0,505 + 0,00455(\omega_0 - 90)]\cos(115 K_T - 103)\} \quad (I.22)$$

Ou :  $K_T$  : indice de clarté.

$\omega_0$  : angle horaire au levée du soleil.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons fait un rappel de quelques notions de base de la source d'énergie qui est le Soleil ; ses caractéristiques et son mouvement apparent. Les modifications que subit le rayonnement solaire à sa traversé de l'atmosphère, ainsi qu'au calcul de l'irradiation solaire à la limite de l'atmosphère et au sol ont été développés.

***Chapitre II :***  
***La Conversion Photovoltaïque***

## Introduction :

Nous allons maintenant aborder le phénomène de la conversion photovoltaïque qui consiste en la conversion de la lumière en électricité à travers un dispositif qui s'appelle photopile ou « cellule solaire ». A la différence d'une pile classique, dont l'énergie est stockée puis restituée à volonté. Dans ce chapitre nous allons parler des semi-conducteurs, en décrivant le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, ses caractéristiques ainsi que les principaux facteurs limitant le rendement de la conversion.

## I- Les semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celles des isolants. Cette conductivité, dépend fortement de la température. Un semi-conducteur est un matériau où les électrons périphériques se répartissent entre deux bandes d'énergie au moins séparées par un intervalle d'énergie (gap) relativement faible de l'ordre de 1 eV [14].

### I-1 Structure de bande :

Dans un cristal, la particule en mouvement est soumise à un potentiel qui dépend des périodicités du réseau cristallin [15]. Dans un schéma simple d'un matériau à deux niveaux d'énergie (figure II-1), un électron possédant l'énergie  $E_v$  appartient à la bande de valence et se trouve lié à l'atome, s'il reçoit une énergie « sous forme d'un photon par exemple » qui lui permet d'atteindre le niveau  $E_c$ , qui est l'énergie correspondante à la bande de conduction, l'électron devient donc libre et peut alors participer à la création d'un courant électrique. L'énergie nécessaire pour que l'électron devienne libre est noté  $E_g$ , énergie associée à la bande interdite ou gap :

$$E_g = E_c - E_v \quad (\text{II.1})$$

Contrairement aux isolants ( $E_g > 5$  eV), les semi-conducteurs ont un gap de l'ordre de 1eV, par contre pour les métaux le gap est inexistant.

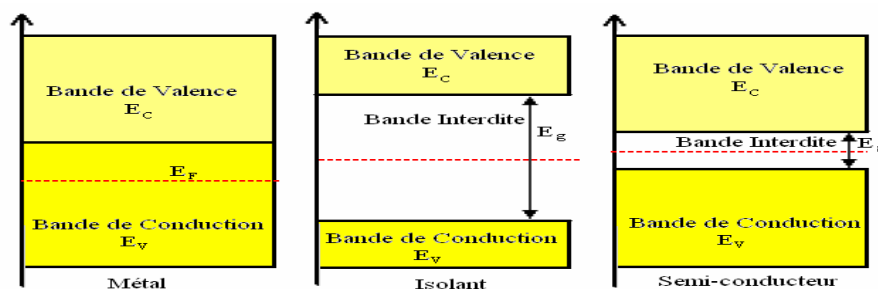


Figure II-1 : Diagramme de bande.

### I-2 Le dopage :

Toute modification à la périodicité du réseau est un défaut qui peut créer de ce fait des niveaux d'énergie supplémentaire. Le dopage d'un semi-conducteur pur « dit intrinsèque » va permettre donc d'amener des charges excédentaires qui améliorent la conductivité du matériau (figure II-2).

Un donneur est une impureté en position de substitution dans un réseau. C'est un élément atomique dont le nombre d'électrons de valence est supérieur à celui de l'atome du réseau. L'exemple classique est un élément du group V du tableau périodique (P, As, Sb). Le semi-conducteur est donc de type N.

Un accepteur est une impureté en position de remplacement d'un autre atome dans un réseau, cette impureté a un nombre d'électrons de valence inférieure à celui de l'atome remplacé. Tel est le cas des atomes du group III (B, Al, Ga) pour un réseau cristallin formé de Si. Il s'agit alors d'un semi-conducteur de type P, ou les porteurs majoritaires sont les trous [16].

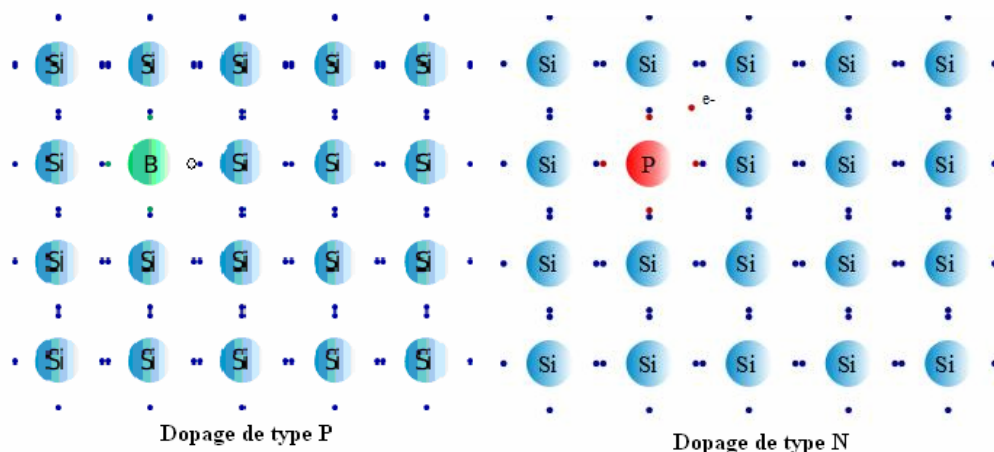


Figure II-2 : Dopage du silicium.

### I-3 La jonction PN :

La jonction PN est un dispositif semi-conducteur qui résulte de la mise en contact intime de deux parties d'un matériau de même bande interdite, une partie dopée P et l'autre dopée N. On constate alors l'existence de trois zones : la zone P non perturbée qui se trouve encore en équilibre, ainsi que la zone N. Entre les deux, se trouve une zone interfaciale chargée. Des courants de diffusion de trous et d'électrons se développent autour de la jonction. On appelle cette zone : zone de charge d'espace ; c'est le seul lieu du semi-

conducteur qui soit hors équilibre. Cette échange de porteur de charges (un ou plusieurs charges) crée un champ électrique qui va rétablir l'équilibre, d'où un courant globale de diffusion nul [17]. Les niveaux d'énergies au voisinage de la jonction PN sont donnés par la figure II-3.

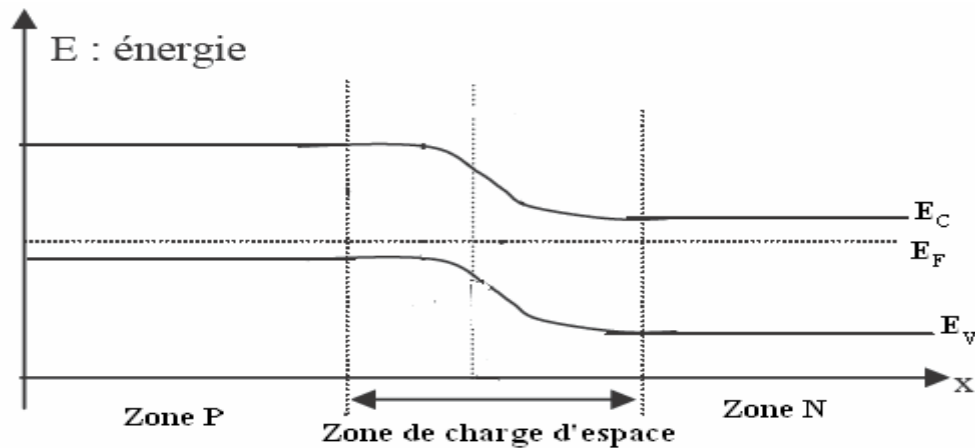


Figure II-3 : Diagramme de bande au voisinage de la jonction PN.

## II- Les cellules solaires :

Les cellules solaires sont des dispositifs à semi-conducteur. Elles sont généralement faites à base de silicium sous différentes formes. Les cellules photovoltaïques permettent de transformer l'énergie solaire « rayonnement électromagnétique » en énergie électrique. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque. La tension générée peut varier entre 0,3 V et 0,7V en fonction du matériau utilisé ainsi que la température de la cellule [18].

### II-1 Structure d'une cellule photovoltaïque :

La structure de base d'une cellule solaire photovoltaïque est une jonction PN (figure II-4) constituée de la manière suivante : un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une couche mince dopée N (quelque millièmes de mm). Entre les deux couches se développe la jonction. La couche supérieure qui est la zone N est recouverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'un substrat métallique (contact arrière) joue le rôle d'anode.

D'une manière générale on peut indiquer les principales couches d'une cellule solaire qui sont :

1. Couche antireflet : cette couche est utilisée pour minimiser la réflexion de la lumière, et d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et la cellule solaire. Parmi ces couches on trouve  $\text{TiO}_2$  [19].
2. Texturation de la surface : la texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. La surface a une forme pyramidale en général pour piéger le maximum de lumière. Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface de silicium par attaques chimiques (en utilisant KOH, NaOH), ou texturation mécanique (laminage à froid sous un peigne dentelé) [20].
3. Les contacts face avant et arrière : les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photogénérés. Les contacts doivent être ohmiques [21].
4. Le champ électrique arrière BSF : consiste à créer une barrière de potentiel sur la surface arrière de la cellule pour diminuer les pertes liées à la recombinaison.

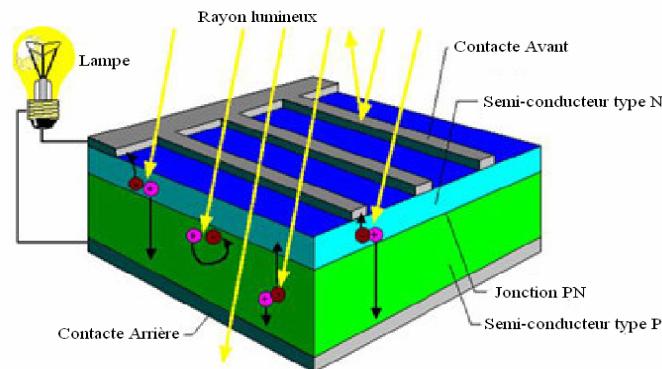


Figure II-4 : Structure d'une cellule solaire.

## II-2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Cette transformation est basée sur trois mécanismes physiques liés et simultanés :

- Absorption de la lumière dans le matériau (des photons dont l'énergie ( $E_\lambda = h\nu$ ) est supérieure à celle associée à la bande interdite  $E_g$ ).
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace : les électrons vont aller vers la région P, les trous vers la région N, on aura donc un photocourant de génération. Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires engendrent un photocourant



de diffusion. Ces deux courants s'ajoutent pour donner un photocourant résultant  $I_{ph}$ .

- Collecte des charges générées dans le dispositif ; se fait grâce aux contacts métalliques des régions P et N (électrode et anode).

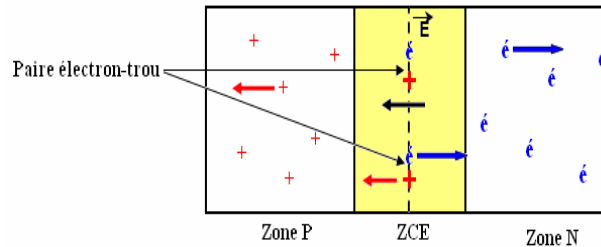


Figure II-5 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

### III- Le Circuit équivalent d'une cellule solaire :

Le fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque sous éclairage peut être modélisé en considérant le schéma équivalent d'un circuit électrique (figure II-6) ; et cela à partir de l'équation qui définit le comportement de la jonction PN. Pour tenir compte des différents phénomènes créés dans une cellule PV ; on introduit le modèle à deux diodes ; les différents composants de ce modèle sont :

- Le générateur de courant qui délivre le courant  $I_{ph}$  correspond au courant photogénéré.
- La première diode D1 modélise la diffusion des porteurs de charges dans la base et l'émetteur.
- La deuxième diode D2 modélise la recombinaison des porteurs de charges.
- recombinaison des porteurs de charges dans la zone de charge d'espace.
- La résistance série  $R_s$  tien compte de la résistivité aux contacts (interface avec le semi-conducteur) entre les différentes couches de la cellule (l'émetteur, la base et les contacts métalliques).
- La résistance parallèle ou de court circuit  $R_p$  ; elle se traduit par la présence d'un courant de fuite au niveau de la jonction.

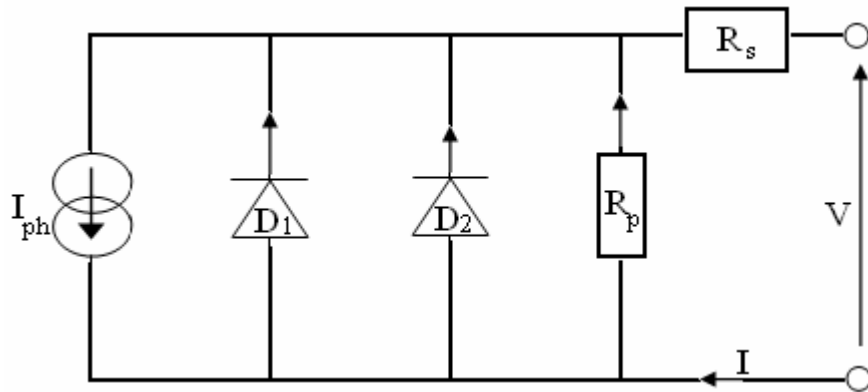


Figure II-6 : Circuit équivalent d'une cellule solaire.

#### IV- La Caractéristique courant tension d'une cellule solaire :

En se basant sur le circuit équivalent d'une cellule solaire (figure II-6) ; à l'obscurité pour une cellule photovoltaïque idéale (avec une seule diode), la caractéristique I-V est la suivante [18] :

$$I_{obs} = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-3})$$

Avec :  $I_s$  : Le courant de saturation de la diode,

$q$  : charge élémentaire,

$n$  : Facteur d'idéalité de la diode.

$k$  : Constante de Boltzmann.

$T$  : La température.

Sous éclaircissement, le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-4})$$

Où :  $I_{ph}$  : Le courant photogénéré.

Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle et en tenir compte des différents facteurs limitatifs ; l'observation de la figure II-6 nous conduit à modifier la relation (II-4) pour obtenir :

$$I(V) = I_{ph} - I_{s1} \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{n_1 kT}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{n_2 kT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{II-5})$$

Avec :  $I_{ph}$  : Le courant photogénéré.

$I_{s1}$  : Courant de saturation de la diode 1.

$I_{s2}$  : courant de saturation de la diode 2.

$n_1$  : Facteur d'idéalité de la diode 1.

$n_2$  : facteur d'idéalité de la diode 2.

$R_s$  : Résistance série ;

$R_p$  : résistance parallèle.

Dans le cas d'un modèle à une seule diode la relation (II-5) devient :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{II-6})$$

Ou bien :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{nkT}\right) - 1 \right] - G_{sh}(V + IR_s) \quad (\text{II-7})$$

Avec :  $G_{sh} = 1/R_p$  : La conductance parallèle ou shunt.

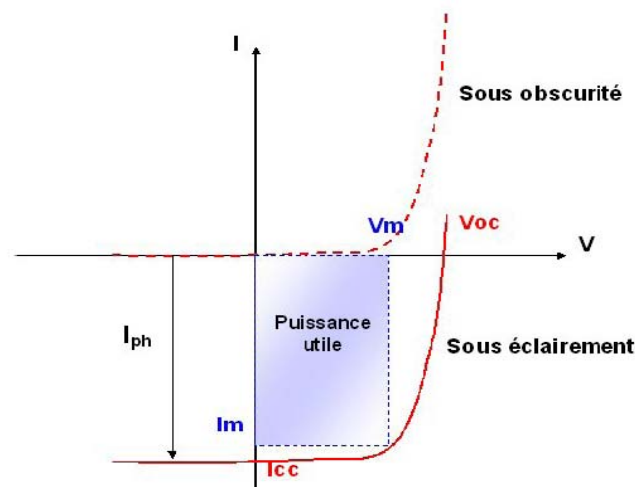


Figure II-7 : La caractéristique I-V d'une cellule solaire photovoltaïque.

## V- Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire :

A partir de la caractéristique courant tension d'une cellule photovoltaïque représentée dans la figure (II-7), on déduit les différents paramètres électriques qui nous permettent de calculer le rendement de la conversion, tel que :

- $I_{cc}$  : Le courant de court-circuit qui circule à travers la jonction sous illumination, obtenu pour une tension nulle ( $V=0$ ), approximé généralement par  $I_{ph}$ .
- $V_{co}$  : La tension de circuit ouvert représente la tension aux bornes de la cellule sans circuit de charge, obtenu pour un courant nul ( $I=0$ ), donné par la relation :

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} - 1\right) \quad (\text{II-8})$$

- $P_{max}$  : La puissance maximale délivrée par une cellule photovoltaïque sur la charge donné par :

$$P_{max} = I_m V_m$$

Avec :  $I_m$ ,  $V_m$  : Le courant et la tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

- FF : le facteur de forme, il détermine la qualité de la cellule, il indique aussi comment une jonction a été faite et l'acuité du genou dans une courbe I-V exprimée par [22] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (\text{II-9})$$

- $\eta$  : Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport entre la puissance électrique fournie et la puissance d'éclairement incident reçue par unité de surface de la cellule :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{incidente}} = \frac{FF I_{cc} V_{co}}{P_{incidente}} \quad (\text{II-10})$$

## VI- Effet de l'illumination sur la caractéristique I-V :

L'éclairement solaire varie, ce qui est inévitable le long d'une journée ensoleillée. La caractéristique courant tension d'une cellule photovoltaïque va être modifiée non dans sa forme mais pour les valeurs de  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$  et  $P_m$ . Le photocourant  $I_{ph}$  varie avec l'irradiance, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence [23] :

$$I_{ph} = \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) (I_{ph,ref} + \mu_{Isc} (T_c - T_{ref})) \quad (II-11)$$

Avec :  $G, G_{ref}$  : Irradiance effective et de référence ( $W/m^2$ ).

$T, T_{ref}$  : Température effective et de référence (K).

$\mu_{Isc}$  : Coefficient de température du photo courant (ou courant de court circuit)(A/K).

La figure (II-8) présente les caractéristiques courant tension d'une cellule monocristalline typique de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  pour différents éclairagements solaires. On remarque que la variation de  $I_{cc}$  avec l'éclairement n'est autre que celle de  $I_{ph}$ . D'autre part, l'augmentation de l'éclairement provoque un léger accroissement de la tension du circuit ouvert  $V_{co}$ . Par contre en élevant l'éclairement la puissance maximale délivrée par une cellule augmente.

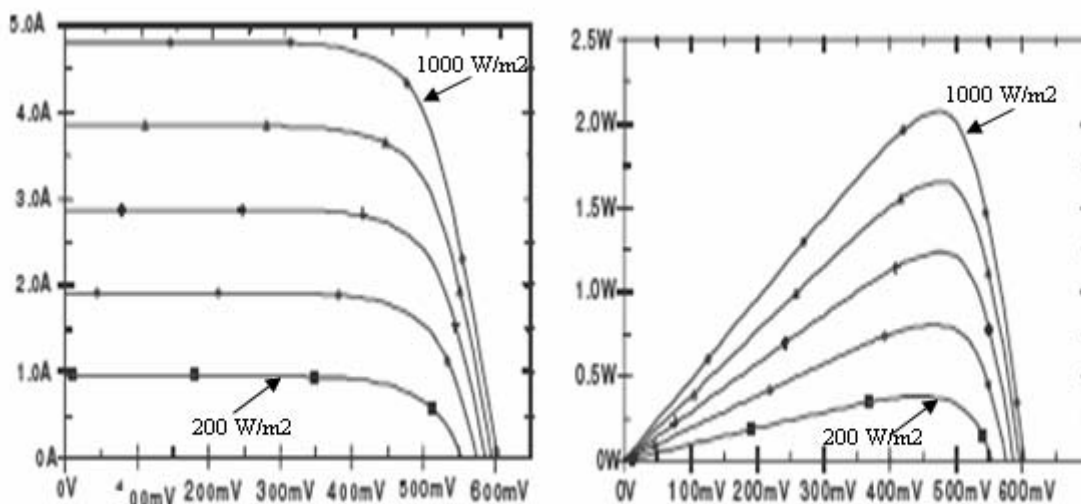


Figure II-8 : Influence des différents éclairagements de: (□)200 ; (+)400 ; (◇)600 ; (Δ)800 ; (○)1000  $W/m^2$  :

a) sur la caractéristique I-V

b) sur la courbe puissance-tension d'une cellule solaire [24].

## VII- Effet de la température sur la caractéristique I-V :

La température a un effet très important dans le comportement des cellules solaires. La figure (II-9) montre l'influence de la température sur les courbes : I-V et P-V. On observe une augmentation du photocourant, notamment à cause de la diminution de la largeur de la bande interdite qui explique une meilleure absorption de la lumière. Cette augmentation est de l'ordre de  $25 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \text{ K}$ , soit un accroissement de  $+0,1 \text{ \%/K}$ . En même temps, on assiste à une diminution nette de la tension de circuit ouvert, environ  $-2,2 \text{ mV/K}$ , soit une variation relative de  $-0,4\%/K$ . La puissance maximale  $P_{\text{max}}$  est fortement diminuée lorsque la température augmente ceci se traduit par une baisse relative de la puissance disponible de l'ordre de  $-0,35 \text{ \%/K}$  [24].

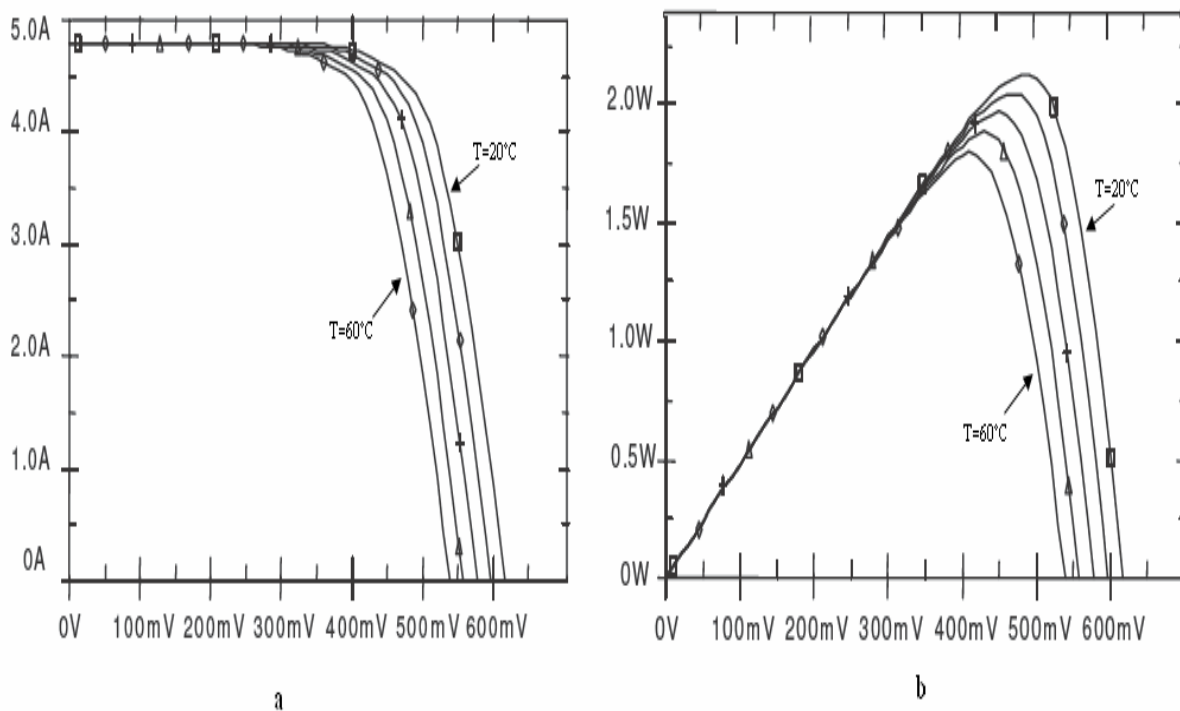


Figure II.9 : Influence de la température de : ( $\square$ ) 20 ; ( $+$ ) 30 ; ( $\diamond$ ) 40 ; ( $\Delta$ ) 50 ; ( $\circ$ ) 60 °C

a) sur la caractéristique I-V.

b) sur la puissance tension d'une cellule solaire [24].

### **VIII- Principaux facteurs limitant le rendement de conversion :**

La conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale, différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule photovoltaïque en pratique. En partant de l'équation (II-10), on peut citer les facteurs suivants :

#### ***VIII-1 l'absorption incomplète et excès d'énergie:***

L'absorption incomplète des photons est due à la longueur d'onde inférieure des photons à celle associées au gap du semi-conducteur, qui ne peuvent pas générer de paire électron-trou, et sont donc perdus. De plus l'énergie excédentaire des photons à celle du gap engendre une création d'une seule paire électron-trou, le reste de cette énergie est dissipé en chaleur. Et par conséquent est d'après la relation (II-8) la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  va décroître. Le rendement de la conversion de la cellule donc va diminuer.

#### ***VIII-2 la résistance série :***

La résistance série caractérise les pertes à travers la grille de contacte. Elle agit sur la pente de la caractéristique I-V dans la région de haute tension où la cellule photovoltaïque se comporte comme un générateur de tension.

D'après la figure II-10, on remarque que la valeur de la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  n'est pas modifiée, elle reste constante. Par contre le courant du court circuit  $I_{cc}$  diminue lorsque  $R_s$  est élevée. D'autre part la puissance fournie par la cellule photovoltaïque diminue d'une façon considérable figure (II-11), de même on observe la diminution du facteur de forme FF.

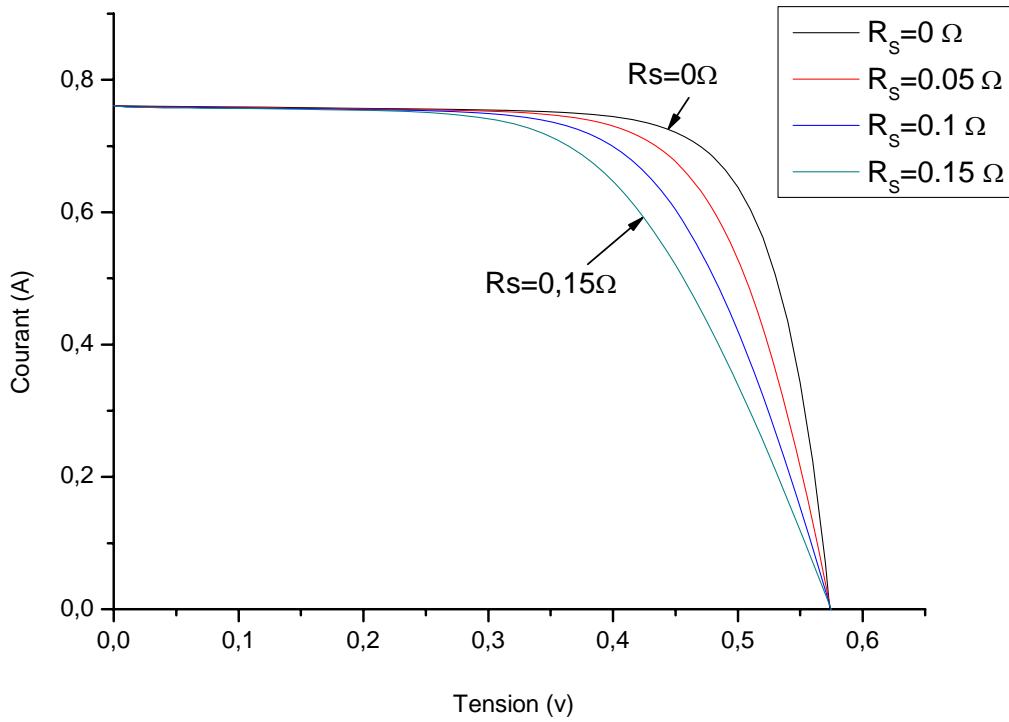


Figure II-10 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V d’une cellule éclairée.

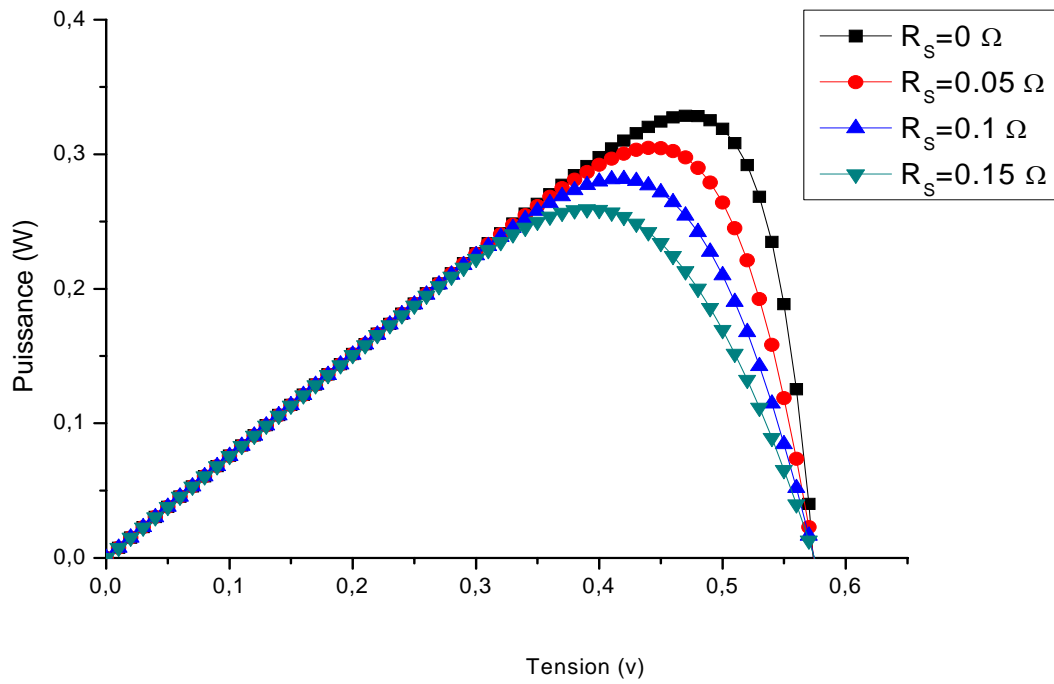


Figure II-11 : Influence de la résistance série sur la caractéristique P-V d’une cellule éclairée.



### VIII-2 la résistance parallèle :

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs de charge. Il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite.

La figure (II-12) présente l'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V de la cellule, on observe la déformation rapide de l'allure dans la région à basse tension, ou la cellule se comporte comme un générateur de courant. Les valeurs du courant de court circuit  $I_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  ne sont pas modifiées ; par contre la puissance fournit diminue très rapidement du faite que le facteur de forme FF n'est plus constant ce qui engendre un faible rendement.

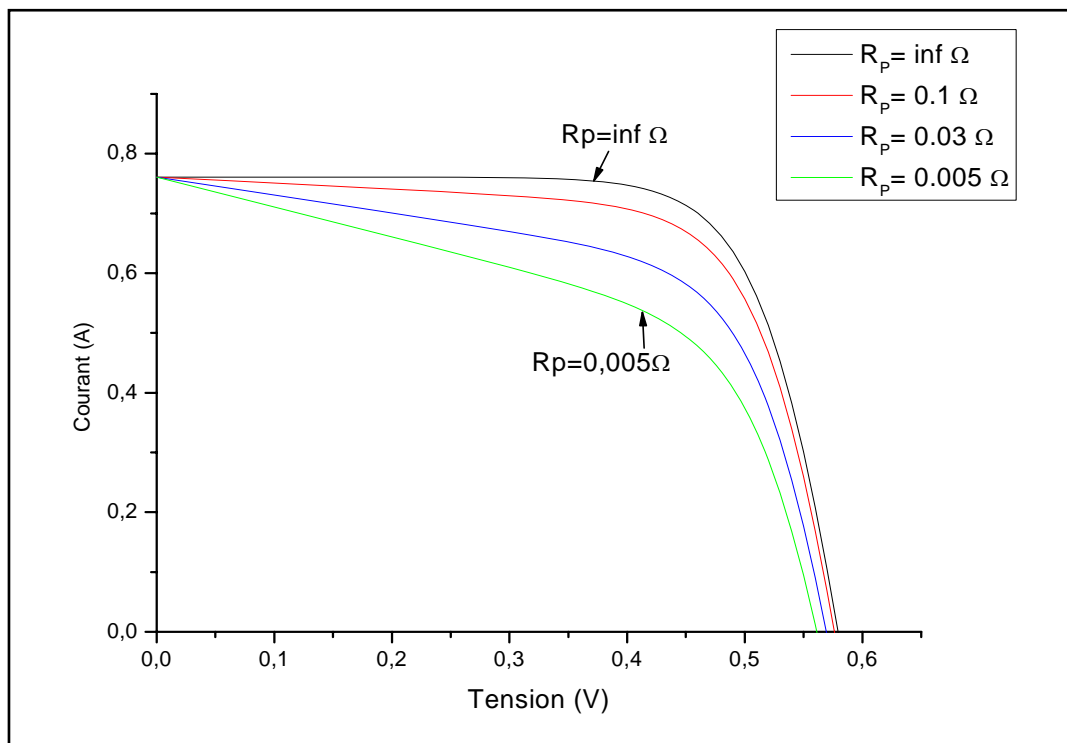


Figure II-11 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V d'une cellule éclairée.

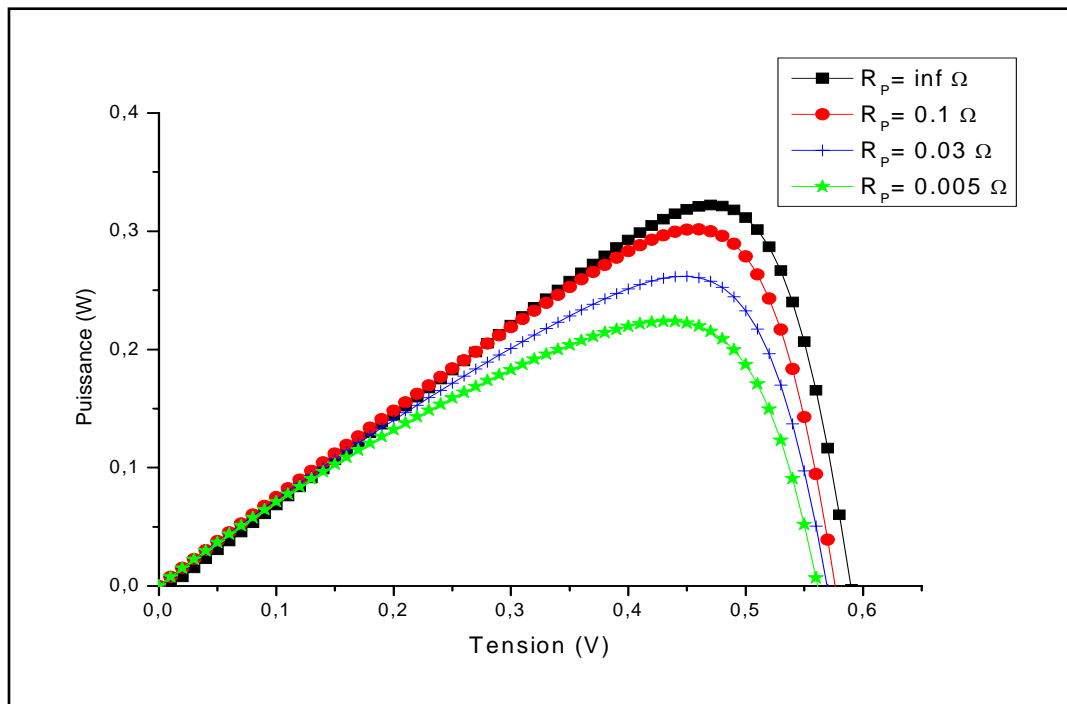


Figure II-11 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique P-V d'une cellule éclairée.

## IX- Modules photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque constitue un générateur de très faible puissance sous une faible tension (0,6-0,7V). Le module photovoltaïque (où panneau PV) (figure II-12) est réalisé alors par association en série ou en parallèle d'un grand nombre de cellules de caractéristique identique. La puissance crête d'un module photovoltaïque s'exprime en Watt-crête ( $W_C$ ) qui est la puissance fournie s'il est fermé sur sa charge optimale et soumis à un éclairement de  $800 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .



Figure II-12 : Module photovoltaïque.

**IX-1 Connexion en série :**

Dans un groupement en série, les cellules produisent le même courant dans toute la branche. On prendra soin de ne pas connecter en série que des cellules de caractéristique identique. La tension du panneau sera l'addition de toutes les tensions des cellules qui le compose. La caractéristique courant tension d'un groupement série sera homothétique de la courbe I (V) d'une cellule de base.

$$\begin{cases} V_{co_{tot}} = \sum_{i=1}^{i=N} V_i = N \cdot V_{co} \\ I_{cc_{tot}} = I_{cc} \end{cases} \quad (II-12)$$

Avec : N : Nombre de cellules en série.

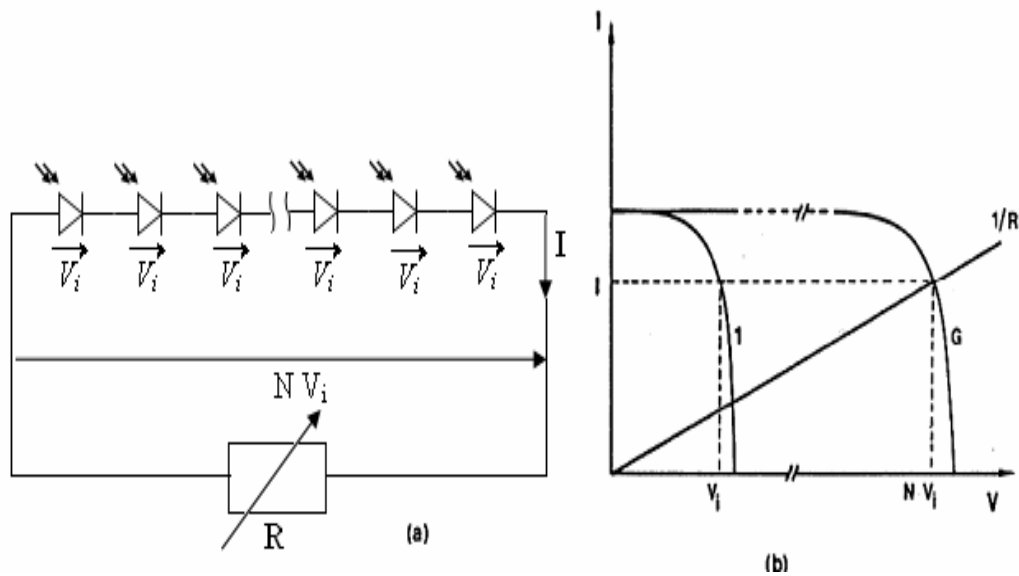


Figure II-12 : Connexion en série.

**IX-2 Connexion en parallèle :**

Pour un groupement en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension. Les courants dans ce cas s'ajoutent. La caractéristique du module ( figure II-13) est obtenue en multipliant point par point pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule élémentaire par  $N_p$ . Pour les résistances on additionne les inverses des résistances série et parallèle [7].

$$\begin{cases} V_{co_{tot}} = V_{co} \\ I_{cc_{tot}} = \sum_{i=1}^{i=N_p} I_i = N_p I_{cc} \end{cases} \quad (II-13)$$

Ou :  $N_p$  : Nombre de cellules en parallèle.

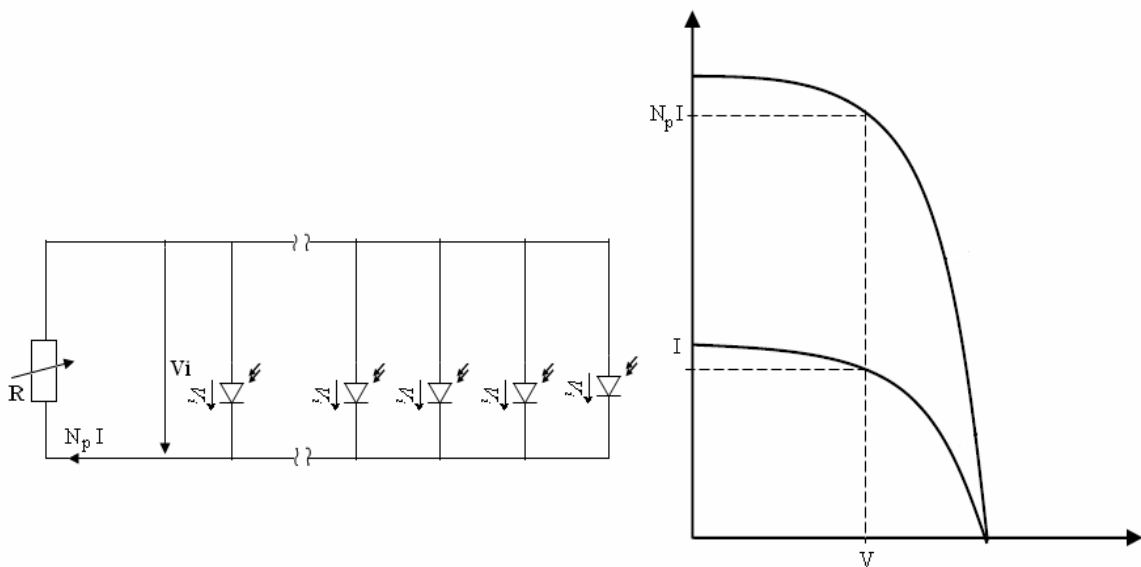


Figure II-13 : Connexion en parallèle.

**IX-3 Connexion mixte :**

Le groupement mixte ou hybride (figure II-13) est un assemblage de N branches de cellules photovoltaïques en parallèles, ou chaque branche est l'association de M cellules en séries . Les valeurs de la tension du circuit ouvert  $V_{pv}$  et le courant de court circuit  $I_{pv}$  délivré par ce panneau photovoltaïque sont en fonction des caractéristiques des cellules élémentaires ( $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ ), donné par :

$$\begin{cases} V_{pv} = M V_{co} \\ I_{pv} = N I_{cc} \end{cases} \quad (II-14)$$

La puissance fournie par le module est :

$$P_{pv} = M N V_{co} I_{cc} \quad (II-15)$$

Avec :  $V_{co}$ ,  $I_{cc}$  : tension de circuit ouvert et courant de court circuit de la cellule élémentaire.

$M$ ,  $N$  : nombre de cellules en séries et nombre de branches en parallèles.

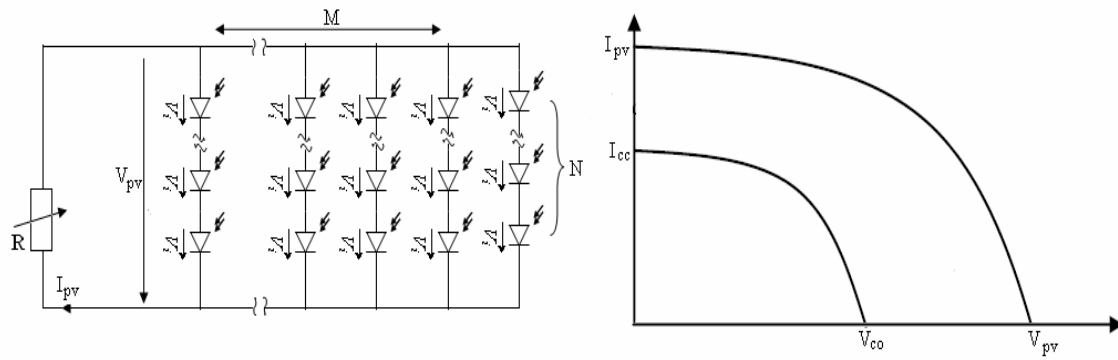


Figure II-14 : Connexion mixte.

### IX- Déséquilibres dans un module photovoltaïque :

Selon l'association en série et/ou parallèle des cellules, la caractéristique d'un panneau PV a une allure assimilable à celle d'une cellule élémentaire. Le déséquilibre dans un module photovoltaïque est dû dans la plus part des cas aux irradiation non uniforme. La figure (II-15) montre le fonctionnement d'une cellule solaire sous illumination pour différents domaines de tension à travers sa caractéristique électrique.

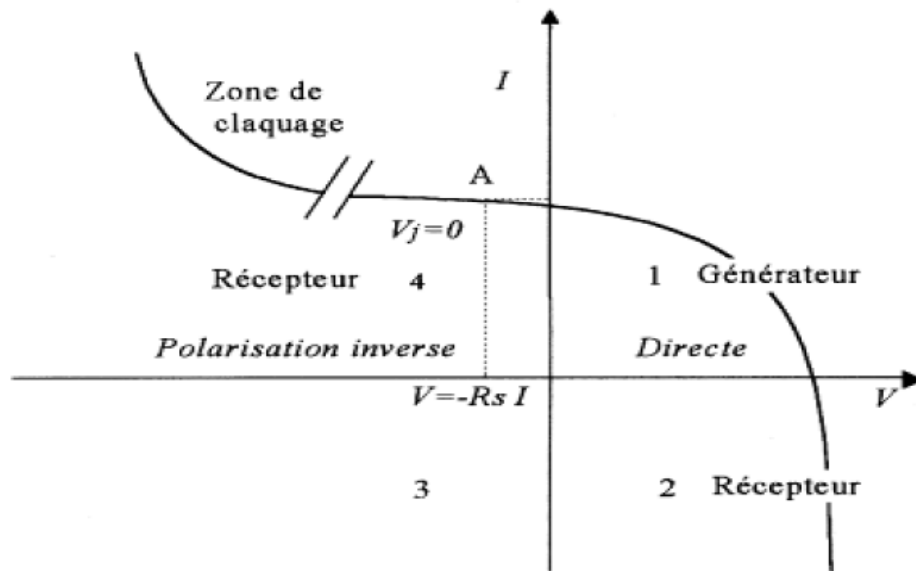


Figure II-15 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque pour différents domaine de tension.

Le 1<sup>er</sup> quadrant correspond à un fonctionnement en générateur avec :  $I_{cc} > I > 0$  et  $V_{co} > V > 0$ . par contre si  $V > V_{co}$  qui correspond au 2<sup>ème</sup> quadrant, ou bien  $I > I_{cc}$  qui coïncide avec le 4<sup>ème</sup> quadrant ; la cellule fonctionne dans ces deux cas comme récepteur.

**IX-1 Déséquilibre dans un branchement en série :**

Soit deux cellules photovoltaïques montées en série dont l'une moins performante que l'autre. Pour une charge dont l'impédance correspond à la droite L, la cellule 2 voit sa tension s'annulée: elle ne fonctionne ni en générateur ni en récepteur. Pour une charge dont l'impédance est plus faible, la cellule 2 devient réceptrice polarisée en inverse. Pour une charge nulle (court circuit), les tensions aux bornes des cellules sont identiques mais de polarités opposées, la cellule 1 fournit donc de la puissance à la cellule 2.

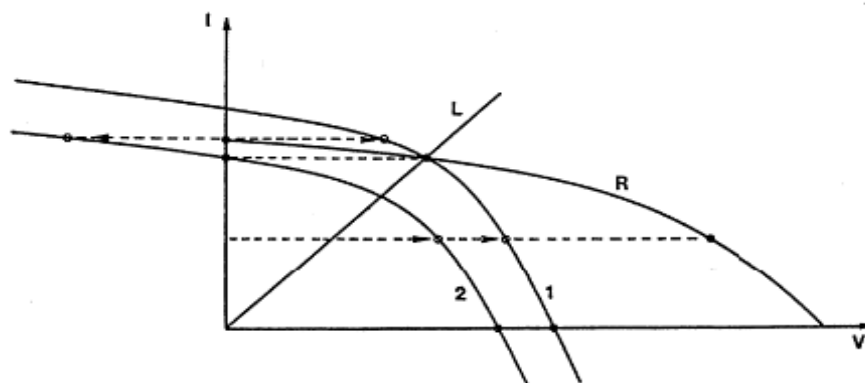


Figure II-16 : Connexion en série de deux cellules non identique.

Pour le cas de  $N_s$  cellules groupées en série. Si la charge est nulle (court circuit), la cellule partiellement occultée supportera une tension en polarisation inverse égale à  $(N_s-1) V$  où  $V$  est la polarisation directe des cellules non occultées. Dans ces conditions on notera que le courant de court circuit de l'ensemble est inférieur au courant de court circuit des cellules non occultées. En conclusion, dans un groupement série les déséquilibres sont d'autant plus critiques que la charge prend des valeurs faibles, le cas le plus critique correspond aux conditions de court circuit.

### IX-2 Déséquilibre dans un branchement parallèle :

La caractéristique résultante de deux cellules photovoltaïques montées en parallèle donné par la figure (II-17). Il faut additionner les deux courants, par contre la tension reste la même. Pour une charge correspondant à la droite  $L$ , la cellule 2 ne produit aucun courant. Pour une charge d'impédance plus élevée, la cellule 2 passe dans le quadrant 2, fonctionnant en récepteur en polarisation direct.

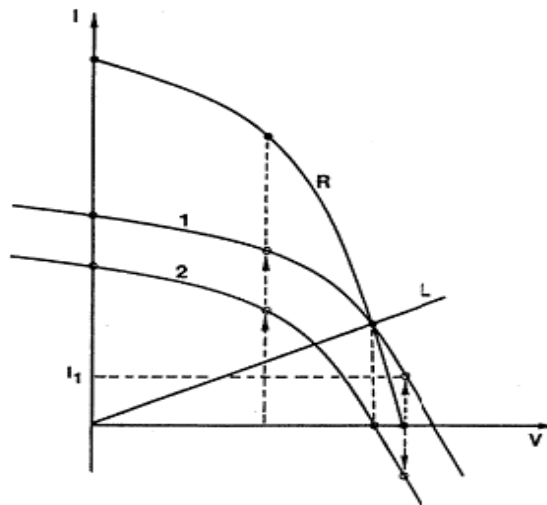


Figure II-17 : Connexion en parallèle de deux cellules non identique.

On peut extrapoler au cas de  $N_p$  cellules photovoltaïques en parallèle. Au delà d'une certaine valeur de l'impédance de charge, la cellule occultée passe en récepteur. En conditions de circuit ouvert, la cellule occultée doit pouvoir débiter un courant  $(N_p-1) I$  à la tension  $V_{co}$ . On remarque que la tension de circuit ouvert de l'ensemble est inférieure à la tension de circuit ouvert des cellules non occultées.

## X- Diode de protection :

Lors de la fabrication du panneau photovoltaïque ; nous devons assurer la protection électrique de l'installation afin d'augmenter la durée de vie en évitant des pannes dommageables liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement, en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement définis :

### X-1 Diode by-pass :

Ce type de protection est conseillé dans le groupement en série, car dans ce cas le courant qui traverse chaque cellule est le même que celui du module photovoltaïque. Quand une cellule du panneau est ombrée, cette partie sous-irradiée peut se trouver polariser en inverse et devenir réceptrice. La puissance dissipée ne peut être extraite, ce qui engendre un échauffement de la zone sous-irradiée. Cet échauffement local peut donner lieu à des point chauds " hot spot " qui peuvent endommager la zone affecté et dégradé définitivement les performances du module photovoltaïque entier. Pour éviter ces effets indésirables, des diodes by-pass sont associées aux cellules comme le montre la figure (II-18).

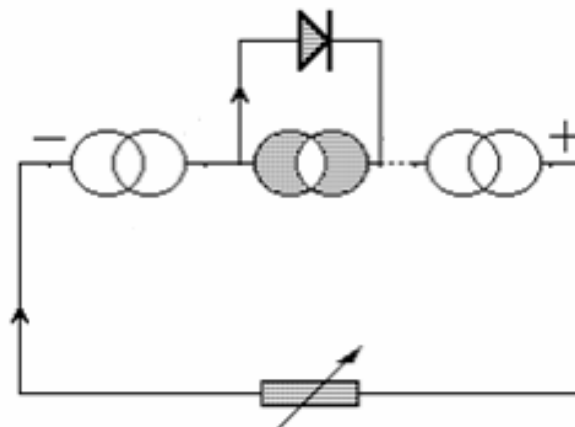


Figure II-18 : Protection par diode by-pass.



### X-2 Diode anti-retour :

Dans le cas de plusieurs cellules connectées en parallèle et pour éviter le risque que des cellules éclairées débitent leur énergie sur les/ou la cellule ombrée, ou que la batterie ne se décharge pas à travers le générateur. Il faut installer dans chaque branche une diode anti-retour ; la figure (II-19) le montre.

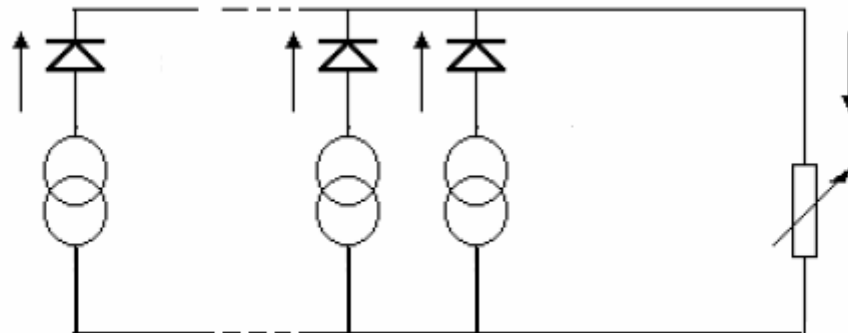


Figure II-19 : Protection par diode by-pass.

## XI- Différents types de cellules solaires :

A l'heure actuelle, plus de 99% des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base. Ce dernier se présente sous différentes formes, les plus répandues étant le silicium monocristallin, le silicium multicristallin et le silicium amorphe. Le silicium offre de nombreux avantages. Il présente une abondance dans la croûte terrestre (20%), et il n'est pas toxique. Les propriétés semi conductrices du silicium sont aisées à modifier en introduisant dans le réseau cristallin des impuretés.

### ➤ Cellules monocristallines :

Le silicium monocristallin est la base de ce type de cellule. Il est obtenu par des procédés industriels tels que la méthode de Czochralski ou la purification par fusion de zone. Le produit fini se présente sous forme de lingots qui sont ensuite sciés en plaquettes d'épaisseur souhaitée. Ces cellules de première génération présentent le meilleur rendement de la conversion photovoltaïque, à savoir de 15 à 20%. Cependant, leur prix de production est plus élevé.

➤ **Cellules multicristallines :**

Afin de réduire les coûts de production, le silicium multicristallin, moins cher que le monocristallin a été introduit dans l'industrie photovoltaïque à partir des années 1970. D'où les cellules polycristallines ont un prix moins élevé et un rendement qui varie entre 11 et 13%.

➤ **Cellules amorphes :**

Le silicium amorphe est un matériau obtenu de façon simple par dépôt en phase vapeur sur des substrats économiques tel que le verre, pour produire une couche très mince « couche mince ». Cette seconde génération est moins coûteuse que la première génération, car elle consomme moins de matériau semi-conducteur, et elle ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation du silicium. Le rendement de ce type de cellule est plus faible soit de l'ordre 8 à 10% seulement.

➤ **Cellules a base de AsGa et TiO<sub>2</sub> :**

Ce type de cellule est composé de semiconducteur arséniure de galium est caractérisé par un haut rendement (plus de 25%) mais leur fabrication est coûteuse. Leur utilisation se limite essentiellement aux applications spatiales. Le deuxième type composé d'une poudre de dioxyde de titane associé à un électrolyte et à un colorant qui absorbe la lumière, inventé par le professeur Grätzel (de l'école polytechnique fédérale de Lausanne), reste marginalisé.

➤ **Les cellules hétérojonctions :**

Il s'agit d'une superposition de multiple couches de natures différentes «utilisant des bandes d'énergie différentes» qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire, et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion 30%. Ainsi, la nature de la couche supérieure est telle qu'elle nécessite des photons de grande énergie pour fournir du courant, si le photon n'a pas l'énergie suffisante, il passe à la couche suivante et ainsi de suite. Donc les photons de faible énergie ne sont pas rejetés comme ils pouvaient l'être avec une cellule monojonction.

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons étudié les principes de fonctionnement des cellules solaires, leurs caractéristiques courant-tension, leurs paramètres caractéristiques et les différents facteurs limitant leur rendement. Puis on a présenté un aperçu sur les modules photovoltaïques et on a terminé par l'exposition des différents types de cellules solaires.

***Chapitre III :***  
***Extraction des Paramètres des Cellules Solaires***

## Introduction :

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire joue un rôle primordial, dont l'analyse permet d'obtenir des informations sur leurs performances. Le fonctionnement d'une cellule solaire est influencé par des grandeurs qui sont : le courant de court circuit  $I_{cc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  et le facteur de forme FF. Or ces grandeurs dépendent fortement des paramètres caractéristiques d'une cellule solaire à savoir : le photocourant  $I_{ph}$ , le courant de saturation  $I_s$ , le facteur d'idéalité  $n$ , et les résistances série et parallèle  $R_s, R_p$ .

L'extraction des paramètres caractéristiques d'une cellule solaire est une tâche très importante sur le plan de conception, ou bien en vue d'une simulation pour prédire le comportement qui se rapproche de la réalité à partir de la caractéristique courant-tension expérimentale à l'obscurité [25], ou sous éclaircissement [26-27]. Dans la littérature plusieurs méthodes ont été proposées pour l'extraction des paramètres cités ci-dessous. Elles peuvent être réparties comme suite [28] :

- Méthodes utilisant des fonctions auxiliaires.
- Méthodes utilisant la conductance.
- Méthodes utilisant l'intégrale du courant.
- Méthodes utilisant les algorithmes d'optimisation.

## I- Méthode de simulation de la caractéristique courant-tension :

En se basant sur les méthodes numériques [29] ; il est facile de simuler la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire en considérant les valeurs théoriques de  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$ ,  $G_{sh}$ . Cela est obtenu à partir de la résolution d'une équation non linéaire  $f(I,V)=0$  qui se présente sous la forme:

$$f(I,V) = I - I_{ph} + I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] + G_{sh}(V + IR_s) = 0 \quad (\text{III-1})$$

La méthode utilisée pour notre étude est la méthode de Newton-Raphson dont l'algorithme est [30] :

- a) Soit un critère d'arrêt  $\epsilon$ .
- b) Soit le nombre maximal d'itération  $N$ .
- c) Teste à effectuer :  $I_{n+1} = I_n - \frac{f(I,V)}{\frac{\partial f(I,V)}{\partial I}}$

$$d) \text{ Si } \frac{|I_{n+1} - I_1|}{|I_{n+1}|} < \varepsilon$$

- Convergence atteinte.
- Ecrire la solution  $I_{n+1}$ .
- Arrêt.

e) Si le nombre maximal d'itération  $N$  est atteint et la convergence non atteinte.

f) Retour à l'étape (d).

## II- Méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires sous illumination :

### II-1 Méthodes appliquées au modèle à une seule exponentielle :

Dans cette partie nous allons présenter les méthodes utilisées pour le modèle à une exponentielle qui est défini par (III-2), et cela pour extraire les paramètres caractéristiques d'une cellule solaire  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $G_{sh}$ .

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - G_{sh}(V + IR_s) \quad (III-2)$$

#### II-1-1 Méthode d'optimisation verticale :

Cette méthode a été proposée par *Farhat-Hamida et al* [31]. Elle a pour but de minimiser la somme des erreurs relatives quadratiques entre l'ensemble de  $N$  valeurs mesurées « expérimentales »  $I_i^{ex}$  et l'ensemble de  $N$  valeurs calculées « théoriques »  $I_i^{th}$  par (III-2). La fonction à minimiser est :

$$S = \sum_{i=1}^{i=N} \left( \frac{I_i^{ex} - I_i^{th}}{I_i^{th}} \right)^2 \quad (III-3)$$

Donc pour avoir un minimum il est nécessaire que le gradient de la fonction  $S$  par rapport aux paramètres ( $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $G_{sh}$ ) soit nul. Ceci est traduit par :

$$\overrightarrow{\text{grad}} S = \begin{cases} \frac{\partial S}{\partial I_s} = -2 \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\partial I_i^{th}}{\partial I_s} \frac{I_i^{ex}}{(I_i^{th})^2} \left( \frac{I_i^{ex} - I_i^{th}}{I_i^{th}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = -2 \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\partial I_i^{th}}{\partial n} \frac{I_i^{ex}}{(I_i^{th})^2} \left( \frac{I_i^{ex} - I_i^{th}}{I_i^{th}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial R_s} = -2 \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\partial I_i^{th}}{\partial R_s} \frac{I_i^{ex}}{(I_i^{th})^2} \left( \frac{I_i^{ex} - I_i^{th}}{I_i^{th}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial G_{sh}} = -2 \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\partial I_i^{th}}{\partial G_{sh}} \frac{I_i^{ex}}{(I_i^{th})^2} \left( \frac{I_i^{ex} - I_i^{th}}{I_i^{th}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial I_{ph}} = -2 \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\partial I_i^{th}}{\partial I_{ph}} \frac{I_i^{ex}}{(I_i^{th})^2} \left( \frac{I_i^{ex} - I_i^{th}}{I_i^{th}} \right) = 0 \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

La résolution du système d'équation non linéaire (III-4) par la méthode de Newton-Raphson permet de déterminer la solution. Cette méthode a été appliquée à des cellules solaires sous éclairage et à des diodes Schottky à base du 4H-SiC [32].

### II-1-2 Méthode Bouzidi et al :

La méthode extractive de *Bouzidi & al* est basée sur la caractéristique courant-tension sous éclairage d'une cellule solaire pour l'évaluation des paramètres caractéristiques [33]. Elle est considérée comme une prolongation de la méthode de *Gromov* [34] qui été modifié pour tenir en compte le cas des cellules solaires éclairées.

Cette méthode inclut la présentation  $I=f(V)$  de la fonction standard (III-2) en tant que  $V=f(I)$  et la détermination des facteurs  $C_0$ ,  $C_1$  et  $C_2$  de cette fonction qui permet le calcul des paramètres de la cellule solaire éclairée.

Partant de l'équation (III-2) que l'on peut écrire sous la forme :

$$I = \frac{I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{\beta(V + IR_s)}{n}\right) - 1 \right] - G_{sh} V}{1 + G_{sh} R_s} \quad (\text{III-5})$$

Où :  $\beta = \frac{q}{kT}$

L'équation précédente peut aussi être écrite sous la forme:

$$I = I_{pA} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{\beta(V + IR_s)}{n}\right) - 1 \right] - G_A V \quad (\text{III-6})$$

Avec :

$$\begin{cases} I_{pA} = \frac{I_{ph}}{1 + G_{sh}R_s} \\ I_0 = \frac{I_s}{1 + G_{sh}R_s} \\ G_A = \frac{G_{sh}}{1 + G_{sh}R_s} \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

Pour les tensions de polarisation basses et négatives où le comportement de la courbe  $I=f(V)$  est linéaire, la partie exponentielle est négligeable et l'équation (III-6) peut être écrite sous la forme :

$$I = I_{pA} - G_A V \quad (\text{III-8})$$

$G_A$  et  $I_{pA}$  sont évalués donc à partir de (III-8) par une simple régression linéaire.

La valeur calculée de  $G_A$  donne le produit ( $G_A V$ ) qui peut être ajouté au courant mesuré.

On obtient le courant corrigé à travers la cellule solaire qui est donné par :

$$I_c = I + G_A V \quad (\text{III-9})$$

Pour des tensions directes assez grandes ( $V + IR_s \gg kT$ ) où le comportement de la courbe  $I=f(V)$  est exponentiel ; à travers la cellule le courant est donné par :

$$I_c = I_{pA} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{\beta(V + IR_s)}{n}\right) \right] \quad (\text{III-10})$$

Pour évaluer la résistance série  $R_s$ , le facteur de qualité  $n$  et le courant de saturation  $I_s$ , on utilise  $I$  au lieu de  $V$  comme une variable indépendante dans l'équation (III-11), et nous obtenons :

$$V = \frac{n}{\beta} \ln\left(\frac{I_{pA}}{I_0}\right) - R_s I + \frac{n}{\beta} \ln\left(1 - \frac{I_c}{I_{pA}}\right) \quad (\text{III-11})$$

L'expression précédente (III-11) peut être présentée sous la forme :

$$F(I) = C_0 + C_1 I + C_2 \ln\left(1 - \frac{I_c}{I_{pA}}\right) \quad (\text{III-12})$$

Où :

$$\begin{cases} C_0 = \frac{n}{\beta} \ln\left(\frac{I_{pA}}{I_0}\right) \\ C_1 = -R_s \\ C_2 = \frac{n}{\beta} \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

Les valeurs des facteurs  $C_0$ ,  $C_1$  et  $C_2$  peuvent être obtenues à partir de la caractéristique expérimentale  $I$ - $V$  de la cellule en utilisant la méthode des moindres carrés. Ceci est obtenu en résolvant le système des équations suivantes :

$$\begin{cases} C_1 \sum_{i=1}^N I_i^2 + C_2 \sum_{i=1}^N I_i \ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right) + C_0 \sum_{i=1}^N I_i = \sum_{i=1}^N I_i V_i \\ C_1 \sum_{i=1}^N I_i + C_2 \sum_{i=1}^N \ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right) + C_0 N = \sum_{i=1}^N V_i \\ C_1 \sum_{i=1}^N I_i \ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right) + C_2 \sum_{i=1}^N \left(\ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right)\right)^2 + C_0 \sum_{i=1}^N \ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right) = \sum_{i=1}^N V_i \ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right) \end{cases} \quad (\text{III.14})$$



Le système donné peut être facilement résolu en utilisant la règle de *Karmer*.  $N$  est le nombre de données expérimentales,  $(I_i, V_i)$  sont les valeurs mesurées du courant-tension au  $i^{\text{ème}}$  point.  $I_{ci}$  est la valeur du courant corrigé correspondant à  $I_i$ .

Les valeurs de la résistance série, du facteur de qualité et du courant  $I_0$  sont déterminées à partir des équations suivantes :

$$\begin{cases} R_s = -C_1 \\ n = \beta C_2 \\ I_0 = I_{pA} \exp\left(-\frac{C_0}{C_2}\right) \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

Remplaçant les valeurs obtenues de  $R_s$  et de  $I_0$  dans (III-13), les valeurs  $G_{sh}$ ,  $I_{ph}$  et  $I_s$  sont extraient à partir de :

$$\begin{cases} G_{sh} = \frac{G_A}{1 - G_A R_s} \\ I_{ph} = \frac{I_{pA}}{1 - G_A R_s} \\ I_s = \frac{I_0}{1 - G_A R_s} \end{cases} \quad (\text{III-16})$$

## II-2 Méthode appliquée au modèle à deux exponentielles :

Cette partie est consacrée à la présentation des méthodes qui utilisent le modèle à deux exponentielles décrit par l'équation (III-17). Afin d'extraire les paramètres caractéristiques associés à ce modèle, a savoir :  $I_{ph}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $R_s$  et  $G_{sh}$ .

$$I(V) = I_{ph} - I_{s1} \left[ \exp\left(\frac{V - IR_s}{n_1 kT}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp\left(\frac{V - IR_s}{n_2 kT}\right) - 1 \right] - \frac{V - IR_s}{R_p} \quad (\text{III-17})$$

### II-2-1 Méthode de Kaminski et al :

Cette méthode a été proposée par Kaminski et al [35] pour extraire les différents paramètres d'une cellule solaire à l'obscurité dont la caractéristique courant-tension étant donnée par :

$$I = I_{s1}[\exp(\alpha_1(V - IR_s)) - 1] - I_{s2}[\exp(\alpha_2(V - IR_s)) - 1] + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{III-18})$$

Avec :  $\alpha_i = \frac{q}{n_i kT}$  ;  $n_i$  : facteur d'idéalité ;  $I_{si}$  : courant de saturation ;

$R_s$  : résistance série ;  $R_p$  : résistance shunt.

En se basant sur la caractéristique expérimentale I-V, la courbe (Figure (III-1)) est divisée en deux régions pour extraire les paramètres [36].

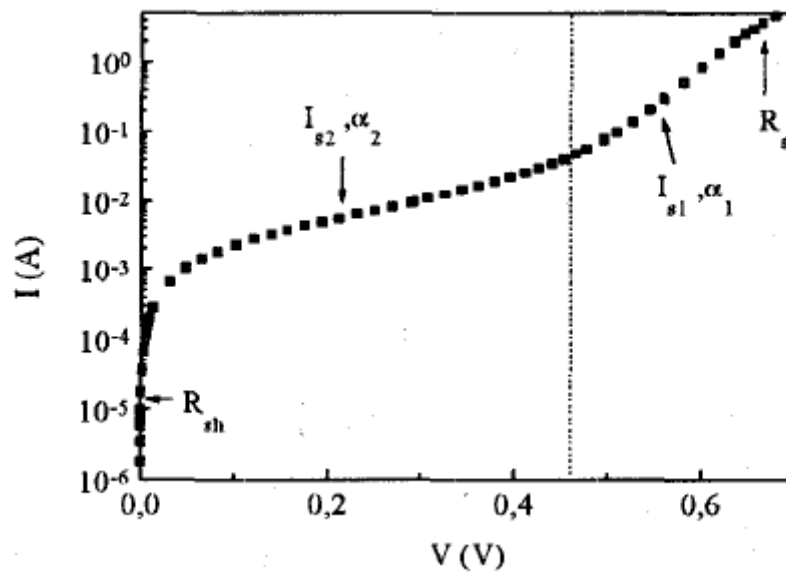


Figure III-1 : Courbe de la caractéristique I-V à l'obscurité avec régions différentes [36].

➤ La première étape considère la région où la tension est supérieure à 0,46V, la courbe peut être décrite par la relation :

$$I = I_{s1}[\exp(\alpha_1(V - IR_s)) - 1] \quad (\text{III-19})$$

Pour  $I \gg I_{s1}$ , l'équation (III-19) peut être approximer par :

$$I = I_{s1} [\exp(\alpha_1(V - IR_s))] \quad (\text{III-20})$$

qui peut être écrite :

$$\ln(I) = \ln(I_{s1}) + \alpha_1(V - IR_s) \quad (\text{III-21})$$

Pour un point quelconque  $(I_0, V_0)$  de la courbe I-V on a :

$$\ln(I_0) = \ln(I_{s1}) + \alpha_1(V_0 - I_0 R_s) \quad (\text{III-22})$$

Par soustraction des équations (III-21) et (III-22) on trouve :

$$\ln(I) - \ln(I_0) = \alpha_1(V - IR_s) - \alpha_1(V_0 - I_0 R_s) \quad (\text{III-23})$$

Ou :

$$\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{I - I_0} = -\alpha_1 R_s + \alpha_1 \frac{V - V_0}{I - I_0} \quad (\text{III-24})$$

En posant :

$$X = \frac{V - V_0}{I - I_0} \quad \text{et} \quad Y = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{I - I_0}$$

On obtient :

$$Y = \alpha_1(X - R_s) \quad (\text{III-25})$$

La régression linéaire de l'équation (III-25) donne les paramètres  $\alpha_1$ ,  $R_s$ , puis  $I_{s1}$  est extraite à partir d'une régression linéaire de l'équation (III-21).

➤ La seconde étape a pour but d'extraire les autres paramètres à savoir  $\alpha_2$ ,  $I_{s2}$  et  $R_{sh}$  respectivement en considérant la région où la tension est inférieure à 0.46V. La courbe est décrite maintenant par :

$$I = I_{s2}[\exp(\alpha_1(V - IR_s)) - 1] + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{III-26})$$

En considérant les valeurs calculées dans la première partie, le courant aux bornes de la cellule est corrigé comme suite :

$$I_c = I - I_{s1} = I - I_{s1}[\exp(\alpha_1 V_c)] \quad (\text{III-27})$$

Avec :  $V_c = V - IR_s$

On aura donc :

$$I_c = I_{s2}[\exp(\alpha_2 V_c) - 1] \quad (\text{III-28})$$

La régression linéaire de la courbe  $\ln(I_c)$  en fonction de  $V_c$  nous permet d'extraire les paramètres  $\alpha_2$ ,  $I_{s2}$ .

Enfin la résistance shunt est calculée par la relation suivante :

$$R_{sh} = \left[ \left( \frac{dI}{dV} \right)_{V \rightarrow 0} - \alpha_1 I_{s1} - \alpha_2 I_{s2} \right]^{-1} \quad (\text{III-29})$$

### **II-3 Méthode proposée :**

Dans cette partie nous allons proposer une méthode extractive simple basée sur l'optimisation, et de l'appliquer à une cellule solaire en utilisant le modèle à deux exponentielles. L'approche retenue est l'optimisation par essais particuliers OEP « en anglais Particle Swarm Optimization PSO », qui est l'une des méthodes métaheuristiques ou leurs algorithmes stochastiques itératifs progressent vers un optimum. Le PSO a vu son apparition en 1995 aux Etats-Unis, par James Kennedy et Russel Eberhart [37], qui l'ont inspirée du comportement social des animaux évoluant en essaim, plus particulièrement celle des oiseaux. Dans un algorithme de PSO, la population (le vol des oiseaux) est appelée

l'essaim, tandis que les individus (chaque oiseau) est appelé particule. En effet il est étonnant de voir comment ces animaux se déplacent en groupe dans une seule direction, se divisent parfois puis reforment un groupe, tous ça géré par des règles très simples : restés proche entre eux, allés dans la même direction, et avoir la même vitesse.

### **II-3-1 Description informelle :**

Cette méthode d'optimisation se base sur la collaboration des particules, où chaque particule présente une solution potentielle dans l'espace de recherche. Un individu de l'essaim n'a pour connaissance que la position et la vitesse des ses plus proches voisins en plus de la sienne. Chaque particule utilise donc non seulement, sa propre mémoire, mais aussi l'information locale sur ses plus proches voisins pour décider de son propre déplacement. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes :

- Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par le quel elle est déjà passée.
- Une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ces congénères et ainsi à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

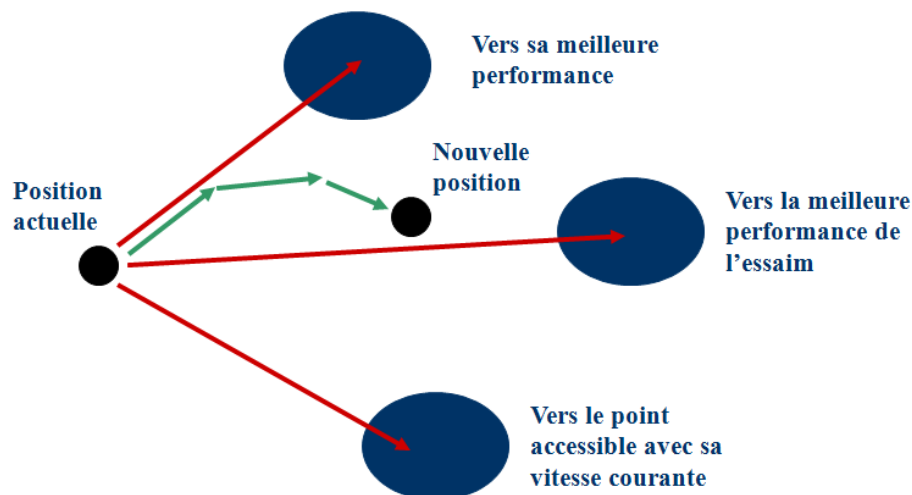


Figure III-2 : Schéma de principe du déplacement d'une particule.

La combinaison de ces trois composantes nous donne l'équation du mouvement suivant :

$$V_{k+1} = \omega V_k + \varphi_1 (P_i - X_k) + \varphi_2 (P_g - X_k) \quad (\text{III-30})$$

$$X_k = X_k + V_{k+1} \quad (\text{III-31})$$

Avec :

$V_k$  : vitesse actuelle de la particule.

$P_i$  : la meilleure position de la particule.

$P_g$  : la meilleure position atteinte par toutes les particules de l'essaim.

$X_k$  : la position actuelle de la particule.

$\omega$ : facteur d'inertie.

$\varphi_1, \varphi_2$  : coefficients d'accélération choisie aléatoirement par la fonction Random.

### **II-3-2 Fonction objectif :**

Dans le cadre d'extraction des paramètres caractéristiques, l'objectif est de minimiser l'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé. En pratique, l'objectif est de trouver seulement une bonne solution, et la garantir au bout d'un temps de calcul raisonnable. C'est ainsi que la fonction d'évaluation est une fonction qui attribue à toutes les solutions de l'espace de recherche [38].

Dans notre cas on définit cette fonction comme:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \left( \frac{I_{Cal} - I_{Mes}}{I_{Mes}} \right)^2}$$

### **II-3-3 Initialisation des paramètres :**

Lors de l'évolution de l'essaim, il peut arriver que le déplacement d'une particule la conduise à sortir de l'espace de recherche, qui conduit à une divergence du système. Pour éviter qu'une particule ne sorte pas de cet espace, on introduit la notion du confinement d'intervalle, qui consiste à savoir la plage des valeurs de chaque paramètre à optimiser et aussi fixer une vitesse maximale  $V_{max}$  pour chaque particule qui va permettre de contrôler l'explosion du système [39]. Si à un instant (t), la vitesse de la particule  $P_i$  est  $V_i(t)$ , calculée

selon l'équation de mouvement (III-30), sort de l'intervalle  $[-V_{\max}, V_{\max}]$  on lui attribue en fait la valeur du point frontière le plus proche[40].

#### **II-3-4 Facteur d'inertie :**

Le facteur d'inertie est utilisé pour contrôler l'influence de la vitesse obtenu au pas précédent de la particule, il a été introduit par Shi et Eberhart[41]. De nombreux tests ont également été effectués pour trouver la valeur optimale de  $\omega$  [42]. L'une des meilleures techniques trouvée consiste en une fonction linéaire diminuant la valeur de  $\omega$  après chaque itération de 0.9 à 0.4 sur le nombre maximale d'itérations à effectuer par l'algorithme de PSO. Au début d'une optimisation, les particules feront de grands déplacements. Ceci permettra d'explorer une grande partie de l'espace de recherche. Puis, à mesure que le nombre d'itérations augmente, la grandeur des déplacements des particules diminuera, permettant ainsi de raffiner la recherche. Les valeurs attribuées à  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont comprises entre 0 et 2 d'une façon aléatoire pour chaque mise à jour de chaque vitesse [37].

#### **II-3-5 Description Algorithmique :**

L'algorithme PSO est généralement introduit en formulant son développement conceptuel. La particule est aléatoirement choisie (initialisée) à l'aide de son intervalle qui nous donne les valeurs de départ de la recherche. L'initialisation de la première particule avec de telles valeurs permet d'obtenir, dès la première itération, une valeur de convenance de base. Cette valeur peut servir de référence pour la comparaison et l'estimation de la performance en optimisation obtenue à l'aide de PSO. Chaque particule connaît son emplacement ( $x_i$ ), sa vitesse de déplacement ( $v_i$ ), la position ou elle a obtenu sa meilleure qualité ( $p_i$ ) ainsi que la position de la meilleure qualité obtenue par l'ensemble des particules ( $p_g$ ) et ce, à chaque itération ( $t$ ) de l'algorithme PSO.

La description des étapes de l'algorithme PSO est donnée comme suit [42] :

➤ Etape 0 :

Initialisation des paramètres, et définir le critère d'arrêt. D'une manière générale le critère d'arrêt correspond à un nombre d'itérations prédéfinies. Ou également spécifier un critère

d'arrêt en fonction de la meilleure valeur de la qualité  $G(p_g)$  « dans notre cas c'est la fonction objectif » obtenu par l'ensemble de particules.

➤ Etape 1 :

Calcul de la qualité  $G(x_i)$  de la particule  $i$  en fonction de son vecteur position  $(x_i)$

➤ Etape 2 :

Etablir si la qualité  $G(x_i)$  obtenue pour la particule  $i$  est supérieure à la meilleure qualité de cette particule obtenue antérieurement. Si  $G(x_i) > G(p_i)$ , la présente position de la particule  $x_i$  est sauvegarder comme étant la meilleure position  $p_i$  obtenue à ce jour par la particule  $i$ .

➤ Etape 3 :

Etablir si la qualité  $G(p_i)$  obtenue par la particule  $i$  est plus grande que la meilleure qualité  $G(p_g)$  obtenu pour l'ensemble de la population. Si tel est le cas, l'indice de la particule ayant obtenu la meilleure qualité  $g$  prend la valeur  $i$ .

➤ Etape 4 :

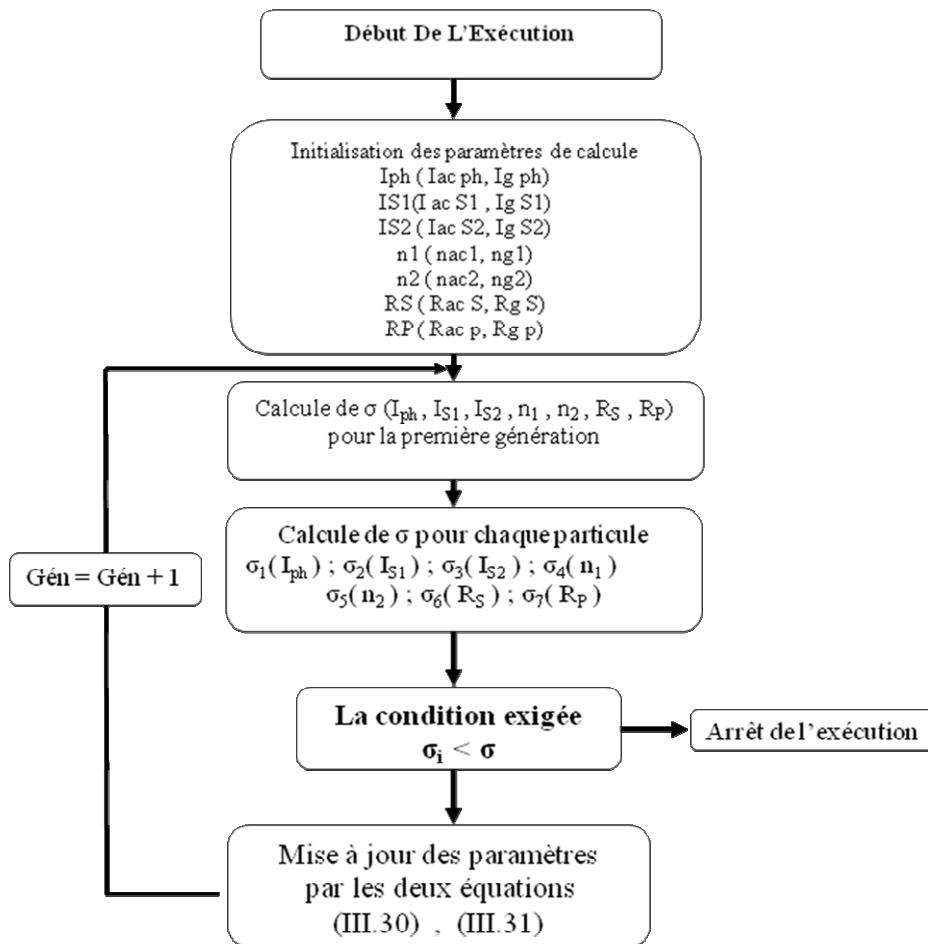
Mettre à jour la vitesse de déplacement  $v_i(t)$  de la particule  $i$  par l'équation (III-30). Une fois cette vitesse est mise à jour, il faut vérifier qu'elle est contenue dans les limites autorisées  $[-V_{max}, V_{max}]$ . Si tel n'est pas le cas, la nouvelle vitesse est réduite à la borne la plus proche.

➤ Etape 5 :

Mettre à jour la position  $x_i(t)$  de la particule  $i$  donnée par l'équation (III-31). Une fois la position est mise à jour, il faut vérifier aussi que la nouvelle position est contenue dans l'espace de recherche spécifié par  $[x_{min}, x_{max}]$ . Si la condition n'est pas vérifiée, la nouvelle position est ramenée à la borne la plus proche de l'intervalle de recherche.



Un algorithme récapitulatif de PSO peut être décrit comme suit :



### II-3-6 Application de la méthode :

Cette méthode a été appliquée afin d'extraire les paramètres caractéristique d'une cellule solaire ( $I_{ph}$ ,  $I_{S1}$ ,  $I_{S2}$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ) pour le modèle à deux exponentielles à différentes cellules solaires sous éclairage et à l'obscurité, ainsi pour le cas du modèle à une seule exponentielle, après avoir établie des programmes de calcul numérique sous l'environnement Matlab 10.0 permettant d'extraire ces paramètres.

Ces structures sont comme suit :

- Une cellule solaire commerciale au silicium à une température de 25°C. (Cell25)
- Une cellule solaire commerciale au silicium à une température de 33°C. (Cell33A)
- Un module solaire dans le quel 36 cellules polycristallin sont connectées en série à une température de 25°C. (Modul25)
- Une cellule solaire de 100 cm<sup>2</sup> à 33°C. (Obs33) [36].
- Une cellule solaire à une température de 33°C. (Cell 33B) [33].

**II-3-6 Résultats et discussion :**

Les différents paramètres extraits par cette méthode sont présentés dans les tableaux (III-1), (III-2) et (III-3). On observe que les valeurs des paramètres caractéristiques coïncident avec celle trouver dans la littérature [36,43]. Les mécanismes de transport sont exprimés par le facteur d'idéalité et le courant de saturation. La première diode exprime le processus de diffusion pour un facteur d'idéalité  $n_1= 1$  ; la seconde diode exprime le mécanisme de recombinaison où le facteur d'idéalité  $n_2$  calculé théoriquement est  $n_2= 2$ . Or d'après le tableau III-2 et III-3 cette accord est très remarquable.

Tableau III-1 : Paramètres caractéristiques des cellules et de module sous éclairnement.

Paramètres	Cell25	Cell33A	Modul25
$I_{ph}$ (A)	0.7700	3.1740	1.0389
$I_{s1}$ (A)	1.0055e-008	9.9395e-007	1.0483e-007
$I_{s2}$ (A)	1.5516e-004	1.0115e-006	1.0687e-004
$n_1$	1.2892	1.5109	42.2948
$n_2$	2.7950	3.1252	77.8755
$R_s$ ( $\Omega$ )	0.0060	0.0615	1.1429
$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	79	73	1.1010e+003
RMSE ( $\sigma$ %)	0.3812	0.6532	0.1098

Tableau III-2 : Paramètres caractéristiques de la cellule sous obscurité.

Paramètres	Méthode proposée	Réf [36]
$I_{s1}$ (A)	1.8501e-008	1.86e-008
$I_{s2}$ (A)	1.5311e-004	1.6e-004
$n_1$	1.2896	1.3
$n_2$	3.4282	3.5
$R_s$ ( $\Omega$ )	0.0055	0.0057
$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	79.9041	80

Tableau III-3 : Paramètres caractéristiques de la cellule sous éclaircissement (Cell33B).

Paramètres	Méthode proposée	Réf [33]
$I_{ph}$ (A)	0.7394	0.7607
$I_s$ (A)	9.7454e-008	0.03267e-006
$n$	1.3577	1.4816
$R_s$ ( $\Omega$ )	0.0388	0.0364
$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	71.8295	60.2410
RMSE ( $\sigma$ %)	0.1089	0.3161

A partir des figures III-3, III-4, III-5, III-6 et III-7 on remarque que la méthode proposée donne une bonne concordance entre les valeurs de la caractéristique I-V expérimentale et calculée.

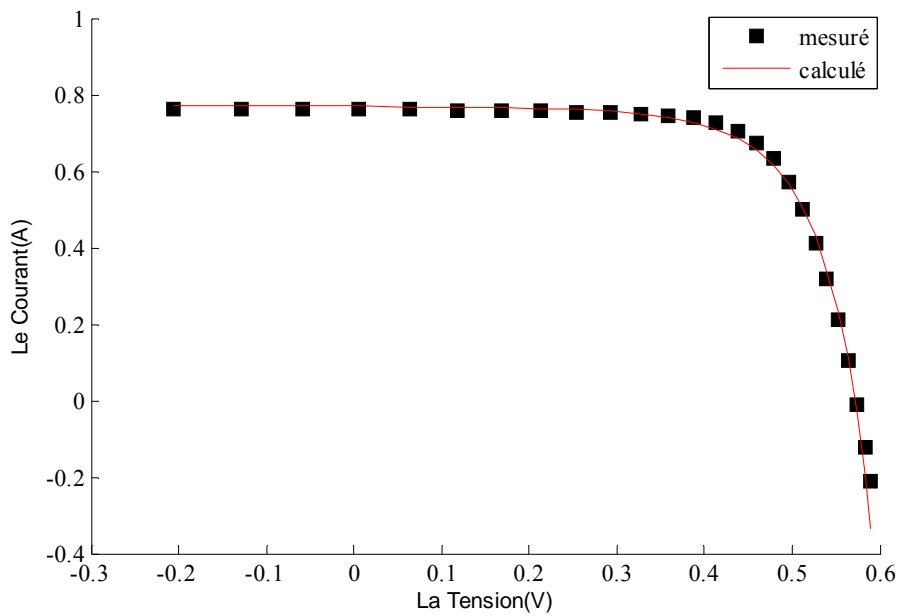


Figure III-3 : Caractéristique I-V expérimentale et simulée en considérant Les paramètres extrais de la structure Cell25.

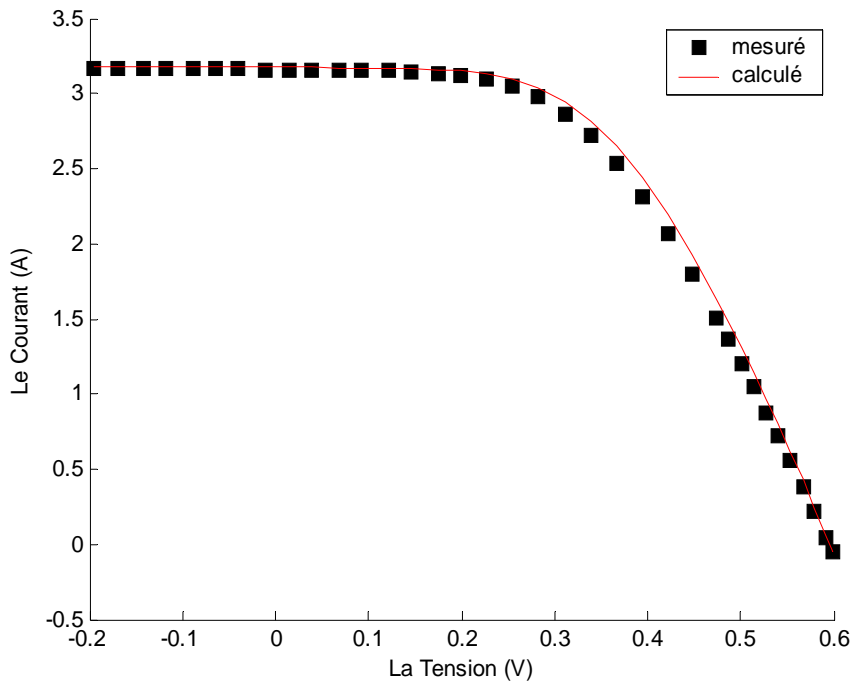


Figure III-4 : Caractéristique I-V expérimentale et simulée en considérant les paramètres extrais de la structure Cell33A.

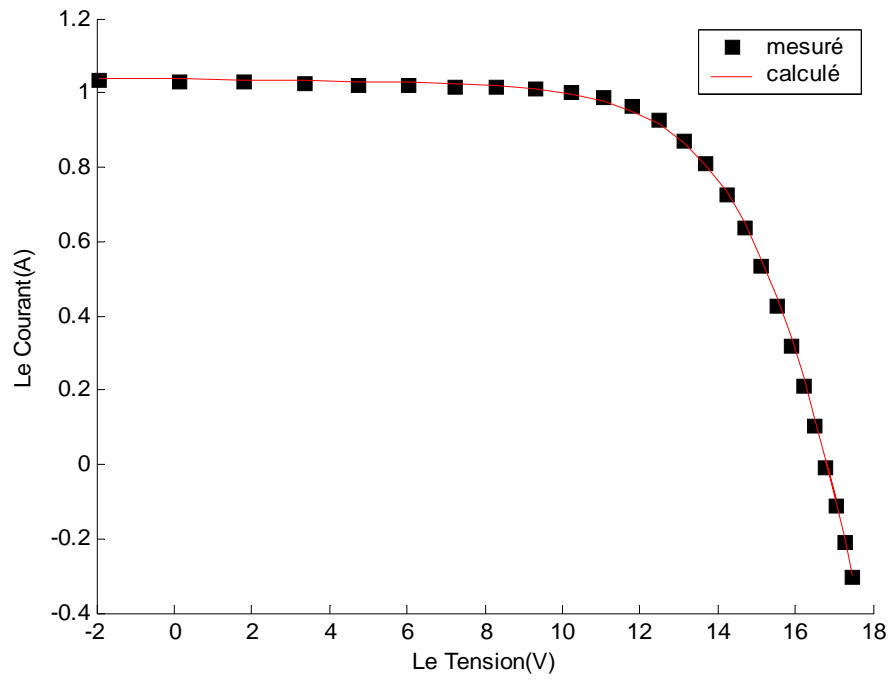


Figure III-5 : Caractéristique I-V expérimentale et simulée en considérant les paramètres extrais de la structure Modul25.

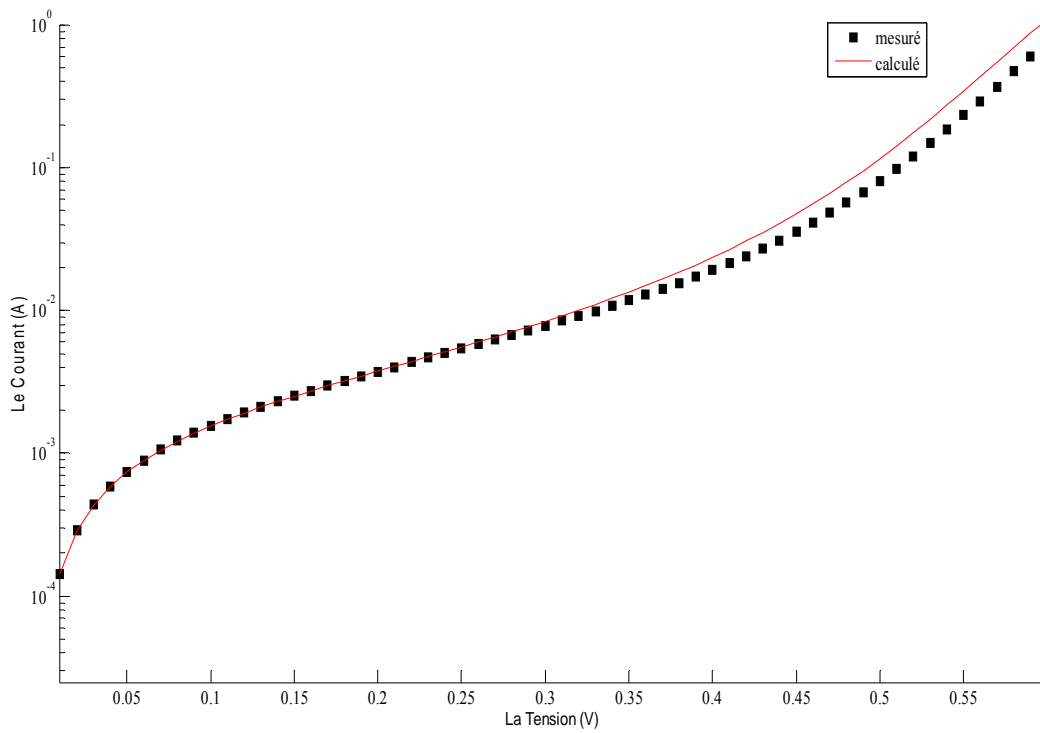


Figure III-6 : Caractéristique I-V expérimentale et simulée en considérant les paramètres extrais de la structure Obs33.

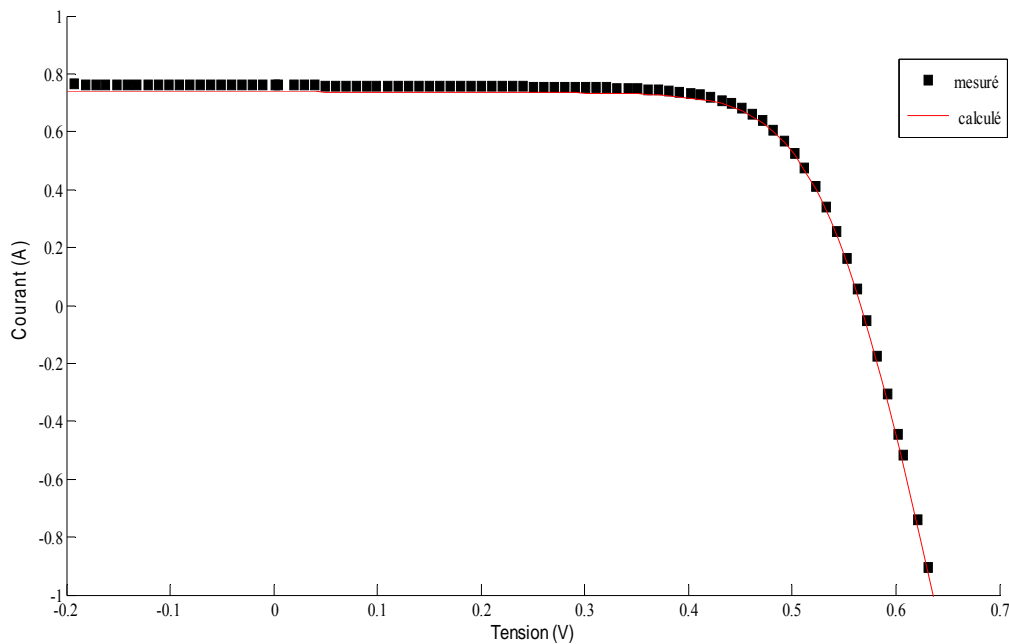


Figure III-7 : Caractéristique I-V expérimentale et simulée en considérant les paramètres extrais de la structure Cell33B.

Donc d'après les figures précédentes et les tableaux on peut dire que la méthode proposée donne de bons résultats.

### Conclusion :

Dans cette partie nous avons présenté les différentes méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires éclairées, à savoir les méthodes appliquées au modèle à une seule exponentielle et celui à deux exponentielles. Ensuite nous avons proposé une méthode qui est basé sur l'optimisation par essaim particulière (PSO) à fin d'extraire ces paramètres à partir de la caractéristique I-V expérimentale ; on s'appuie sur le fait de minimiser l'erreur relative quadratique entre la valeur expérimentale et simulée du courant. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux édités auparavant ; les courbes montrent une bonne concordance entre les caractéristiques I-V expérimentale et calculée.

## *Conclusion Générale*

Depuis la dernière décennie la production mondiale d'énergie électrique provenant de la conversion directe de l'énergie solaire « cellule photovoltaïque » a augmenté d'une façon très importante. Or l'utilisation des cellules photovoltaïques reste très limitée vu leurs coûts qui sont très élevés par rapport aux énergies fossiles et nucléaires, malgré leurs avantages.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne particulièrement le développement d'une méthode d'extraction des paramètres caractéristiques d'une cellule solaire, en utilisant le modèle à deux exponentielles qui renseigne sur le comportement réel de la cellule solaire. Ces paramètres sont : le photocourant  $I_{ph}$ , le courant de saturation  $I_s$ , le facteur d'idéalité  $n$ , et les résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_p$ . Cette méthode est basée sur la caractéristique courant-tension I-V de la cellule solaire pour un éclairement et une température donnée.

Pour bien mener notre travail, nous avons rappelé en premier lieu des généralités sur la source de cette énergie que représente le soleil. On a ensuite étudié l'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire, et on a terminé par le calcul des irradiances solaires.

Dans une seconde étape, nous nous sommes intéressés au dispositif de base de la conversion photovoltaïque qui est la cellule solaire. On a détaillé sa structure, son fonctionnement, sa caractéristique courant-tension ainsi qu'au paramètres. L'influence de la température, de l'illumination et des résistances série et parallèle est mise en évidence. Puis on a décrit le module photovoltaïque, ces différentes connexions et son déséquilibre.

Nous avons ensuite rappelé quelques méthodes existantes sur l'extraction des paramètres d'une cellule solaire pour les deux cas : modèle à une exponentielle et modèle à deux exponentielles. Puis nous avons proposé une méthode d'extraction des paramètres d'une cellule solaire pour le cas d'un modèle à deux exponentielles sous illumination et à l'obscurité. Celle-ci consiste à optimiser ces paramètres à partir de la caractéristique expérimentale tension-courant d'une cellule solaire, en se basant sur une minimisation de l'erreur relative quadratique entre la valeur expérimentale et la valeur calculée en utilisant l'optimisation par essaims particulaires « OEP (Particle Swarm Optimization) ». Nous avons établi des programmes de calcul sous l'environnement Matlab 10.0, permettant d'extraire ces différents paramètres à savoir : le photocourant  $I_{ph}$ , le courant de saturation  $I_{s1}$  et le facteur d'idéalité  $n_1$  de la première diode, le courant de saturation  $I_{s2}$  et le facteur d'idéalité  $n_2$  de la deuxième diode, et les résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_p$ . Le tracé des caractéristiques



courant-tension expérimentales et celles simulées pour de différentes structures sous éclairage et à l'obscurité nous a montré une bonne concordance. La comparaison des résultats obtenus par notre méthode et ceux déjà publiés sont très proches. La méthode proposée est facile, directe et rapide.

## *Références Bibliographiques*

- [1] Roger Messenger et Jerry Ventre: *Photovoltaic systems engineering*. Edition CRC Press LLC.(2004).
- [2] Revue de Météorologie. 8<sup>e</sup> série N° 31 ; Septembre (2000).
- [3] Zekai Sen: *Solar energy fundamentals and modelling technique*. Edition Springer-Verlag London Ltd, (2008).
- [4] T Muneer : *Solar radiation and daylight models*. Edition Elsevier Ltd, (2004).
- [5] Chegaar M : *Extracting solar cells paramaters and estimating the atmospheric effects on their performance*, thèse de doctorat d'état, Sétif (2002).
- [6] Robert Foster, Majid Ghassemi, Alma Cota : *Solar energy: renewable energy and the environment*. Edition Taylor & Francis, (2010).
- [7] Alin Ricaurd : *Photopiles solaires*. Edition presses polytechniques et universitaires romandes, (1997).
- [8] Robert Delmas, Gérard Mégie, Vincent-henri Pench: *Physique et chimie de l'atmosphère*. Edition Belin, (2005).
- [9] C. Gueymard; *Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance*. Solar Energy, 71(2001)325-346.
- [10] C. Gueymard; *The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models*. Solar Energy, 7(2004)423-453.
- [11] Langueur H : *Effets des variations spectrales sur les photopiles à base de couche mince en CIGS*, thèse de magister, Sétif (2004).
- [12] Viorel Badescu : *Modeling solar radiation at the earth's surface*. Edition Springer, (2008).
- [13] M. Collares-Pereira, A. Rabl; *The average distribution of solar radiation: correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values*. Solar Energy 22(1979)155-164.
- [14] Charles Kittel : *Physique de l'état solide*. Edition Dunod, (1998).
- [15] Henry Mathieu : *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*. Edition Masson,(1998).
- [16] Donald A. Neamen: *Semiconductor physics and devices*. Edition Mc Graw-Hill, (2003).
- [17] S. M. Sze: *Physics of semiconductor devices*. Edition John Wiley & Sons, (2007).
- [18] F. Lasnier, T. G. Ang: *Photovoltaic engineering handbook*. IOP Publishing Ltd, (1980).
- [19] Jianhua Zhao, Aihua Wang, Pietro P. Altermatt, Strut R. Wenham and Martin A. Green; *24% efficient perl silicon cell: recent improvements in high efficiency silicon cell research*. Solar Energy Materials & Solar Cells 41(1996)87-99.
- [20] Zhenqiang Xi, Deren Yang et al; *Investigation of texturization for monocrystalline silicon solar cells with differents kinds of alkaline*. Renewable Energy 29(2004)2101-2107.

- [21] M. Bashahu, A. Habyarimana; *Review and test of methods for determination of the solar cell series resistances*. Renewable Energy 6(1995)129-138.
- [22] G. N. Tiwari, Swapnil Dubey; *Fundamentals of photovoltaic modules and their applications*. Edition The Royal Society of Chemistry, (2010).
- [23] R. Chenni, M. Makhlof, T. Kerbache, A. Bouzid; *A detailed modelling method for photovoltaic cells*. Energy 32(2007)1724-1730.
- [24] Abdalah Aziz : *Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire*, thèse de doctorat, Toulouse III (2006).
- [25] Ewa Radziemska ; *Dark I-U-T measurements of single crystalline silicon solar cells*. Energy Conversion and Management 46(2005)1485-1494.
- [26] M. Haouari-Merbah, M. belhamel, I. Tobias, J.M. Ruiz; *Extraction and analysis of solar cell parameters from the illuminated current-voltage curve*. Solar Energy materials & Solar cells 87(2005)225-233.
- [27] M. Chegaar, Z. Ouennoughi; *A New method for evaluating illuminated solar cell parameters* Solid-State Electronics 45(2001)293-296.
- [28] A. Ortiz-Conde, Ma. Yuansheng, J. Thomson, E. Santos, J.J. Liou, F.J. Garcia Sánchez, M. Lei, J. Finol, P. Layman; *Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method*. Solid-State Electronics 43(1999):845-848.
- [29] Won Y. Yang, Wenwu Cao, Tae S. Chung, John Morris; *Applied numerical methods using MATLAB*. Edition John Wiley & Sons, (2005).
- [30] André Fortin : *Analyse numérique pour ingénieur*. Edition Ecole polytechnique de Montréal, (2000).
- [31] A. Farhat-hamida, Z. Ouennoughi, A. Hoffmann, R. Weiss; *Extraction of schottky diode parameters including parallel conductance using a vertical optimization method*. Solid-State Electronics 46(2002)615-619.
- [32] A. Farhat-hamida : *Modelisation des phenomenes de transport et etude du rendement dans les structures metal/isolant/semiconducteur*, thèse de Doctorat, Sétif (2006).
- [33] K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou; *Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance*. Solar Energy Materials & Solar Cells 91(2007)1647-1651.
- [34] D. Gromov, V. Pugachevich; *Modified methods for the calculation of real schottky-diode parameters*. Appl Phys A 59(1994)331-333.
- [35] A. Kaminski, J.J. Marchand, A. Laugier; *I-V methods to extract junction parameters with special emphasis on low series resistance*. Solid-State Electronics 43(1999)741-745.
- [36] A. kaminiski, J.J. Marchand, A. Fave and A Laugier; *New method of parameters extraction*

- from dark I-V cure*. 26th IEEE photovoltaic specialists conference (1997).
- [37] J Kennedy, R. C Eberhart; *Particle swarm optimization*. IEEE International Conference on Neural Networks (1995)1942-1948.
- [38] Naouel AYARI : *Métaheuristiques parallèles hybrides pour l'optimisation combinatoire : problème de règles de Golomb*, thèse de mastère, Université de Jendouba, Tunisie (2010).
- [39] R.C. Eberhart, P. Simpson, R. Dobbins: *Computational PC Tools*. AP Professional (1996).
- [40] Y. Shi, R. Eberhart: *Parameter Selection in Particle Swarm Optimization*. Proceedings of the 7th Annual Conference on Evolutionary Programming, 1998, pp. 591-600, LNCS 1447, Springer
- [41] Eberhart R.C. & Shi Y; *Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization*. International Congress on Evolutionary Computation IEEE (2000) 84-88.
- [42] Philippe Henniges : *PSO pour l'apprentissage supervisé des réseaux neuronaux de type fuzzy artmap*. thèse maîtrise en génie de la production automatisée, école de technologie supérieure, université du Québec (2006).
- [43] R. Hussien, D. Borchert, G. Grabosch, W.R. Fahrner; *Dark I-V-T measurements and characteristics of (n) a-Si/ (p) c-Si heterojunction solar cells*. Solar energy mat & solar cell 69(2001)123-129.

## ملخص:

الهدف من هذه المذكرة هو استخراج الوسائط المميزة للخلية الشمسية وذلك من أجل إضاءة و درجة حرارة ثابتتين. وقد استعملنا النموذج الكهربائي لخلية شمسية يحتوي على تيار ضوئي (مصدر التيار)، اثنين من ثنائي القطب، مقاومة على التسلسل و مقاومة على التفرع. تم استخراج الوسائط المميزة للخلية الشمسية باستعمال تقنية التقدير التي أساسها PSO، انطلاقا من الخاصية تيار-كمون التجريبية. النتائج المتحصل عليها تتوافق إلى حد كبير مع النتائج التجريبية و المنشورة السابقة.

الكلمات المفتاح: الخلية الشمسية، النموذج الكهربائي باثنين من ثنائي القطب، الوسائط المميزة.

## Abstract:

The main goal of this thesis is to extract the characteristic parameters of a solar cell under fixed illumination and temperature. A two-diode model of a solar cell is used. To extract this model parameters, we propose a technique of optimisation based on particle swarm. Our results are in good agreement with experimental and other published results.

Keywords: Solar cell; Two diode model; PSO; Solar cell characteristics.

## Résumé :

Le but de ce travail est d'extraire les paramètres caractéristiques d'une cellule solaire sous une illumination et température constantes. On a utilisé le modèle à deux exponentielles qui comporte : un générateur de courant, deux diodes de jonction, une résistance série et une résistance parallèle. La technique d'optimisation utilisée est basée sur l'essaim particulaire et appliquée à la caractéristique courant-tension expérimentale. Les résultats obtenus sont en bon accord avec l'expérimentation et ceux déjà publiés.

Mots clés : Cellule solaire ; Modèle à deux exponentielles ; OEP ; Paramètres caractéristiques.