



*République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane MIRA de Bejaia  
Faculté de la Technologie  
Département de Génie Electrique*



*MEMOIRE DE FIN DE CYCLE  
En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en  
ELECTROTECHNIQUE  
Option : Energies Renouvelables*

## *Thème*

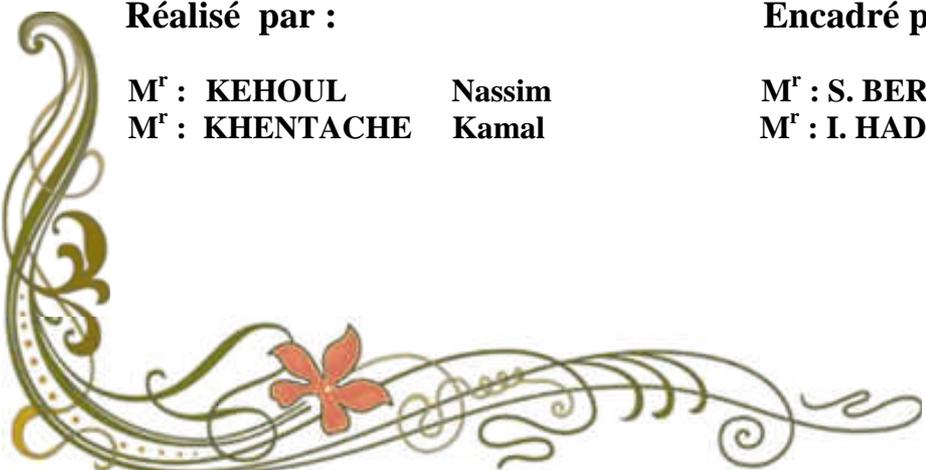
***Etude Comparative des Modèles d'une  
Cellule Photovoltaïque***

Réalisé par :

M<sup>r</sup> : KEHOUL Nassim  
M<sup>r</sup> : KHENTACHE Kamal

Encadré par :

M<sup>r</sup> : S. BERRAH  
M<sup>r</sup> : I. HADJ MAHAMMED



Année universitaire  
2011-2012

# *Remerciements*

# REMERCIEMENTS

*Ce travail à été effectué à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa sous la direction scientifique du M<sup>r</sup> HADJ MAHAMMED Idriss, Chercheur au niveau de cette unité. Nous tenons à lui exprimer nos plus vifs remerciements, et surtout notre profonde et respectueuse reconnaissance pour l'intérêt et la bienveillance avec lesquels il a dirigé notre travail.*

*Nous exprimons nos vifs remerciements en particulier à notre promoteur M<sup>r</sup> BERRAH Smail qui a accepté de nous encadrer et pour ces orientations et son soutien.*

*Nous tenons aussi à remercier le président et les membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.*

*Nous remercions également les êtres les plus chers aux mondes « Nos Parents » pour tous les efforts et sacrifices qu'ils ont entrepris afin de nous voir réussir.*

*A toute la communauté scientifique à travers le monde entier.*

# *Dédicaces*

# DEDICACES

*A mes chers parents et grands parents*

*A ma chère sœur ADILA*

*A mon cher frère YAZID*

*A toute ma famille*

*A tous mes amis*

*ASSIREM*

# DEDICACES

*A mes chers parents*

*A mes chers frères EL-DJOUDI, HOCINE et  
GHILAS*

*A mes chères Tantes KAHINA, OUARDIA*

*A toute ma famille*

*A tous mes amis*

**KAMEL**

# *Sommaire*

## *Sommaire*

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

### **Chapitre I : Rappels, Etat d'art des Cellules et Systèmes Photovoltaïques**

<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Historique .....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Notion sur la nature du rayonnement solaire .....</b>	<b>4</b>
<b>I.4 Conversion photovoltaïque .....</b>	<b>7</b>
I.4.1 L'effet photovoltaïque .....	7
I.4.2 Dispositifs à semi-conducteurs.....	7
I.4.3 Dopage des semi-conducteurs .....	8
I.4.3.1 Les méthodes de dopages .....	9
I.4.4 La jonction P-N .....	10
<b>I.5 Cellule photovoltaïque.....</b>	<b>11</b>
I.5.1 Principe de fonctionnement.....	11
I.5.2 Les différentes technologies.....	12
I.5.2.1 Cellule en silicium monocristallin .....	12
I.5.2.2 Cellule en silicium polycristallin .....	13
I.5.2.3 Cellule en silicium amorphe.....	13
I.5.2.4 Comparatif des différentes technologies .....	14
I.5.3 Caractéristique courant tension et schéma équivalent.....	15
I.5.3.1 La caractéristique sous obscurité .....	15
I.5.3.2 La caractéristique sous éclairement .....	15
I.5.4 Facteurs limitant le rendement d'une cellule photovoltaïque .....	18
I.5.4.1 Influences des facteurs internes .....	18
I.5.4.1.1 Influence de la résistance série .....	18
I.5.4.1.2 Influence de la résistance shunt .....	19
I.5.4.1.3 Détermination de la résistance série et de la résistance parallèle .....	20
I.5.4.2 Influences des facteurs externes .....	21
I.5.4.2.1 Influence de l'éclairement .....	21
I.5.4.2.2 Influence de la température .....	21
I.5.5 Architecture classique d'un générateur photovoltaïque .....	22
I.5.5.1 Association en série des cellules photovoltaïques .....	22
I.5.5.2 Association parallèle des cellules photovoltaïques .....	23
I.5.5.3 Association hybride (en série et en parallèle) .....	23
I.5.5.4 Protection des générateurs photovoltaïques .....	24
<b>I.6 Le module photovoltaïque.....</b>	<b>26</b>
I.6.1 Caractéristiques d'un module.....	27
<b>I.7 Le panneau solaire.....</b>	<b>27</b>
<b>I.8 Les systèmes photovoltaïques .....</b>	<b>29</b>

I.8.1 Les principaux composants d'un système solaire photovoltaïque .....	29
I.8.2 Classification d'un système solaire photovoltaïque .....	30
I.8.3 Utilisation des systèmes photovoltaïque .....	31
<b>I.9 Avantages, inconvénients et limites de l'énergie photovoltaïque.....</b>	<b>31</b>
<b>I.10 Conclusion .....</b>	<b>32</b>

## **Chapitre II : Présentation des différents modèles d'une cellule photovoltaïque**

<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>33</b>
<b>II.2 Modèles électriques .....</b>	<b>33</b>
II.2.1 Modèle idéale d'une cellule solaire .....	33
II.2.2 Modèle explicite.....	34
II.2.3 Modèle à cinq paramètres .....	35
II.2.4 Modèle à quatre paramètres (simplifié) .....	36
II.2.5 Modèle à deux diodes .....	37
II.2.6 Modèle à deux diodes sans résistance shunt.....	38
<b>II.3 Modèles mathématiques .....</b>	<b>38</b>
II.3 1 Modèle Sandia .....	39
II.3 2 Modèle Cenerg.....	40
II.3 3 Modèle Madison .....	41
<b>II.4 Conclusion.....</b>	<b>42</b>

## **Chapitre III : Etude expérimentale et simulation**

<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>43</b>
<b>III.2 Topologie de site .....</b>	<b>43</b>
<b>III.3 Dispositif expérimental.....</b>	<b>43</b>
<b>III.4 Résultats de simulation et expérimentaux.....</b>	<b>45</b>
III.4.1 Extraction des paramètres de modèle à une diode.....	49
III.4.2 Application des trois modèles étudiés .....	50
III.4.2.1 Application de modèle explicite.....	50
III.4.2.2 Application de modèle à cinq paramètres .....	52
III.4.2.3 Application de modèle à quatre paramètres .....	54
<b>III.5 Confrontation des résultats expérimentaux avec résultats théorique via RMSE....</b>	<b>56</b>
<b>III.6 Interprétation des résultats.....</b>	<b>57</b>
<b>III.7 Conclusion .....</b>	<b>58</b>

## **Chapitre IV : Translation de la caractéristique I-V**

<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>59</b>
<b>IV.2 Méthodes de translation .....</b>	<b>59</b>
IV.2.1 Méthode selon la norme CEI 891 .....	59

IV.2.2 Méthode simplifiée .....	60
<b>IV.3 Application de deux méthodes sur le module ASE95G .....</b>	<b>61</b>
<b>IV.4 Résultats et comparaison .....</b>	<b>62</b>
<b>IV.5 Conclusion .....</b>	<b>63</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>63</b>

**Annexes**

**Bibliographie**

# *Nomenclature*

## *Nomenclature*

A	Elévation de soleil sur l'horizon [°]
AM	Air masse
E	Eclairement [ $W/m^2$ ]
$E_g$	Gap du matériau [ev]
$E_{Ph}$	Valeur énergétique [ev]
$E_{ISC}$	Erreur moyenne commise sur $I_{SC}$
$E_{VOC}$	Erreur moyenne commise sur $V_{OC}$
FF	Facteur de forme
$f_1$	Fonction du nombre d'air-masse
$f_2$	Fonction de l'angle d'incidence
$E_r$	Rayonnement de référence [ $W/m^2$ ]
I	Courant fournie par la cellule (module, capteur) [A]
$I_D$	Courant de la diode [A]
$I_m$	Courant à la puissance maximale [A]
$I_{MPr}$	Intensité de puissance maximale de référence [A]
$I_{obs}$	Courant d'obscurité [A]
$I_{Ph}$	Photocourant [A]
$I_S$	Courant de saturation de la diode [A]
$I_{SC}$	Courant de court-circuit
$I_{Sh}$	Courant aux bornes de la résistance shunt [A]
$I_{SCr}$	Intensité de court-circuit de référence [A]
$I_{SC}^t$	Courant de court-circuit total [A]
K	La constante de Boltzmann [ $J.K^{-1}$ ]
m	Facteur d'idéalité de la jonction PN
n	Paramètre d'ajustement
$n_P$	Nombre de cellule en parallèle
$n_S$	Nombre de cellule en série
P	Pression [ $N.m^2$ ]
$P_c$	Puissance crête [W]
$P_i$	Paramètres à déterminer
$P_{in}$	Puissance incidente [W]
$P_m$	Puissance maximale [W]
q	La charge de l'électron [C]
$R_S$	Résistance série [ $\Omega$ ]
$r_s$	Facteur de correction
$R_{Sh}$	Résistance shunt [ $\Omega$ ]
S	Surface de la cellule [ $cm^2$ ]
T	Température [°C]
$T_j$	Température de la jonction [K]
$T_{jr}$	Température de jonction référence [°C]
V	La tension aux bornes de la cellule [V]

$V_0$	Barrière de potentiel [V]
$V_m$	Tension à la puissance maximale [V]
$V_{MPr}$	Tension de puissance maximale de référence [V]
$V_{OC}$	Tension de circuit ouvert
$V_{OCr}$	Tension de circuit ouvert de référence [V]
$V_{OC}^t$	Tension de circuit ouvert totale [V]
$V_t$	Potentiel thermique [V]
$Z$	Altitude [m]
$\beta$	Angle d'incidence [°]
$\eta$	Le rendement [%]
$\lambda$	Longueur d'onde [ $\mu\text{m}$ ]
$\mu_{ISC}$	Coefficient de dépendance en température du courant de court circuit
$\mu_{VOC}$	Coefficient de dépendance en température du de la tension de circuit ouvert
$\mu_{Vmp}$	Coefficient de dépendance en température de la tension de puissance maximale
$\mu_{Imp}$	Coefficient de dépendance en température du courant de puissance maximale

# *Liste des Figures*

## *Liste des figures*

<b>Figure I.1</b> : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	4
<b>Figure I.2</b> : Spectre solaire .....	6
<b>Figure I.3</b> : Semi-conducteur intrinsèque.....	8
<b>Figure I.4</b> : Semi-conducteur extrinsèque .....	8
<b>Figure I.5</b> : Silicium de type N.....	9
<b>Figure I.6</b> : Silicium de type P .....	9
<b>Figure I.7</b> : Dopage des semi-conducteurs.....	10
<b>Figure I.8</b> : Mouvement des électrons et des trous .....	10
<b>Figure I.9</b> : La jonction <b>P-N</b> .....	10
<b>Figure I.10</b> : Production d'électricité par la séparation électron-trou .....	12
<b>Figure I.11</b> : Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclaircissement et sous obscurité .....	16
<b>Figure I.12</b> : Caractéristique et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle .....	17
<b>Figure I.13</b> : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V de la cellule.....	19
<b>Figure I.14</b> : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V de la cellule solaire .....	20
<b>Figure I.15</b> : Résistance Série et Shunt .....	20
<b>Figure I.16</b> : Influence du flux sur la caractéristique I-V de la cellule solaire .....	21
<b>Figure I.17</b> : Influence de la température sur la caractéristique I-V de la cellule.....	22
<b>Figure I.18</b> : Caractéristiques résultantes d'un groupement de $n_p$ cellules en série.....	23
<b>Figure I.19</b> : Caractéristiques résultant d'un groupement de $n_p$ cellules en parallèle.....	23
<b>Figure I.20</b> : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques .....	24
<b>Figure I.21</b> : (a) Architecture Classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation $I_{PV}$ .....	25
<b>Figure I.22</b> : Caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau photovoltaïque BP 585 et effet d'occultation d'une des 36 cellules qui composent le module PV.....	25
<b>Figure I.23</b> : Module photovoltaïque .....	26
<b>Figure I.24</b> : Boite de jonction .....	26
<b>Figure I.25</b> : Panneau solaire -Site de Ghardaïa (URAER) .....	28
<b>Figure I.26</b> : Boite de dérivation .....	28
<b>Figure I.27</b> : Eléments d'un système photovoltaïque.....	29
<b>Figure II.1</b> : Circuit idéal d'une cellule photovoltaïque.....	34
<b>Figure II.2</b> : Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	35
<b>Figure II.3</b> : Circuit équivalent de modèle à quatre paramètres.....	36
<b>Figure II.4</b> : schéma équivalent à deux diodes .....	37

<b>Figure II.5</b> : Schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt.....	38
<b>Figure II.6</b> : Schéma bloc d'une cellule PV .....	38
<b>Figure III.1</b> : Dispositif expérimental de mesure des courbes caractéristiques des modules photovoltaïques .....	44
<b>Figure III.2</b> : Les modules photovoltaïques testés.....	45
<b>Figure III.3.a</b> : Evolution de l'éclairement global -Module <b>ASE95G</b> -.....	46
<b>Figure III.3.b</b> : Evolution de la température de la jonction- Module <b>ASE95G</b> - .....	46
<b>Figure III.4.a</b> : Evolution de l'éclairement global-Module <b>BP3160G</b> - .....	47
<b>Figure III.4.b</b> : Evolution de la température de la jonction-Module <b>BP3160G</b> - .....	47
<b>Figure III.5.a</b> : Evolution de l'éclairement global-Module <b>ST40G</b> - .....	48
<b>Figure III.5.b</b> : Evolution de la température de la jonction-Module <b>ST40G</b> -.....	48
<b>Figure III.6</b> : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ASE95G -Modèle explicite- .....	51
<b>Figure III.7</b> : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module BP3160G -Modèle explicite- .....	51
<b>Figure III.8</b> : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ST40G -Modèle explicite- .....	52
<b>Figure III.9</b> : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ASE95G -Modèle à 5 paramètres- .....	53
<b>Figure III.10</b> : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module BP31605G -Modèle à 5 paramètres- .....	53
<b>Figure III.11</b> : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ST40G -Modèle à 5 paramètres- .....	54
<b>Figure III.12</b> : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ASE95G -Modèle à 4 paramètres- .....	55
<b>Figure III.13</b> : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module BP3160G -Modèle à 4 paramètres- .....	55
<b>Figure III.14</b> : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ST40G -Modèle à 4 paramètres- .....	56
<b>Figure IV.1</b> : Caractéristiques I-V mesurées et translatées selon CEI-891.....	61
<b>Figure IV.2</b> : Caractéristiques I-V mesurées et translatées selon la méthode simplifiée.....	62

# *Liste des Tableaux*

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b> : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.....	6
<b>Tableau I.2</b> : Caractéristiques du silicium .....	12
<b>Tableau I.3</b> : Comparatif des différentes technologies .....	14
<b>Tableau III.1</b> : Caractéristiques électriques des modules utilisés aux conditions STC (éclairage énergétique $1000 \text{ W/m}^2$ , spectre 1,5, température de la cellule $25^\circ\text{C}$ ).....	45
<b>Tableau III.2</b> : Les valeurs d'éclairage et de température .....	48
<b>Tableau III.3</b> : Les paramètres du modèle à cinq paramètres extraits par la méthode analytique .....	49
<b>Tableau III.4</b> : Les paramètres du modèle à quatre paramètres extraits par la méthode analytique .....	50
<b>Tableau III.5</b> : Les valeurs de RMSE .....	57
<b>Tableau IV.1</b> : Résultats de translation selon la norme CEI 891 .....	62
<b>Tableau IV.2</b> : Résultats de translation selon la méthode simplifiée.....	62

# *Introduction*

## *Introduction générale*

La grande partie de l'énergie consommée par l'homme provient des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...etc) dont l'utilisation massive conduit à l'épuisement de ses réserves et suppose une menace réelle à l'environnement, qui se manifeste principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

D'autre part, il y a inégalité extrême de la distribution de la consommation de l'énergie. Beaucoup de populations, spécialement dans les zones rurales isolées des pays en voie de développement qui bénéficient d'un fort ensoleillement, sont confrontées à de grands problèmes pour satisfaire leurs besoins en énergie.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) de part ses caractéristiques de modularité qui permettent de l'adapter à des besoins énergétiques divers, autonomie, fiabilité et viabilité sur le plan économique, permet d'apporter de réelles solutions telles que l'éclairage public et domestique, le pompage de l'eau pour la consommation et l'irrigation, le balisage,...etc.

Pour améliorer la connaissance de ces systèmes, plusieurs voies sont possibles. L'expérimentation en vraie grandeur peut apporter des réponses aux questions posées, mais cette solution est longue et coûteuse à mettre en œuvre, et ne permet pas de généraliser les résultats. L'autre voie fait appel à la modélisation et à des programmes de simulation sur ordinateur permettant de traiter un grand nombre de cas en un temps et avec un coût très réduit.

Pour la réalisation de ces programmes de simulation et d'optimisation des systèmes PV, il est indispensable de disposer de modèles mathématiques les plus précis possible des différentes parties qui constituent le système. La plupart des modèles du générateur PV existants sont validés dans des conditions standards d'éclairement et de température.

Le principal objectif de ce travail est de modéliser le générateur PV dans les conditions réelles de fonctionnement d'éclairement et de température.

Au préalable, une recherche et étude des différents modèles existants dans la littérature et les plus utilisés par les spécialistes du PV sont nécessaires.

Dans ce travail, nous allons valider et comparer les performances de ces modèles pour différentes températures et différents éclaircements sur la base de données expérimentales obtenues au niveau de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables de Ghardaïa.

Nous proposons aussi de valider et de comparer deux méthodes de translation de la caractéristique courant-tension I-V donnée à des conditions déterminées d'éclairement et de température vers d'autres conditions distinctes désirées, dans l'éventualité de palier à un manque de données.

Dans le premier chapitre, nous donnons un rappel sur les principes de base liés à la conversion photovoltaïque. Dans le deuxième chapitre, nous présentons différents modèles du générateur photovoltaïque couramment utilisés dans la littérature. L'étude et simulation des ces différents modèles, ainsi que la confrontation des résultats théoriques et expérimentaux sont donnés au troisième chapitre. Enfin, nous appliquons les deux méthodes de translation dans le chapitre quatre.

*Chapitre I*  
*Rappels, Notions de Base des*  
*Cellules et Systèmes*  
*Photovoltaïques*

## I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot "photovoltaïque" vient du mot grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la " lumière électricité " [1].

## I.2 Historique

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [2].

### ➤ Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque

**1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

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

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

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

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

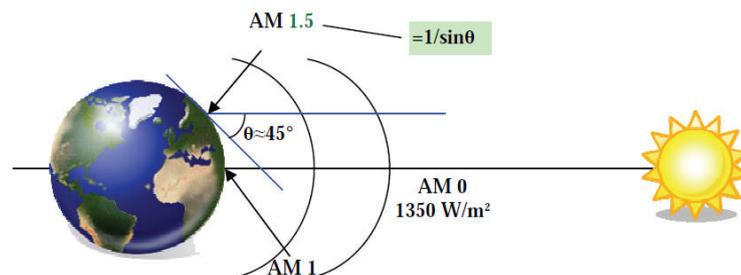
**1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en **1954** par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [2].

### I.3 Notion sur la nature du rayonnement solaire

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149675108 km de la terre [3], il est constitué principalement de gaz, dont la fusion continue produit une quantité d'énergie phénoménale. La fusion des atomes d'hydrogène en atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 millions de degrés Kelvin. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes [4].



**Figure I.1 :** Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [5].

Le rayonnement émis par le soleil comporte des ondes électromagnétiques dont une partie, appelée le rayonnement solaire, ne cesse de parvenir à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la valeur prise par la température superficielle du soleil environ 5800°K, l'énergie de rayonnement électromagnétique transmise à la terre provient essentiellement de l'émission d'ondes lumineuses qui se situent dans le visible (entre 0,4 et 0,7  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde environ) et le proche infrarouge (entre 0,7 et 4  $\mu\text{m}$  environ) ; cette énergie, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairage de quelque 340  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Mais sur cette quantité d'éclairage qu'apporte le soleil au système terre-atmosphère, environ 100  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  sont réfléchis vers l'espace : le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface terrestre [6].

Tout d'abord, près du quart de cet éclairage incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (environ 65  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), le reste étant dû aux autres constituants atmosphériques — gaz et aérosols — qui réfléchissent environ 15  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . En outre, l'atmosphère et ses nuages prélèvent par absorption 80  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

environ sur l'éclairement solaire : restent donc approximativement  $180 \text{ W. m}^{-2}$  qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont à peu près les deux tiers se font directement, le reste s'effectuant par diffusion vers le bas ; c'est grâce à ce rayonnement diffus que l'on peut voir sans interruption pendant le jour, même quand les nuages cachent le soleil [7].

On assiste à un processus assez complexe d'interaction entre diffusion vers le bas et réflexion : la surface terrestre, possédant un albédo moyen élevé (l'albédo est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle), devrait renvoyer dans l'atmosphère environ  $50 \text{ W.m}^2$  sur les quelque  $180 \text{ W. m}^{-2}$  incidents ; mais en fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard par diffusion vers le bas depuis le milieu atmosphérique et s'ajoute partiellement aux  $130 \text{ W.m}^2$  de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Bien qu'il n'existe pas dans la réalité deux instants distincts pour l'absorption par la surface terrestre, mais un phénomène continu d'absorption du rayonnement solaire, on peut résumer le processus précédent en disant que tout se passe comme si les  $50 \text{ W. m}^{-2}$  réfléchis par cette surface se répartissaient entre  $20 \text{ W.m}^2$  définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire après diffusion vers le haut à travers l'atmosphère et  $30 \text{ W. m}^{-2}$  retournant à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Ces  $30 \text{ W. m}^{-2}$  s'ajoutent aux  $130 \text{ W. m}^{-2}$  initialement non réfléchis pour constituer approximativement les  $160 \text{ W.m}^2$  -pratiquement la moitié du rayonnement solaire- qu'absorbe la surface terrestre [7].

En ramenant toutes les couches de l'atmosphère dans des conditions normales ( $P= 1013$  mbar et  $T= 25^\circ\text{C}$ ), on a défini une atmosphère standard d'épaisseur verticale moyenne de 7,8 km prise pour référence unité et formée de couches planes et stratifiées composées par les divers gaz comme l'azote (couche de 6 150 m), l'oxygène (1 650 m), l'argon (74 m), le gaz carbonique (24 m). L'eau est représentée par une couche d'épaisseur variable de quelques dizaines de mètres pour la vapeur et de quelques centimètres pour le liquide.

De là on introduit le nombre d'air masse AM qui permet de tenir compte de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons solaires suivant l'inclinaison du soleil [7].

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

Avec :

$p$  ( $\text{N.m}^2$ ) pression;

$A$  ( $^\circ$ ) élévation du soleil sur l'horizon ( $90^\circ$  au zénith);

$z$  (km) altitude;

Ainsi, au niveau de la mer ( $z = 7800\text{m}$ ),

$$AM = \frac{1}{\sin(A)} \quad (\text{I.2})$$

Et on dit qu'on a les conditions AM1 lorsque le soleil est au zénith, AM2 lorsqu'on a une inclinaison de 30°.

Hors atmosphère à haute altitude, on est dans les conditions AM0.

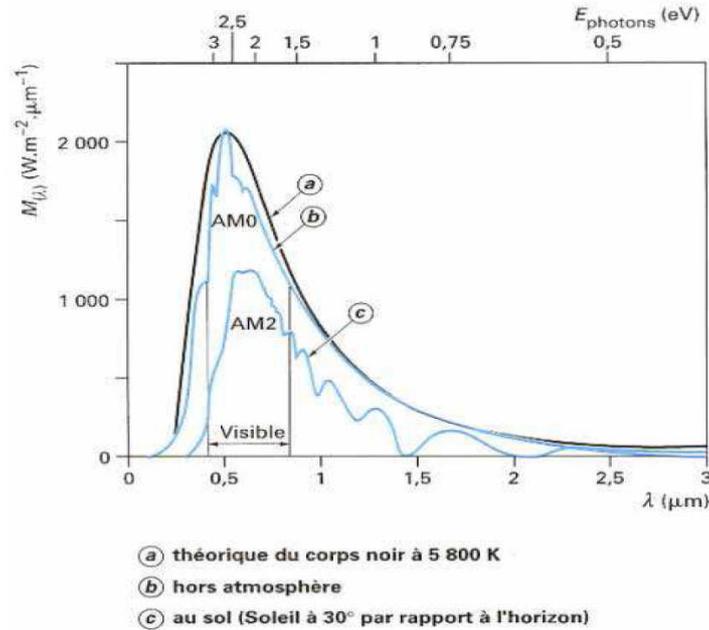


Figure 1.2 : Spectre solaire

Il est important de comprendre les deux aspects recouverts par le concept de nombre d'air masse. D'une part, il caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire ( $1353 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  pour AM0,  $833 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  pour AM1,5) et d'autre part, il sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques. Ainsi les conditions standards de qualification des cellules sont un spectre AM1,5, une puissance incidente de  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ . Sauf indication contraire, c'est pour de telles conditions que doivent être fournies les performances et spécifications d'un dispositif photovoltaïque donné.

Le tableau (I.1) suivant donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

Tableau I.1 : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire [8]

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{\text{Ph}}$ (eV)	Zone
0,2	6,2	Ultra-violet
0,4	3,1	Visible bleu
0,5	2,48	Visible jaune-vert
0,78	1,59	Visible rouge
1	1,24	Infrarouge
2	0,62	Infrarouge
4	0,31	Infrarouge

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons. Puis, l'énergie des photons excite des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.

## **I.4 Conversion photovoltaïque**

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en **1954** avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque [9,13].

### **I.4.1 L'effet photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire [11,13].

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives [10,13].

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

### **I.4.2 Dispositifs à semi-conducteurs**

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

A la température de 0 K (-273°C) chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal. Dans la figure (I.3), les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible.

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou. Par exemple, à la température de 300 K (27°C), il y a  $1,45 \times 10^{10}$  paires électron-trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur [15].

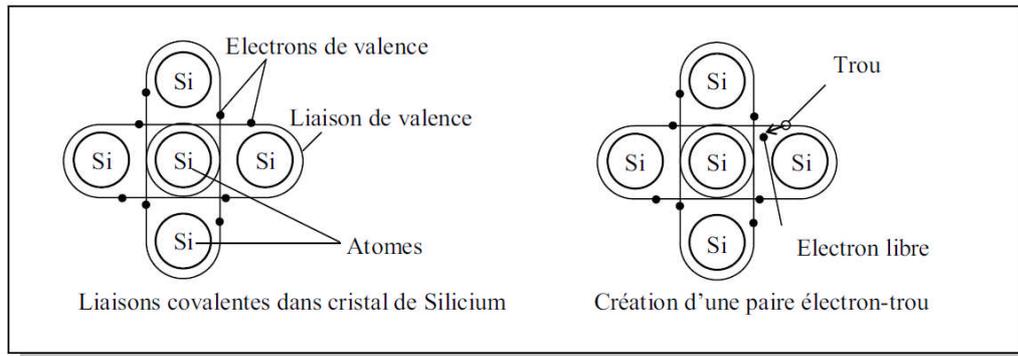


Figure I.3 : Semi-conducteur intrinsèque

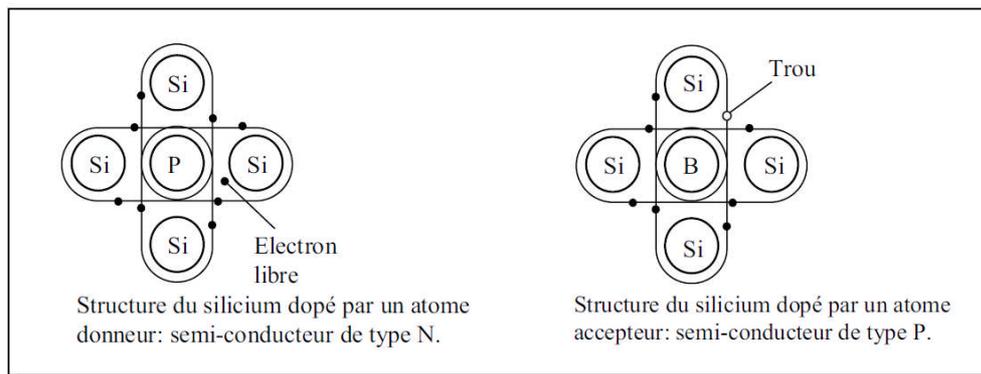


Figure I.4 : Semi-conducteur extrinsèque

### I.4.3 Dopage des semi-conducteurs

Le dopage d'un matériau consiste à introduire dans sa matrice des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous. Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, ou pur, il n'y a aucun atome dopant. Tous les électrons présents dans la bande de conduction proviennent donc de la bande de valence. Il y a donc autant d'électrons que de trous :  $n = p = n_i$  ;  $n_i$  : est la concentration intrinsèque. Tout dopage sert à modifier cet équilibre entre les électrons et les trous, pour favoriser la conduction électrique par l'un des deux types de porteurs [16].

Il existe deux types de dopage :

#### ❖ Dopage de type N

Le dopage de type **N** consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.

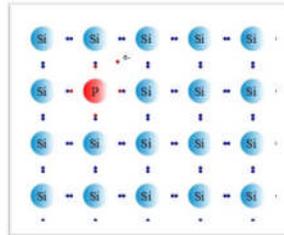


Figure I.5 : Silicium de type N

#### ❖ Dopage de type P

Le dopage de type **P** consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.

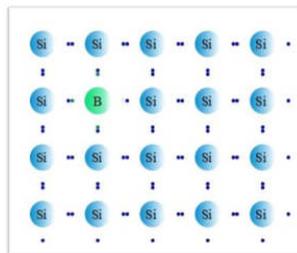


Figure I.6 : Silicium de type P

### I.4.3.1 Les méthodes de dopages

- **La diffusion** : on utilise un four, dans lequel on injecte des gaz avec une solution dopante pour le silicium. Avec la chaleur, le dopant a une énergie suffisante pour entrer dans la plaquette de silicium. Cette méthode est assez ancienne, et nécessite d'avoir une température uniforme dans le four.
- **La croissance épitaxiale** : Cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois-ci les atomes du dopant sont déposés sur le silicium qui se présente sous la forme d'une plaquette. On a ainsi un dépôt en surface, et non pas une insertion comme pour la méthode de dopage par diffusion. La température du four doit avoisiner les 1 200 °C.
- **Le bombardement ionique** : Une source (appelé faisceau ionique énergétique) produit des ions, qui sont ensuite accélérés, et par le biais d'un contrôle très précis, ceux-ci vont alors se positionner sur la plaquette. L'avantage de ce principe est que l'opération se déroule à température ambiante. Le défaut de cette technique est qu'elle

peut provoquer des dommages au silicium induisant un réarrangement indésirable de sa structure cristalline, exigeant ainsi une recristallisation subséquente.

La filière photovoltaïque utilise majoritairement le dopage par diffusion.

#### I.4.4 La jonction P-N

Une jonction P-N est créée en juxtaposant un semi-conducteur dopé P avec un semi-conducteur dopé N. On l'utilise dans de nombreux dispositifs électroniques.

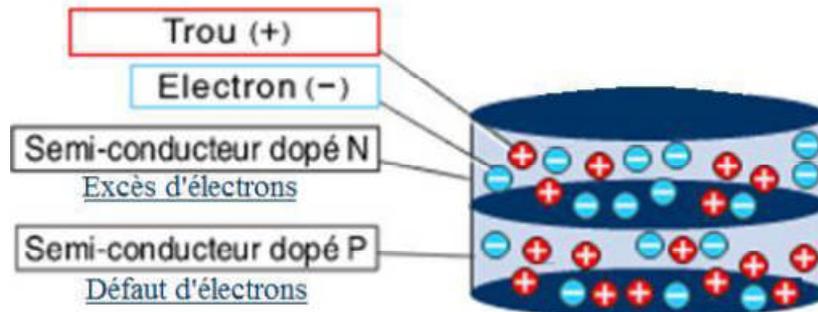


Figure I.7 : Dopage des semi-conducteurs

Les électrons en excès de la région dopée N ont tendance à diffuser vers la région P (où ils sont minoritaires). Il en est de même pour les trous en sens inverse.

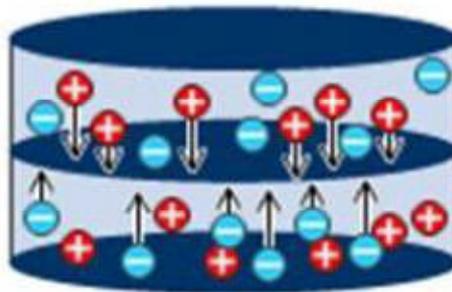


Figure I.8 : Mouvement des électrons et des trous

Les électrons et les trous se concentrent alors au niveau de l'interface entre les deux tranches.

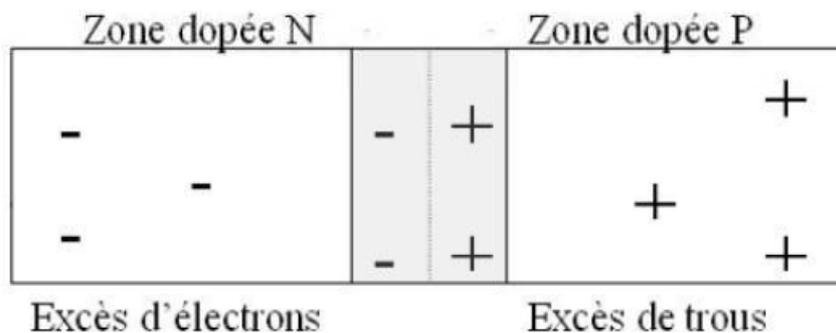


Figure I.9 : La jonction P-N

Cela a pour effet de créer un champ électrique créant une barrière de potentiel au niveau de la zone centrale. Cette zone devient un isolant et s'appelle **la jonction P-N**.

Le champ électrique ainsi créé a tendance à repousser les électrons vers la zone **N** et les trous vers la zone **P**. De ce fait, lorsque la zone dopée **N** est exposée au rayonnement lumineux, un électron de la couche de valence du silicium est arraché, laissant parallèlement un trou. Sous l'effet de champ électrique créé par la jonction P-N, l'électron diffuse à l'extrémité de la zone **N**, et le trou se déplace à l'extrémité de la zone **P**. Lorsque les deux faces de ces deux zones sont reliées par un conducteur, un courant se crée, car l'électron va combler le trou. Une cellule photovoltaïque est constituée d'une tranche dopée **N** posée sur une tranche dopée **P**. L'interface entre les deux tranches s'appelle la jonction **P-N**. La tranche dopée **N** correspondra à la partie de la cellule exposée au rayonnement solaire [17].

## I.5 Cellule photovoltaïque

On appelle cellule solaire un convertisseur optoélectronique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Les photopiles ou cellules solaires sont des éléments de base d'un générateur photovoltaïque elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs [9,10].

### I.5.1 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **N** et dopée de type **P**. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **N** diffusent dans le matériau **P**. La zone initialement dopée **N** devient chargée positivement, et la zone initialement dopée **P** chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone **N** et les trous vers la zone **P**. Une jonction **P-N** a été formée [9, 10,13]. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones **N** et **P**, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone **N** rejoignent les trous de la zone **P** via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule [12, 13,14], voir la figure (I.10).

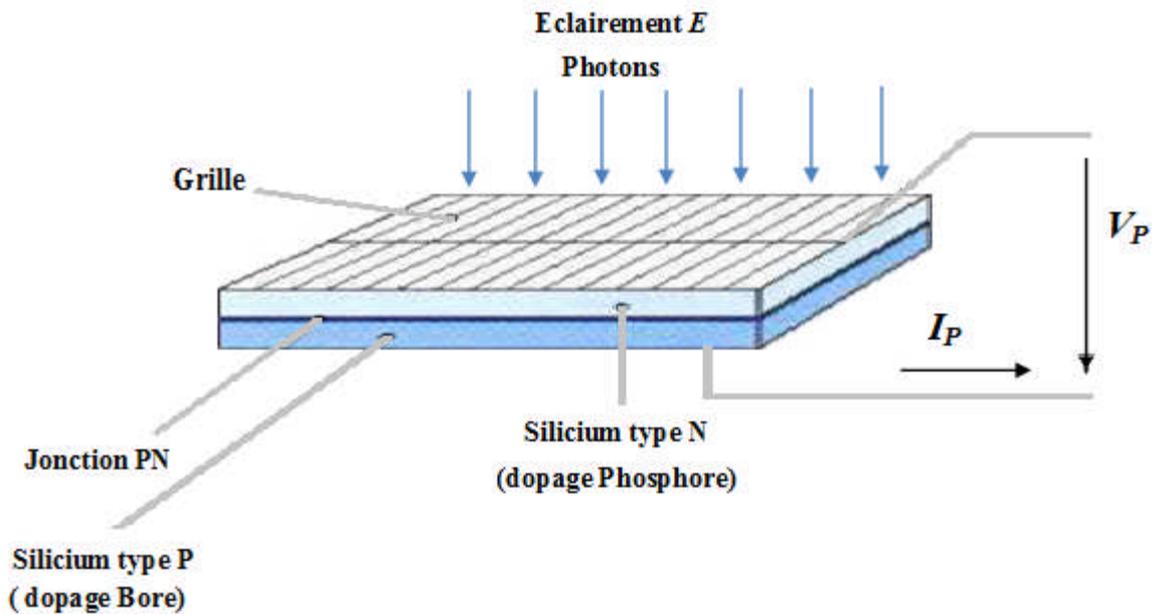


Figure I.10 : Production d'électricité par la séparation électron-trou [18]

### I.5.2 Les différentes technologies

Le matériau de base utilisé actuellement est le silicium. Celui-ci se trouve en très grande quantité sur notre planète puisqu'il constitue environ 28% de l'écorce terrestre. En fait on le trouve surtout sous forme de dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) qui est le constituant principal du sable. Il est donc abondant et peu coûteux.

Quelques unes de ces propriétés sont données au tableau ci-dessous :

Tableau I.2 : Caractéristiques du silicium

Symbole	Propriété	Valeur
<b>Si</b>	nombre atomique	14
	Masse atomique	28.086
	Masse volumique	2330 kg/m <sup>3</sup>
	température de fusion	1683 K
	Température d'ébullition	2628 K
	Coefficient de dilatation thermique	4,2 · 10 <sup>-6</sup> /K

Cependant, pour être utilisable en électronique, le silicium doit être très pur. Il suffit d'un atome d'impureté sur un million pour multiplier les porteurs de charge par dix millions. Cette pureté coûte très cher à obtenir [19].

Il existe plusieurs types de cellules en fonction de la structure microscopique du silicium :

#### I.5.2.1 Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

**Avantage :**

- Très bon rendement (17.2%).

**Inconvénients :**

- Coût élevé;
- Rendement faible sous un faible éclairement.

**I.5.2.2 Cellule en silicium polycristallin**

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

**Avantages :**

- Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin;
- Moins cher que le monocristallin.

**Inconvénients :**

- Les mêmes que le monocristallin.
- Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité prix).

**I.5.2.3 Cellule en silicium amorphe**

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres.

**Avantages :**

- Fonctionnement avec un éclairement faible;
- Moins chères que les autres.

**Inconvénients :**

- Rendement faible en plein soleil (environ 7%);
- Performances diminuent sensiblement avec le temps.

On trouve aussi certaines cellules qui utilisent d'autres matériaux [19] :

- ❖ Arséniure de galium (**GaAs**) : Matériau monocristallin, qui fournit des cellules en couches minces ayant un très bon rendement mais dont le prix les destine au domaine spatial.
- ❖ Le Tellure de Cadmium (**CdTe**) : Le rendement de conversion obtenu pour cette filière est nettement plus satisfaisant. Cependant, la limite principale au déploiement de grande ampleur de cette technologie reste la toxicité du cadmium.
- ❖ Le Cuivre Indium Sélénium (**CIS**) : Cette filière plus complexe à maîtriser présente un fort potentiel de développement dans le futur (jusqu'à 20% de rendement en

laboratoire). Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grande quantité.

- ❖ Dioxyde de titane (**TiO<sub>2</sub>**) : Cette technologie en est au stade expérimental.

Ces technologies sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements bien supérieurs au silicium et une durée de vie plus grande.

D'autres technologies prometteuses comme les matériaux organiques, les matériaux nanocristallins ou les structures multi-jonctions laissent présager d'excellentes performances futures et sont aujourd'hui au stade de la recherche [20].

#### I.5.2.4 Comparatif des différentes technologies [21]

Tableau I.3 : Comparatif des différentes technologies [21]

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
<b>Silicium monocristallin</b>	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	*Très performant *Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades...
<b>Silicium polycristallin</b>	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
<b>Amorphe</b>	5 à 8% (13% en laboratoire)		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

### I.5.3 Caractéristique courant tension et schéma équivalent

La partie principale d'une cellule photovoltaïque est une jonction PN. C'est l'éclairement de cette jonction qui va générer des porteurs de charges et permettre de récupérer une puissance électrique. On distingue deux régimes de fonctionnement qui dépendent de la polarisation de la diode : la polarisation directe qui correspond au régime passant (si le potentiel appliqué est supérieur à celui de la barrière de potentiel  $V_0$ ) et la polarisation inverse qui correspond au régime bloqué (figure I.11) : courbe sous obscurité).

En régime passant, la barrière du potentiel est levée, les porteurs majoritaires peuvent traverser la jonction sans être bloqués, un courant apparaît. En régime bloqué, seuls les porteurs minoritaires peuvent créer un courant dans la diode car ils n'ont pas de barrière de potentiel qui les retiennent. Ce courant est le courant  $I_s$  ou courant de saturation.

#### I.5.3.1 La caractéristique sous obscurité

Le courant dans une telle structure de type jonction P-N est appelé courant d'obscurité et il a la forme suivante :

$$I_{Obs} = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{n.K.T}\right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

Avec :

q : La charge de l'électron ( $q = 1.6.10^{-19}$  C),

V : La tension aux bornes de la cellule (V),

K : La constante de Boltzmann ( $K = 1.38.10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>),

T : La température effective de la cellule (K).

Ce courant d'obscurité correspond au courant de diode ( $I_D$ ), le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit alors :

$$I(v) = I_{Ph} - I_{Obs}(v) \quad (I.4)$$

$$I(v) = I_{Ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{m.K.T}\right) - 1 \right] \quad (I.5)$$

Ainsi, dans une cellule solaire deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et le courant d'obscurité. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode tandis que sous éclairement la caractéristique à l'allure présentée sur la figure (I.11).

#### I.5.3.2 La caractéristique sous éclairement

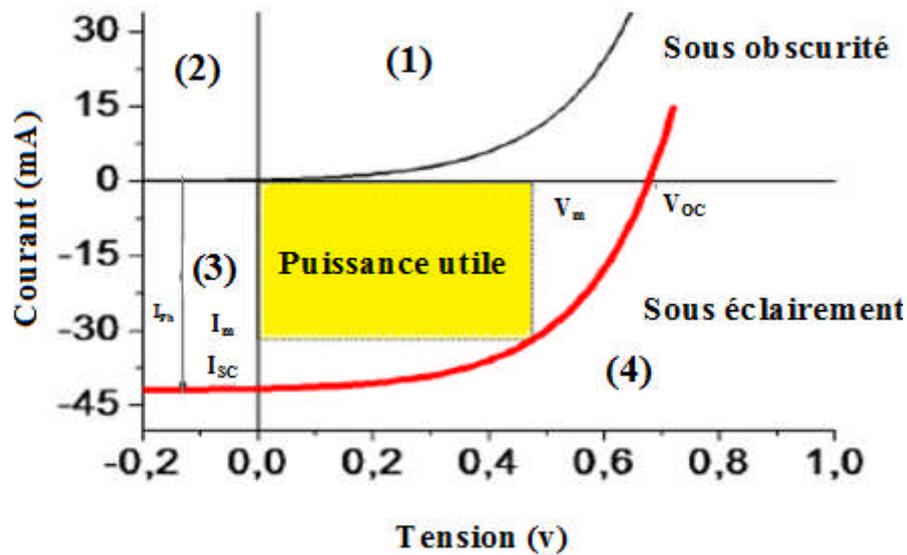
Les photons incidents vont générer des paires électron/trou dont le comportement va différer selon la zone d'absorption :

- Dans la zone de charge d'espace (ZCE) engendrée par la jonction P-N, les paires électron/trou créées sont dissociées par le champ électrique. Les électrons sont

accélérés puis injectés dans la zone **N** (émetteur) et les trous dans la zone **P** (base). Un courant (photocourant) de génération est créé ;

- Dans les zones de base et d'émetteur, les porteurs minoritaires générés (trous dans l'émetteur et électron dans la base) vont diffuser vers la ZCE. S'ils atteignent cette dernière avant de se recombiner, ils seront injectés dans la zone **N** pour les électrons et dans la zone **P** pour les trous et deviendront majoritaires. Un photocourant de diffusion est créé.

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



**Figure I.11** : Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairage et sous obscurité

Nous allons maintenant nous intéresser uniquement au quadrant (4) pour la réalisation de générateurs photovoltaïques à partir de cellules photovoltaïques. Pour cela, nous allons représenter les caractéristiques dans un nouveau repère I-V donné par la figure (I.12) où le courant de saturation inverse est compté positivement.  $I_{sc}$  représente le courant de court circuit et  $V_{oc}$  la tension en circuit ouvert de la cellule photovoltaïque [22].

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point  $P_m$  où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)) [23].

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure (I.12). Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.

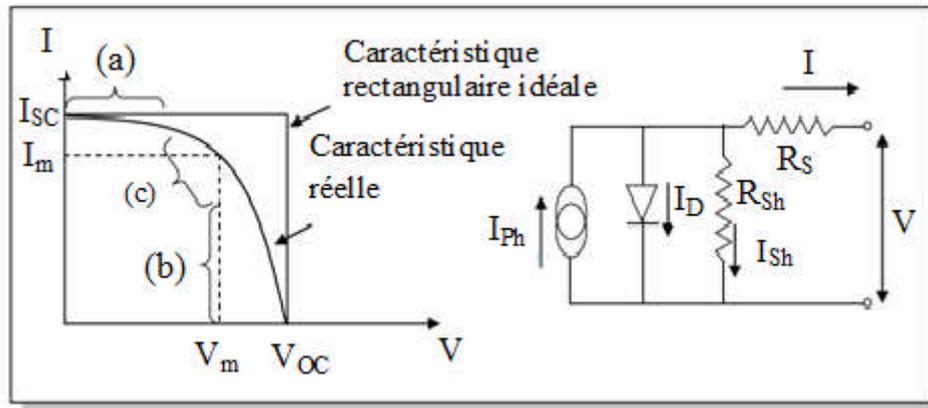


Figure I.12 : Caractéristique et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{sc}$  proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{oc}$ ,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement [24].

➤ **Courant de court-circuit,  $I_{sc}$**

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

➤ **Tension à circuit ouvert,  $V_{oc}$**

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.6)$$

➤ **Facteur de forme, FF**

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée  $P_m$ ) pour un point de fonctionnement  $P_m (I_m, V_m)$  de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et  $I_{sc}$  et tension comprise entre 0 et  $V_{oc}$ ). Le nom "facteur de forme" (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_m}{V_{OC} \times I_{SC}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (I.7)$$

La puissance maximale délivrée à la charge est présentée par le rectangle hachuré (Figure I.11)

$$P_m = V_m \times I_m \quad (I.8)$$

#### ➤ Rendement de conversion $\eta$

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

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{OC} \times I_{SC}}{P_{in}} \quad (I.9)$$

$P$  : Puissance incidente =  $P$  solaire =  $100 \text{ W/cm}^2$ ;

La densité de puissance incidente égale à  $\frac{P_{in}}{S}$ ;

$S$  : Surface de la cellule.

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

### I.5.4 Facteurs limitant le rendement d'une cellule photovoltaïque

La quantité d'énergie produite par un système photovoltaïque dépend fortement, des caractéristiques électromécaniques de chacun des éléments du système, de la surface du champ capteur, de la quantité d'énergie solaire incidente sur la surface de la partie captation de ce système, de la température ambiante qui influe aussi sur la réponse de ce type de système [25].

#### I.5.4.1 Influences des facteurs internes

##### I.5.4.1.1 Influence de la résistance série

La résistance série ( $R_S$ ) est une résistance qui due aux différentes résistances électrique que le courant rencontre sur son parcours. Elle représente la résistance du semi-conducteur constituant la jonction ainsi que les contacts métalliques et le câblage.

Son effet se traduit par une réduction de la tension autour de  $V_{OC}$  (ne modifier pas la tension de circuit ouvert, mais lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit) ce qui provoque une modification de l'allure de la courbe I-V autour de  $V_{OC}$  comme le montre la figure (I.13). Il s'ensuit une baisse de la puissance optimum, la tension  $V_0$  s'écrit alors :

$$V_0 = V + R_S I \quad (I.10)$$

Cette baisse de puissance provoque la diminution de la pente de la courbe I-V dans la zone où la cellule fonctionne comme un générateur à tension pratiquement constante [26].

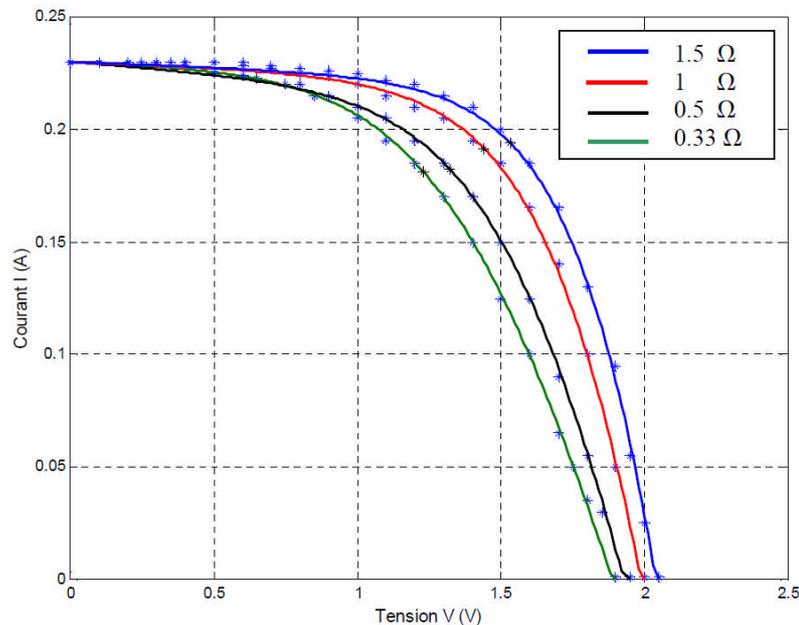


Figure I.13 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V de la cellule

#### I.5.4.1.2 Influence de la résistance shunt

Elle caractérise un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière. Elle est généralement très supérieure à la résistance série  $R_S$ . La résistance shunt représente également les pertes à travers la jonction, autour des bords de la cellule et dans les régions non périphérique, en présence des défauts du cristal et de la précipitation des impuretés étrangères dans la région de la jonction. Ainsi donc, nous pouvons dire que  $R_{Sh}$  est liée au processus de fabrication.

Son influence ne se fait sentir que pour les faibles valeurs de la tension. Cette influence se traduit par une diminution de la courbe I-V (on peut facilement percevoir une anomalie à la lecture de la caractéristique par la présence d'une légère pente au voisinage du point de courant de court circuit), dans la zone correspondant à un fonctionnement comme générateur à courant constant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo courant  $I_{Ph}$  une valeur de courant égale à :  $\frac{V_0}{R_{Sh}}$

Une résistance série trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile ; en outre, une photopile dont la résistance shunt trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairage [27].

La figure (I-14) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme générateur à courant constant [28].

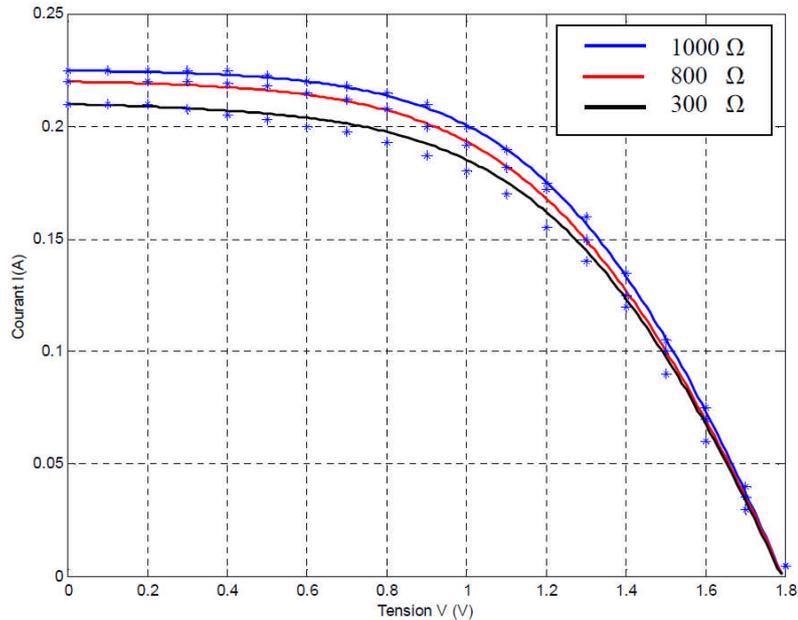


Figure I.14 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V de la cellule solaire

### I.5.4.1.3 Détermination de la résistance série et de la résistance parallèle

Dans le circuit équivalent d'une cellule réelle, représenté sur la figure (I.12), on peut observer la présence de deux résistances, une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance parallèle ou résistance shunt ( $R_{sh}$ ). La résistance série rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal. Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique I-V pour une tension  $V$  égale à  $V_{oc}$ , comme la montre la Figure (I.15). La résistance shunt traduit la présence de courants de fuite dans la diode dus à la recombinaison des porteurs à proximité des sites de dissociation des charges (à l'interface et aux électrodes). La valeur de la résistance shunt est égale à l'inverse de la pente de la caractéristique au point de court-circuit ( $V=0$  V) comme on l'observe sur la Figure (I.15). Le cas d'une cellule photovoltaïque idéale est représenté par une résistance série égale à zéro et une résistance shunt égale à l'infini [29].

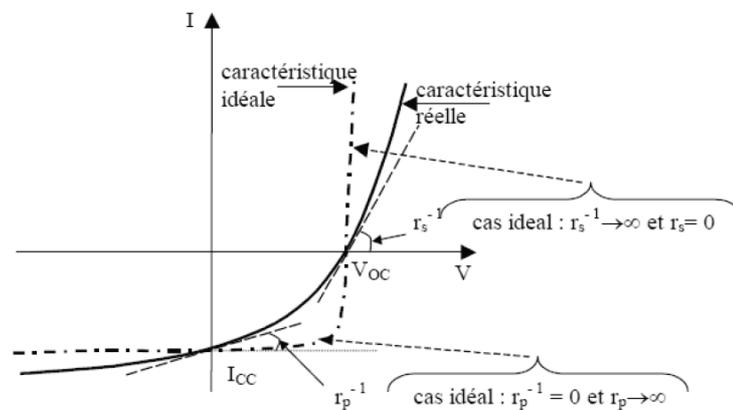


Figure I.15 : Résistance Série et Shunt

### I.5.4.2 Influences des facteurs externes

#### I.5.4.2.1 Influence de l'éclairement

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique I-V suivant l'axe des courants.

L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [30].

L'influence du flux lumineux sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure (I-16) à une température constante  $T = 25^\circ\text{C}$ .

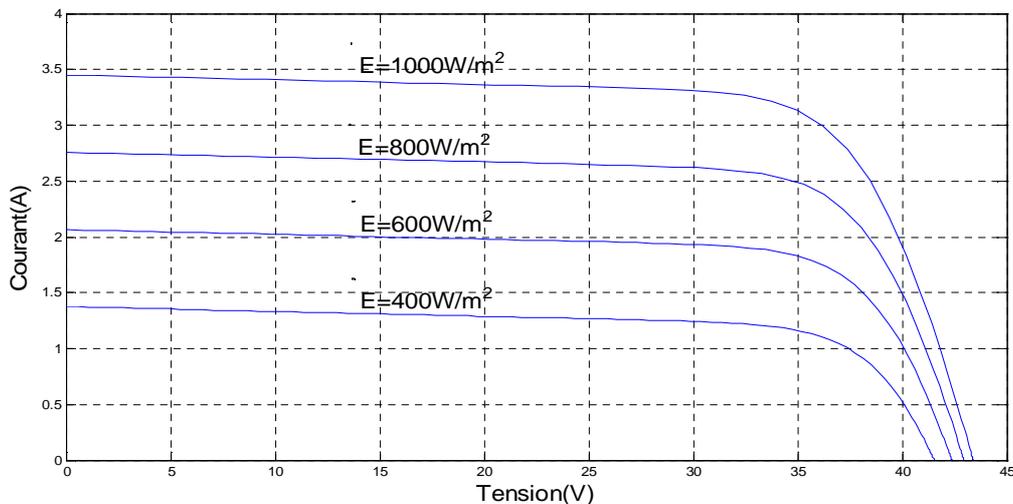


Figure I.16 : Influence du flux sur la caractéristique I-V de la cellule solaire

#### I.5.4.2.1 Influence de la température

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant  $I_{\text{ph}}$  augmente également due principalement à la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Cette augmentation est de l'ordre de 0,1% par degré Celsius. Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite et entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 mV/°C par cellule [31]. La diminution de la puissance fournie est estimée environ de 0,5% par degré pour un module [32].

L'influence de la température sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure (I.17) pour un éclairement fixe  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ .

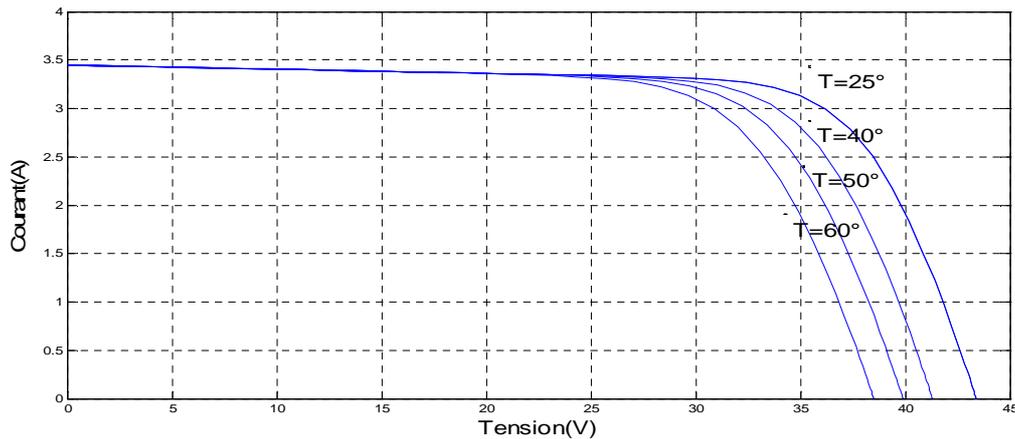


Figure I.17 : Influence de la température sur la caractéristique I-V de la cellule

### I.5.5 Architecture classique d'un générateur photovoltaïque

Dans des conditions d'ensoleillement standard ( $1000\text{W/m}^2$  ;  $25^\circ\text{C}$  ; AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de  $150\text{ cm}^2$  est d'environ  $2.3\text{ W}_C$  sous une tension de  $0.5\text{V}$ . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires [33].

#### I.5.5.1 Association en série des cellules photovoltaïques

Une association de  $n_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, (Figure I.18). L'équation (I.11) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $n_s$  cellules.

$$V_{OC\ n_s} = n_s \cdot V_{OC} \text{ Avec } I_{SC\ n_s} = I_{SC} \quad (\text{I.11})$$

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ( $V_{\text{cons}}=0.6\text{V}\times 36=21.6\text{V}$ ) afin d'obtenir une tension optimale du panneau proche de celle d'une tension de batterie de  $12\text{V}$ .

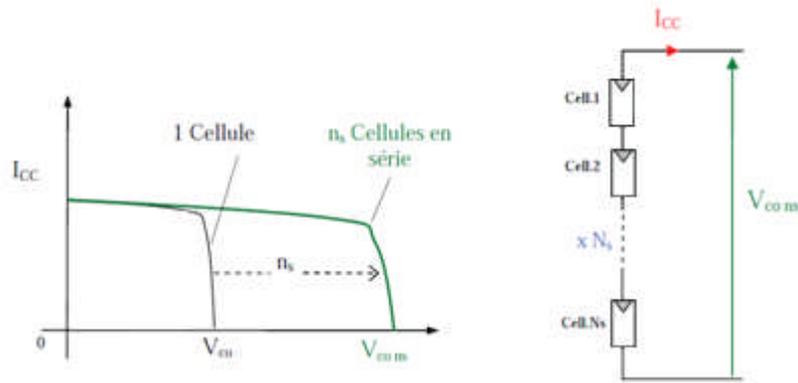


Figure I.18 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $n_p$  cellules en série

### I.5.5.2 Association parallèle des cellules photovoltaïques

Une association parallèle de  $n_p$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, (Figure I.19). L'équation (I.12) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $n_p$  cellules.

$$I_{SC\ n_p} = n_p \cdot I_{SC} \quad \text{Avec} \quad V_{OC\ n_p} = V_{OC} \quad (I.12)$$

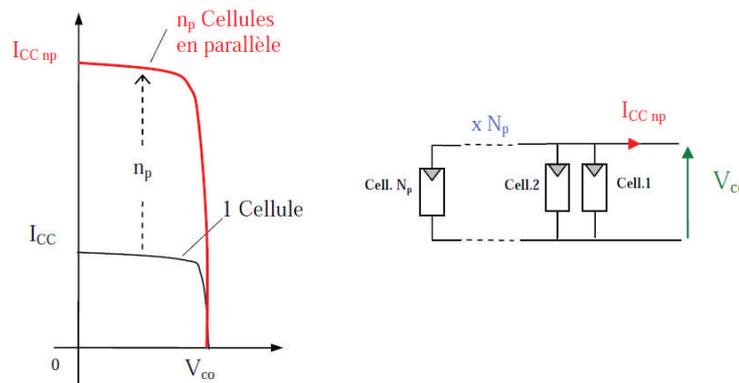


Figure I.19 : Caractéristiques résultant d'un groupement de  $n_p$  cellules en parallèle

### I.5.5.3 Association hybride (en série et en parallèle)

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

$$I_{SC}^t = n_p \cdot I_{SC} \quad (I.13)$$

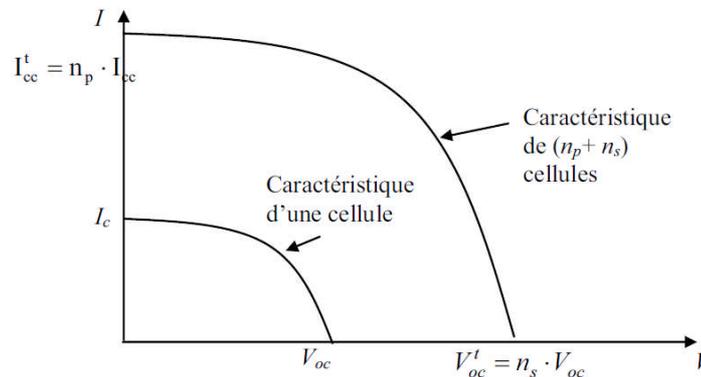
$$V_{OC}^t = n_s \cdot V_{OC} \quad (I.14)$$

Avec :

$n_p$ : nombre des cellule en parallèle,

$n_s$  : nombre des cellule en série.

La figure (I.20) montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série  $n_s$  et en parallèle  $n_p$ , cellules identiques.



**Figure I.20 :** Caractéristique résultante d'un groupement hybride de  $(n_p + n_s)$  cellules identiques

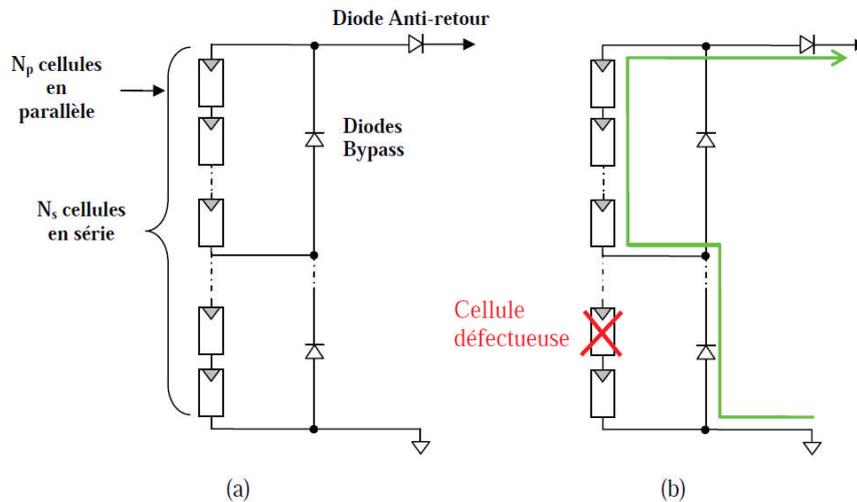
Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit  $I_{sc}$  et de la tension à vide  $V_{oc}$  sont plus ou moins importantes (figure I.20). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) [34].

#### I.5.5.4 Protection des générateurs photovoltaïques

La caractéristique I-V d'un générateur solaire peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de  $n_s, n_p$  cellules en série/parallèle. La caractéristique globale peut, en outre, varier en fonction de l'éclairement, la température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement. De plus, il suffit d'une occultation ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant solaire produit par le module photovoltaïque. Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et devient un élément récepteur. Celle-ci se retrouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. C'est le phénomène dit de hot spot ou « point chaud » [35, 36, 37].

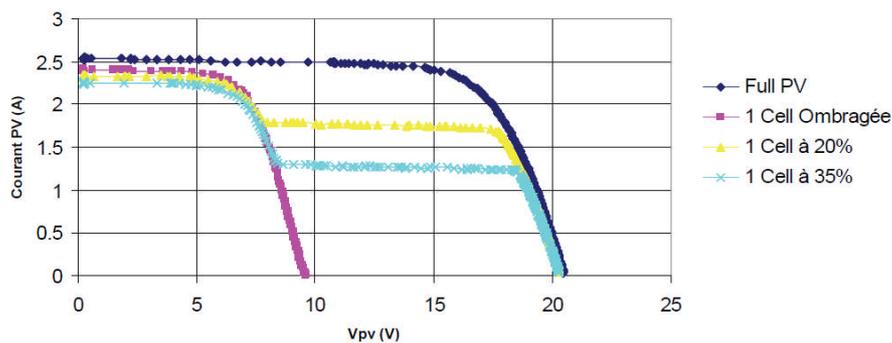
Pour remédier à ce phénomène, on équipe donc les panneaux photovoltaïques de diodes by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives (Figure I.21. a). Des mesures réalisées sur un module photovoltaïque commercial de 85 W<sub>c</sub> sur lequel on occulte volontairement (à différents niveaux d'ombrage) une des 36 cellules qui composent ce générateur sont consignées en Figure (I.22). On observe bien la déformation de la courbe I-V liée à un effet d'ombrage partiel du module PV. La diode by-pass lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du panneau comme indiqué en Figure (I.21.b), évitant ainsi la circulation de courants inverses au sein des cellules défectueuses. Par contre, cette solution efficace réduit d'autant la puissance délivrée ainsi que la tension aux bornes du panneau. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associé à la cellule défectueuse et protégée par la diode by-pass à ne pas produire de puissance. Ce

phénomène de perte partielle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protections [38,39].



**Figure I.21 :** (a) Architecture Classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation  $I_{pv}$

Une autre protection consiste à protéger le module photovoltaïque contre les courants négatifs qui pourraient être générés lors de différentes connexions en parallèle de plusieurs panneaux (lorsque le panneau devient récepteur plutôt que générateur). Ainsi, une diode anti retour est mise en série avec chaque branche d'un GPV. Le risque est que des chaînes de cellules fortement éclairées débitent dans des chaînes soumises à moins d'éclairement. Il est à souligner que la présence de cette diode anti-retour permet d'éviter tous les courants négatifs y compris provenant de la charge (comme une batterie par exemple fonctionnant tout le temps et pouvant débiter sur le GPV la nuit).



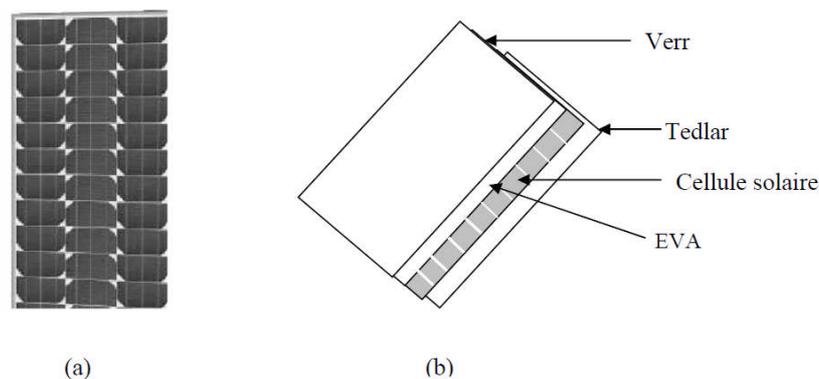
**Figure I.22 :** Caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  d'un panneau photovoltaïque BP 585 et effet d'occultation d'une des 36 cellules qui composent le module PV

On s'aperçoit donc que la maîtrise de cette énergie photoélectrique n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît. La production de courant dans un module photovoltaïque du commerce est donc limitée par la cellule la plus faible de l'ensemble. Généralement, lors de l'assemblage des cellules, il est nécessaire de les trier en fonction de leurs caractéristiques

électriques afin d'obtenir une association homogène et ainsi éviter de limiter la puissance fournie par un panneau à cause d'une dispersion des cellules. De plus, le vieillissement des cellules peut produire une dispersion des caractéristiques. Les conditions météorologiques auxquelles les modules sont soumis (ensoleillement inhomogène, température, salissures, neige, pluie, dépôt de feuilles mortes, ...) fait de l'énergie photovoltaïque une ressource difficilement maîtrisable. Actuellement, pour en faire une source d'énergie proprement dite, un grand nombre de chercheurs du monde entier travaillent pour la rendre plus abordable en termes de flexibilité, de rendement et de coûts.

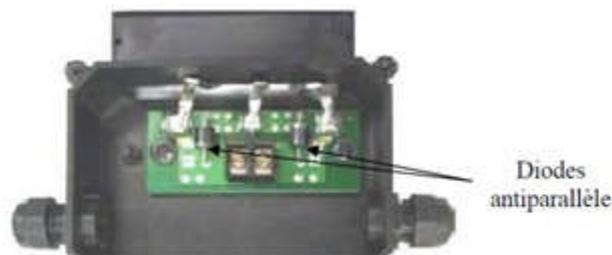
## I.6 Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module (figure I.23). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) (figure I.23.b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière de polyéthylène [40].



**Figure I.23 :** Module photovoltaïque

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles (figure I.24). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [41].



**Figure I.24 :** Boîte de jonction

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

Les modules en silicium mono cristallin (c-Si, 64% de marché), poly cristallin ou multi cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-Si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24,48) V et des puissances entre 10 et 100  $W_c$  (watt- crête : puissance obtenue pour (l'ensoleillement maximal) [40].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [42].

### I.6.1 Caractéristiques d'un module [43]

- **La puissance de crête,  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- **La caractéristique I-V** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide,  $V_{oc}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit,  $I_{sc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum, ( $V_m, I_m$ )** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = V_m \times I_m$
- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{oc} \times I_{sc}$ .

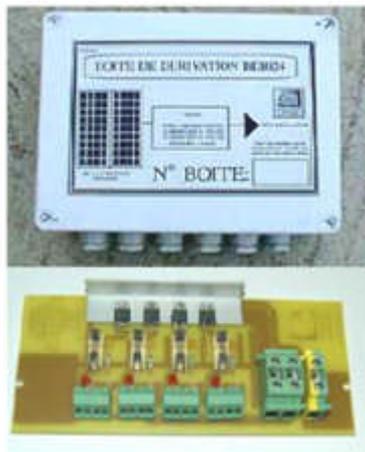
## I.7 Le panneau solaire

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



**Figure I.25 :** Panneau solaire -Site de Ghardaïa (URAER)

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, comme l'illustre la figure (I.26), Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.



**Figure I.26 :** Boîte de dérivation

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur le quel se trouvent :

- Des diodes schotcky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte. Le câblage de ces boites permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- Des besoins en électricité.
- La taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage.

## I.8 Les systèmes photovoltaïques

Le système solaire est un système constitué d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie solaire reçue, directement [44, 45] ou indirectement [46] en énergie électrique.

### I.8.1 Les principaux composants d'un système solaire photovoltaïque

Un système solaire photovoltaïque est généralement constitué de trois ou quatre éléments principaux [47, 48] :

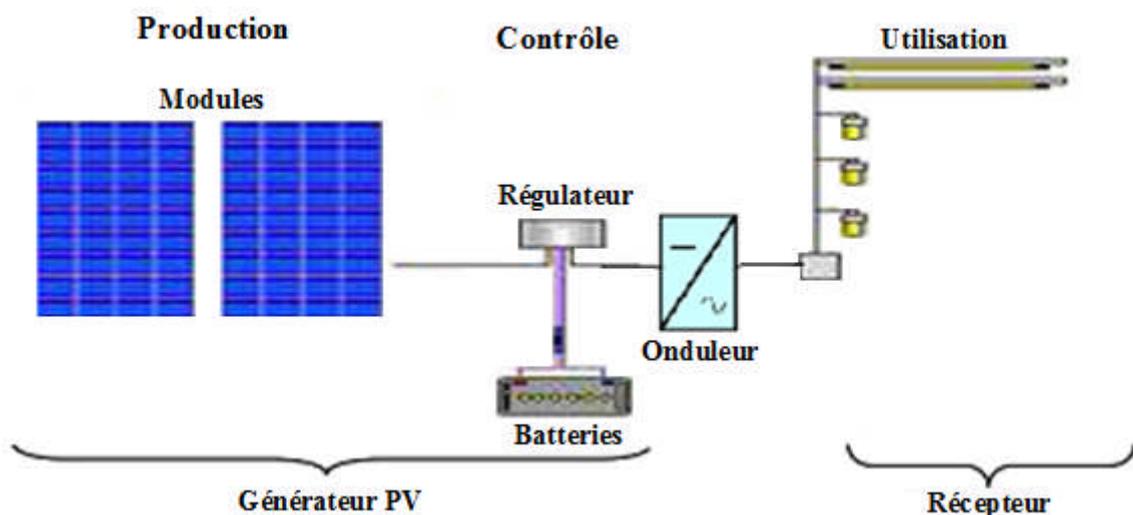


Figure I.27 : Eléments d'un système photovoltaïque

- **Le générateur photovoltaïque :** qui représente l'outil de conversion de l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Il est composé d'un ensemble de panneaux. Le panneau est constitué de plusieurs modules (structurés en série ou en parallèle ou hybride). Le module contient des rangés de cellules (structurées en série ou en parallèle ou hybride) et généralement des cellules à base de silicium.
- **Le système de stockage d'énergie (batterie ou accumulateur) :** qui a le rôle de stocker l'énergie émise par le générateur photovoltaïque et permet par la suite :
  - un déphasage entre la production et la consommation (jour/nuit, mauvais temps) ;
  - une puissance élevée, sur un temps court, compatible avec la production journalière, avec une puissance crête installée faible.

Il faut noter que le stockeur d'énergie n'est pas toujours parmi les composants d'un système solaires photovoltaïque, car il peut être indisponible et cela selon les besoins.

- **Le système de contrôle (régulateur) :** qui assure la sécurité et le bon fonctionnement de la batterie (en cas d'un système avec batterie), plus le fonctionnement optimal de tout le système photovoltaïque. Il est composé généralement d'un hacheur (dévolteur, survolteur ou les deux au même temps) et des jeux de contact. Les hacheurs ou les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Les convertisseurs statiques sont constitués de composants actifs et passifs sophistiqués et performants qui admettent cependant un certain nombre de limitations qui ne sont pas sans conséquence sur la synthèse des boucles de commande. Ainsi, les pertes par commutation limitent la fréquence de commutation, la durée de vie des porteurs impose indirectement des butées de rapport cyclique.

Le système d'interconnexion, qui relie le générateur photovoltaïque (producteur d'électricité) au consommateur (consommateur d'électricité). C'est un système simple (câbles seulement) ou composé (hacheur, onduleur ou les deux au même temps).

### I.8.2 Classification d'un système solaire photovoltaïque

Les systèmes solaires photovoltaïques sont réparties en trois classes :

- **Le système photovoltaïque autonome :** ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique, et cela à l'aide de plusieurs composants mais le plus importants ce sont les batteries qui aident à emmagasiner de l'énergie électrique. Il faut mentionner que les batteries les plus utilisées dans le marché actuellement sont: Accumulateurs au plomb-acide, Accumulateurs au nickel-cadmium [47] :
- **Le système photovoltaïque non autonome :** ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique plus l'aide d'autres sources d'énergie électrique. Il faut noter que les deux systèmes autonome et non autonome sont de même dimension.
- **Système PV hybride :** Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes PV sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année), lorsque l'énergie doit être fournie sur demande ou si le budget est limité.

### **I.8.3 Utilisation des systèmes photovoltaïque**

- L'éclairage (autoroutes, arrêts d'autobus...);
- Les communications (stations de relais de téléphone, bornes d'appel d'urgences sur autoroutes, téléphone mobile);
- La fourniture d'électricité pour des sites éloignés du réseau normal (forêts, montagnes...);
- Capteurs isolés (Infos météorologique, enregistrements sismiques, recherches scientifiques...);
- Pour de petites stations de pompage ou d'irrigation;
- Chargement des batteries de voitures (les batteries normales, ou de voitures électriques);
- Protection contre la corrosion (car les pipe-lines et autres tuyaux enfouie sous terre ou dans l'eau perdent des ions et rouillent, on peut les protéger en appliquant une différence de potentiel, donc un courant électrique);
- Evidement l'utilisation de cellules photovoltaïques est plus efficace dans les régions très ensoleillées [49], telles que les Etats-Unis ou les pays du sud en général, mais cela ne veut pas dire qu'on ne peut pas les utiliser dans le reste de monde ;
- Compensation de facteur de puissance dans les réseaux électriques de distribution [50].

## **I.9 Avantages, inconvénients et limites de l'énergie photovoltaïque**

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont [51] :

### **Avantages :**

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie où à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- Ils ne consomment aucun combustible fossile.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- Ils ont une longue durée de vie.

- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

**Inconvénients :**

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %.
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (< 30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Le stockage de l'énergie électrique dans des accumulateurs qui sont les plus souvent des batteries au Plomb. Sachant que les batteries ne doivent pas se décharger à plus de 60% (70% maximum) de leur capacité maximale. En outre, les batteries ont une faible durée de vie (3 à 5ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement.

**Limites :**

- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie comme le chauffage. Si vous souhaitez utiliser l'énergie solaire à cette fin, considérez d'autres solutions de recharge comme un chauffe-eau solaire, qui produit de la chaleur beaucoup plus efficacement [52].
- Les systèmes raccordés au réseau sont rarement économiques, surtout parce que le coût actuel de la technologie PV est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie.

**I.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, Nous avons rappelé quelques notions de base sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leurs rendement, puis nous avons abordé l'influence de ces paramètres sur la caractéristique des cellules solaires, ainsi que l'architecture classique d'un générateur photovoltaïque ,finalement, nous avons présenté le module, le panneau et les systèmes photovoltaïques. Dans le chapitre suivant nous aborderons l'aspect lié à la modélisation de la cellule ou du module solaire photovoltaïque (PV).

*Chapitre II*  
*Présentation des Différents*  
*Modèles d'une Cellule*  
*Photovoltaïque*

## **II.1 Introduction**

La modélisation d'un système physique conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce système, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle et de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité.

La cellule solaire est un dispositif semi-conducteur dont le modèle mathématique est toujours lié à ce qu'on veut en faire, mais reste toujours basé sur un circuit électrique avec différents paramètres intervenant dans le calcul de la paire courant-tension.

Une cellule solaire est représentée (dans la littérature) par plusieurs modèles, chacun d'eux est régi par une expression mathématique (analytique) en fonction des paramètres technologiques de la cellule tels que le courant, la tension.

Ce chapitre est consacré à la présentation et la modélisation des différents modèles existant dans la littérature de la cellule photovoltaïque.

## **II.2 Modèles électriques [1]**

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie.

Rauschenbach (1980) et Townsend (1981) ont prouvé que des cellules photovoltaïques peuvent être modélisées par un circuit électrique équivalent qui contient des paramètres ayant des significations liées aux phénomènes physiques de la cellule.

Rauschenbach (1980) et Green (1981) ont passé en revue plusieurs circuits équivalents et ils ont recommandé l'utilisation de circuit d'une seule diode à quatre paramètres.

Roger (1984), Appelbaum (1987), Ekstein (1990), Duffie et Beckmann (1991) et Alghuwainem (1992) ont employé le modèle à quatre paramètres.

Dans ce qui suit on récapitule les différents modèles électriques des cellules photovoltaïques :

### **II.2.1 Modèle idéale d'une cellule solaire [1]**

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est basée sur une jonction p-n).

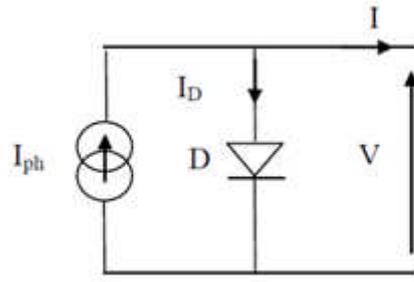


Figure II.1 : Circuit idéal d'une cellule photovoltaïque

Par l'application de la loi des mailles sur ce circuit on trouve :

$$I = I_{Ph} - I_D \quad (\text{II.1})$$

$$I = I_{Ph} - I_S \left( \exp \left( \frac{qV}{m \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

I : Courant fourni par la cellule [A]

$I_{ph}$  : Photocourant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident);

$I_D$ : Courant de la diode ;

V : Tension aux bornes de la cellule [V]

m : Facteur d'idéalité de la jonction PN compris entre 1 et 2.

Il permet de tenir compte des différentes composantes du courant direct circulant dans la jonction :

- les composantes dues aux recombinaisons dans les régions N et P constituent des courants de diffusion des électrons et des trous ( $m=1$ ),
- La composante due aux recombinaisons dans la zone de charge d'espace constitue le courant de recombinaison de la jonction ( $m=2$ ).

$I_S$  : Courant de saturation de la diode [A];

q : Charge de l'électron [ $1,6 \cdot 10^{-19}$  C];

K : Constant de Boltzmann [ $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K];

T : Température effective de la cellule [K].

### II.2.2 Modèle explicite

Ce modèle nécessite les données de quatre paramètres à savoir le courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ), la tension à circuit ouvert ( $V_{OC}$ ), le courant maximal ( $I_m$ ) et la tension maximale ( $V_m$ ) [53,54]. La relation entre le courant I et la tension V est donnée par :

$$I = I_{SC} \left[ 1 - C_1 \left( \exp \left( \frac{V}{C_2 V_{OC}} \right) - 1 \right) \right] \quad (\text{II.3})$$

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{SC}} \right) \exp \left( \frac{-V_m}{C_2 V_{OC}} \right) \quad (\text{II.4})$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_m - 1}{V_{OC}}}{\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{SC}}\right)} \quad (II.5)$$

Les constantes  $C_1$  et  $C_2$  sont évaluées au début de l'itération, tandis que l'équation (II.3) est évaluée à chaque pas d'itération.

### II.2.3 Modèle à cinq paramètres [55,59]

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le circuit électrique suivant :

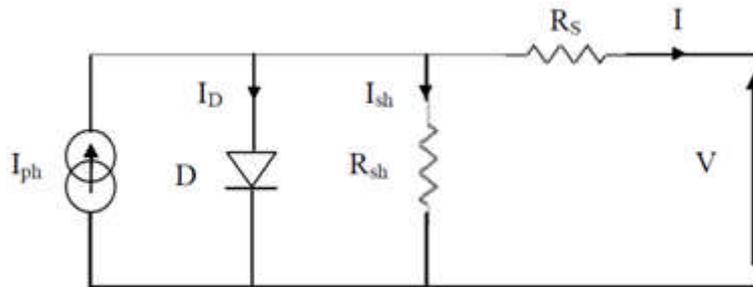


Figure II.2 : Circuit équivalent d'une cellule solaire

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

$$I_{Sh} = \frac{V + IR_S}{R_{Sh}} \quad (II.6)$$

Donc l'expression de la caractéristique I-V est :

$$I = I_{Ph} - I_S \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{mkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{Sh}} \quad (II.7)$$

Pour un éclairement et une température donnés, les cinq paramètres  $I_{ph}$ ,  $I_S$ ,  $R_S$ ,  $R_{sh}$  et  $m$  peuvent être déterminés à partir des données suivantes qui sont la tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ), la tension et le courant au point de maximum de puissance ( $V_m$  et  $I_m$ ) et les pentes au voisinage de  $V_{oc}$  et de  $I_{sc}$ .

Les paramètres du modèle sont donnés par les équations (II.8 – II. 14).

En appelant :

$$\left(\frac{dV}{dI}\right) |_{V=V_{oc}} = -R_{S0} \quad (II.8)$$

$$\left(\frac{dV}{dI}\right) |_{I=I_{sc}} = -R_{Sh0} \quad (II.9)$$

Les équations obtenues sont :

$$m = \frac{V_m + I_m R_{S0} - V_{OC}}{V_t \left[ \ln \left( I_{SC} - \frac{V_m}{R_{Sh}} - I_m \right) - \ln \left( I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{Sh}} \right) + \left( \frac{I_m}{I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{Sh0}}} \right) \right]} \quad (II.10)$$

$$I_S = \left( I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{Sh}} \right) \exp \left( - \frac{V_{OC}}{m V_t} \right) \quad (II.11)$$

$$R_S = R_{S0} - \frac{m V_t}{I_S} \exp \left( - \frac{V_{OC}}{m V_t} \right) \quad (II.12)$$

$$I_{Ph} = I_{SC} \left( 1 + \frac{R_S}{R_{Sh}} \right) + I_S \left( \exp \frac{I_{SC} R_S}{m V_t} - 1 \right) \quad (II.13)$$

$$R_{Sh} = R_{Sh0} \quad (II.14)$$

#### II.2.4 Modèle à quatre paramètres (simplifié)

Pour utiliser ce modèle simplifié, il convient de faire les hypothèses suivantes [56] :

- La résistance  $R_{Sh}$  est très grande :  $\frac{V_{OC}}{R_{Sh}} \ll I_{SC}$
- Le courant photogénéré,  $I_{ph}$ , et le courant de court-circuit,  $I_{SC}$ , sont égaux
- $\exp \frac{V + I R_S}{m V_t}$
- $m=1$
- condition de circuit ouvert :

$$I_S = I_{SC} \exp \left( - \frac{V_{OC}}{m V_t} \right) \quad (II.15)$$

Le schéma équivalent de ce modèle est donné dans la figure (II.3):

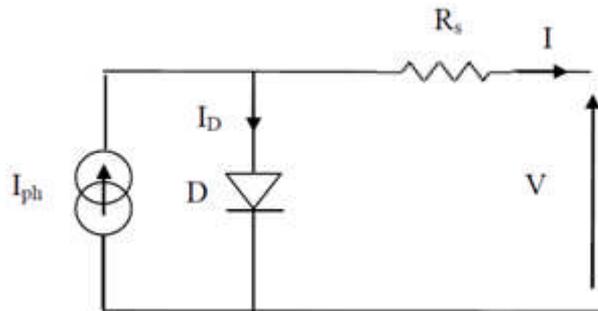


Figure II.3 : Circuit équivalent de modèle à quatre paramètres

On appliquant la loi des mailles on obtient

$$I = I_{SC} \left[ 1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + I R_S}{m V_t}\right) \right] \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$FF_0 = \frac{V_{OC} - \ln(V_{OC} + 0.72)}{V_{OC} + 1} \quad (\text{II.17})$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{V_{OC} I_{SC}} = FF_0 (1 - r_s) \quad (\text{II.18})$$

Étant :

$$r_s = R_S \left(\frac{I_{SC}}{V_{OC}}\right) \text{ Et } v_{OC} = \left(\frac{V_{OC}}{m V_t}\right) \quad (\text{II.19})$$

La valeur empirique 0,72 de l'équation (II.17) est valable uniquement pour les modules de silicium cristallin.

### II.2. 5 Modèle à deux diodes [57, 58,59]

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (II.4), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

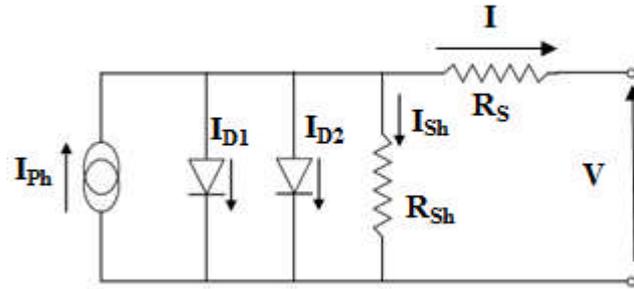


Figure II.4 : Schéma équivalent à deux diodes

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{Ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{Sh} \quad (\text{II.20})$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_{D1} = I_{S1} \left( \exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{AKT}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.21})$$

$$I_{D2} = I_{S2} \left( \exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{AKT}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$I_{S1}$ ,  $I_{S2}$  courant de saturation des diodes

$$I = I_{Ph} - I_{S1} \left( \exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{AKT}\right) - 1 \right) - I_{S2} \left( \exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{AKT}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V + R_S I}{R_{Sh}}\right) \quad (\text{II.23})$$

### II.2.6 Modèle à deux diodes sans résistance shunt

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit (figure II.5), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série.

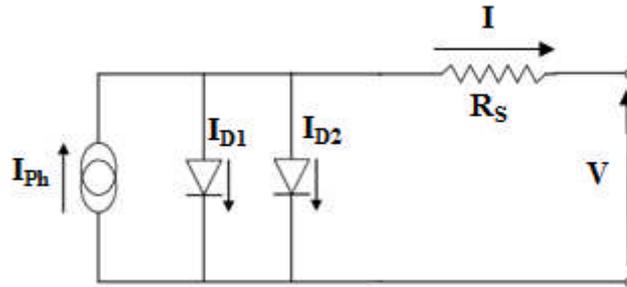


Figure II.5 : Schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{Ph} - (I_{D1} + I_{D2}) \quad (\text{II.24})$$

$$I = I_{Ph} - I_{S1} \left( \exp \left( \frac{q(V+R_S I)}{AKT} \right) - 1 \right) - I_{S2} \left( \exp \left( \frac{q(V+R_S I)}{AKT} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.25})$$

D'une façon générale on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc comportant quatre paramètres (figure II.6).

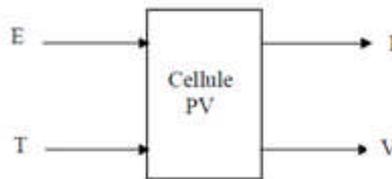


Figure II.6 : schéma bloc d'une cellule PV

Avec deux variables d'entrée :

E : ensoleillement dans le plan de la cellule ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

T : température de la cellule ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Et deux variables de sortie :

I : intensité de courant fournie par la cellule (A).

V : tension aux bornes de la cellule.

## II.3 Modèles mathématiques [60]

En ce qui concerne la modélisation des capteurs PV, l'étude bibliographique a fait ressortir qu'il existe deux approches. La première nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur PV une fois installé. C'est le cas des modèles 'Sandia' et 'Cenerg'. La deuxième approche consiste à se baser uniquement sur les données fournies par les constructeurs, ce qui est le cas du modèle Madison.

### II.3 .1 Modèle Sandia [60]

Le Sandia National Laboratory (Albuquerque, USA) a élaboré un modèle de capteur PV, permettant à la fois de tester des capteurs ainsi que d'estimer leur productivité. Les principaux avantages du modèle sont les suivants :

- La variation du spectre solaire en fonction de la position du soleil dans le ciel, et son influence sur le rendement photovoltaïque, est prise en compte;
- Le modèle prend aussi en compte l'angle d'incidence du rayonnement direct sur le capteur PV. La face avant du module PV étant en général composée d'une vitre, celle-ci ne laisse pas passer le rayonnement de la même manière suivant l'angle d'incidence du rayonnement. Ce phénomène apparaît dès que l'angle d'incidence (par rapport à la normale au module PV) dépasse 60° ;
- La méthode permet de prendre en compte le fait que les STC (Standard Test Conditions), c'est à dire les conditions de références suivants lesquelles les grandeurs représentant le module sont mesurées par les constructeurs, sont bien différentes des conditions normales de fonctionnement. Dans ces conditions de références, la température de fonctionnement des cellules PV est égale à 25°C, ce qui correspond à une température ambiante aux alentours de 0°C, ce qui est rarement le cas dans la pratique ;

Le modèle peut s'appliquer à la caractérisation d'un capteur PV constitué de plusieurs modules. Les équations déterminantes sont les suivantes :

$$I_{SC} = \frac{E}{E_r} f_1(AM) f_2(\beta) \left( I_{SCr} + \mu_{SCr} (T_J - T_{Jr}) \right) \quad (II.26)$$

$$I_{MP} = C_0 + E_c \left( I_{MPr} + \mu_{IMP} (T_J - T_{Jr}) \right) \quad (II.27)$$

$$V_{OC} = V_{OCr} + C_1 \ln(E_e) + \mu_{ISC} (T_J - T_{Jr}) \quad (II.28)$$

$$V_{MP} = V_{MPr} + C_2 \ln(E_e) + C_3 \ln [\ln (E_e)]^2 + \mu_{VMP} (T_J - T_{Jr}) \quad (II.29)$$

$$E_e = \frac{I_{SC}}{I_{SCr}} \quad (II.30)$$

Avec :

E : Rayonnement incident (W/m<sup>2</sup>),

T<sub>J</sub> : Température de la jonction (K),

AM : Nombre d'air-masse,

β : Angle d'incidence entre le rayonnement direct du soleil et la normale au plan du capteur,

E<sub>r</sub> : Rayonnement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>),

T<sub>Jr</sub> : Température de jonction référence (25°C),

f<sub>1</sub> : Fonction du nombre d'air-masse,

f<sub>2</sub> : Fonction de l'angle d'incidence β du rayonnement sur le capteur PV,

$I_{SCR}$  : Intensité de court-circuit de référence,  
 $V_{OCR}$  : Tension de circuit ouvert de référence,  
 $V_{MPR}$  : Tension de puissance maximale de référence,  
 $I_{MPR}$  : Intensité de puissance maximale de référence,  
 $\mu_{ISC}$  : Coefficient de dépendance en température du courant de court circuit.  
 $\mu_{VOC}$  : Coefficient de dépendance en température du de la tension de circuit ouvert.  
 $\mu_{Vmp}$  : Coefficient de dépendance en température de la tension de puissance maximale.  
 $\mu_{Imp}$  : Coefficient de dépendance en température du courant de puissance maximale.  
 $C_0, C_1, C_2, C_3$  : coefficients déterminés expérimentalement.

L'hypothèse qui est utilisée est que les grandeurs  $V_{OC}$ ,  $V_{MP}$  et  $I_{MP}$  sont en fonction uniquement de  $I_{SC}$  et de la température de fonctionnement des cellules  $T_j$ . Autrement dit, la courbe caractéristique I-V (qui donne le courant I en fonction de la tension V aux bornes du capteur) est connue pour un couple ( $T_j, I_{SC}$ ) donné et ne dépend ni de la distribution spectrale du rayonnement incident (fonction de AM) ni de sa distribution angulaire (fonction de l'angle  $\beta$ ).

Les paramètres de la liste ci-dessus tels que  $E_r, T_{jr}, I_{SCR}, V_{OCR}, V_{MPR}, I_{MPR}, \mu_{ISC}, \mu_{VOC}, \mu_{Vmp}, \mu_{Imp}$  sont à déterminer expérimentalement pour un module PV, et sont ensuite calculés simplement par proportionnalité suivant les lois de l'électricité pour l'ensemble (ou champ) de modules. Les fonctions  $f_1$  et  $f_2$  sont des polynômes du 5ème degré, les coefficients de ces polynômes étant déterminés expérimentalement. Quant aux coefficients  $C_0, C_1, C_2, C_3$ , ceux-ci sont déterminés expérimentalement sur l'ensemble du champ de module. Ces coefficients intègrent alors les pertes dues :

- Aux dissymétries : les courbes caractéristiques de chaque module peuvent ne pas correspondre, ce qui entraîne des déséquilibres électriques ;
- Aux connections entre modules ;
- A la présence de diodes anti-retour.

Le principal avantage de ce modèle est qu'il permet de prendre en compte les différentes pertes électriques mentionnées ci-dessus. Cependant celui-ci nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur une fois installé.

### II.3 .2 Modèle Cenerg [60]

Le modèle développé par le Centre d'énergétique se base sur le modèle à une diode. Un bilan électrique sur ce schéma permet d'établir une expression donnant le courant I en fonction de la tension V disponible aux bornes du capteur :

$$I = P_1 \cdot E \left[ 1 + P_2(E - E_r) + P_3(T_j - T_{jr}) \right] - \left[ P_4 T_j^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT_j}\right) \right] \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_S I)}{A \cdot n \cdot k T_j}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_S I}{R_{Sh}} \quad (II.31)$$

Avec :

I : Intensité aux bornes du capteur,

$V$  : Tension aux bornes du capteur,  
 $E$  : Rayonnement incident ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  
 $T_J$  : Température de jonction du capteur PV,  
 $P_1, P_2, P_3, P_4, R_S, R_{Sh}$  : Paramètres à déterminer expérimentalement ( $R_S$  et  $R_{Sh}$  étant les résistances séries et shunt des cellules),  
 $n$  : Paramètre d'ajustement, est égal au nombre de cellules en série (36 par exemple) pour un module PV parfait, et est supérieur dans la pratique,  
 $E_r$  : Rayonnement de référence ( $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ ),  
 $T_{Jr}$  : Température de jonction de référence ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  
 $E_g$  : Gap du matériau, vaut  $1,12\text{eV}$  pour le silicium cristallin.

L'expression (II.31) donne le courant  $I$  comme étant égal à la somme de trois termes. Les coefficients  $P_1, P_2, P_3, P_4, R_S$ , et  $R_{Sh}$  sont déterminés expérimentalement. Le calcul de la puissance électrique  $P$  disponible aux bornes du capteur se fait en multipliant la tension  $V$  et l'intensité  $I$  calculés avec l'équation (II.31).

Ce modèle a été validé expérimentalement par le Centre d'Énergétique à Sophia Antipolis. Dans tous les cas, la différence entre calculs et résultats expérimentaux pour la productivité électrique est inférieure à 5%. Lors de la caractérisation du champ de modules, et donc de la mesure des différents coefficients, il est noté que ces coefficients intègrent les pertes électriques dues aux "Mismatch losses" (dissymétrie entre modules) ainsi que les pertes dans les connexions. La puissance électrique perdue est estimée à environ 3%.

Nous retrouvons pour ce modèle la même problématique que pour le modèle "Sandia": les paramètres expérimentaux permettent une caractérisation plus fiable du système PV, mais cela nécessite une phase de mesures relativement lourde.

### II.3 .3 Modèle Madison [60]

Ce modèle a été développé par l'université de Madison pour la programmation d'un module de simulation de capteur PV appelé "PHANTASM" chaîné au programme de simulation thermique de bâtiment "TRNSYS". Tout comme le modèle "Cenerg", il se base sur le modèle électrique des cellules appelé "Modèle à une diode". Par contre, le modèle développé propose une méthode qui permet de calculer les performances du module PV à partir des données fournies par les constructeurs.

L'équation qui donne l'intensité  $I$  en fonction de la tension  $V$  aux bornes du capteur est la suivante :

$$I = I_{Ph} - I_S \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_S I)}{n.K.T_J}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_S I}{R_{Sh}} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$I$  : Intensité aux bornes du capteur (A),  
 $V$  : Tension aux bornes du capteur (V),  
 $I_{Ph}$  : Photocourant (A),  
 $I_S$  : Courant de saturation inverse de diode (A),

$n$  : Paramètre d'ajustement,  
 $T_j$ : Température de jonction,  
 $R_s$  : Résistance série,  
 $R_{sh}$  : Résistance shunt.

- Le membre de droite de l'équation (II.32) représentant le modèle "Madison" fait apparaître trois termes équivalents aux trois termes de l'équation (II.31) représentant le modèle "Cenerg". Il existe quelques différences à noter entre les deux modèles : Le premier terme de l'équation du modèle "Cenerg" (équivalent au photocourant  $I_{ph}$  du modèle "Madison") est fonction de la température jonction  $T_j$ , et dépend d'un terme en  $E^2$ , ce qui n'est pas le cas pour l'expression du photocourant.  $I_{ph}$  du modèle "Madison". Pour ce calcul, le modèle "Madison" utilise une hypothèse simplificatrice qui dit que le photocourant est proportionnel au rayonnement incident  $E$ , et qu'il ne dépend pas de la température  $T_j$ .
- Dans l'équation du modèle "Madison" le calcul du troisième terme, qui est le courant traversant la résistance shunt  $R_{sh}$ , fait intervenir la tension aux bornes de la résistance série  $R_s$ . Cette résistance série n'intervient pas dans l'équation du modèle "Cenerg", car dans ce modèle pour calculer l'intensité traversant la résistance shunt  $R_{sh}$ , la tension aux bornes de la résistance série est négligée.

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents modèles caractérisant les cellules photovoltaïques tout en développant d'avantage les trois modèles qui nous intéressent dans la suite de notre travail (modèle explicite, 5 paramètres et le modèle à quatre paramètres).

## *Chapitre III*

# *Etude Expérimentale et Simulation*

### III.1 Introduction

Après avoir présenté les différents modèles d'une cellule photovoltaïque nous allons à présent nous intéressons dans ce chapitre à l'application de trois modèles soit le modèle explicite, modèle à cinq paramètres et le modèle à quatre paramètres aux modules PV de différentes technologies (monocristallin, polycristallin et Le Cuivre Indium Sélénium (CIS)).

Pour la comparaison, et la simulation de ces modèles, on utilise le logiciel de programmation *MATLAB*, qui est très répandu dans le monde académique et de la recherche. Quelques caractéristiques avantageuses de ce logiciel sont sa puissance.

Les résultats obtenus seront confrontés avec des données expérimentales via la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) afin de déduire le modèle le plus fiable.

### III.2 Topologie de site

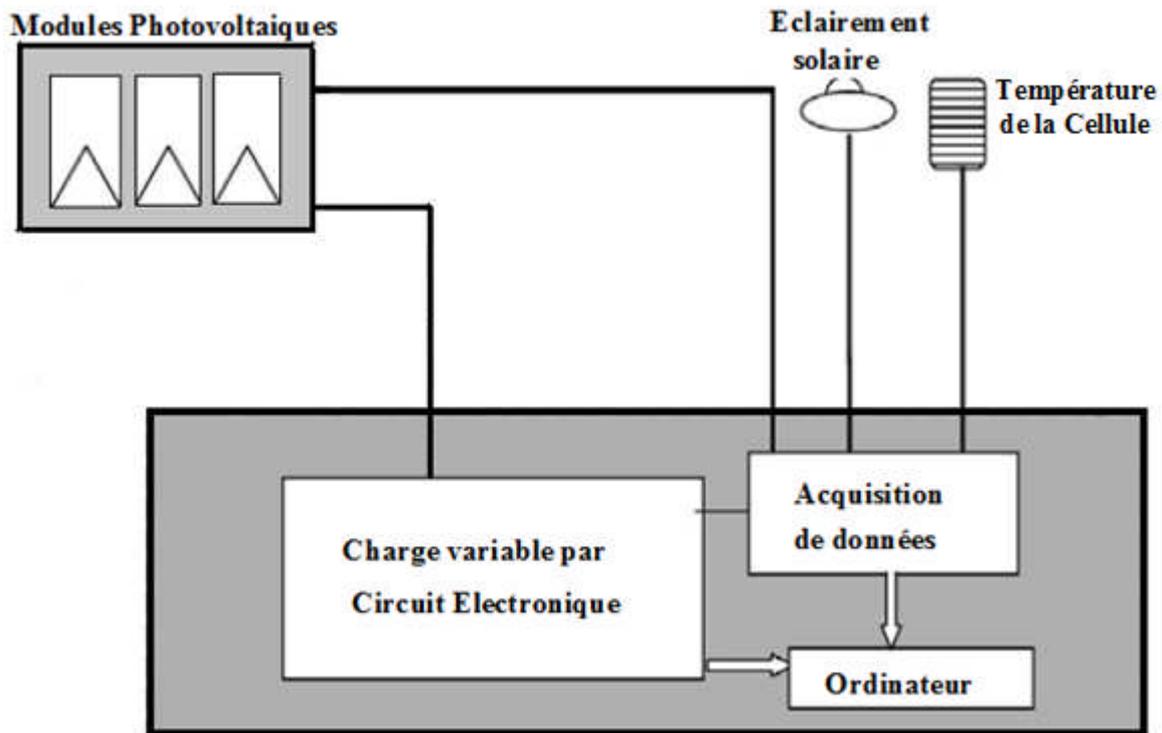
Les caractéristiques du site qui se situe à Ghardaïa sont données par les grandeurs météorologiques suivantes :

- Latitude :  $32^{\circ} 23' N$
- Longitude :  $3^{\circ} 46' E$
- Albédo : 0,25
- Altitude : 467 m

### III.3 Dispositif expérimental

Les mesures expérimentales ont été faites avec un pas de 5 minutes du levé au couché du soleil sous conditions réelles de fonctionnement d'éclaircements et de températures sur site de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables "Ghardaïa" (URAERG), au sud Algérien. La collecte des données est assurée par un PC qui gère l'ensemble du dispositif de mesure.

La figure (III.1) représente un schéma bloc du système de mesures utilisé dans ce travail. Les données électriques des modules PV et les données météorologiques sont collectées par l'intermédiaire de différents capteurs et circuits électroniques.

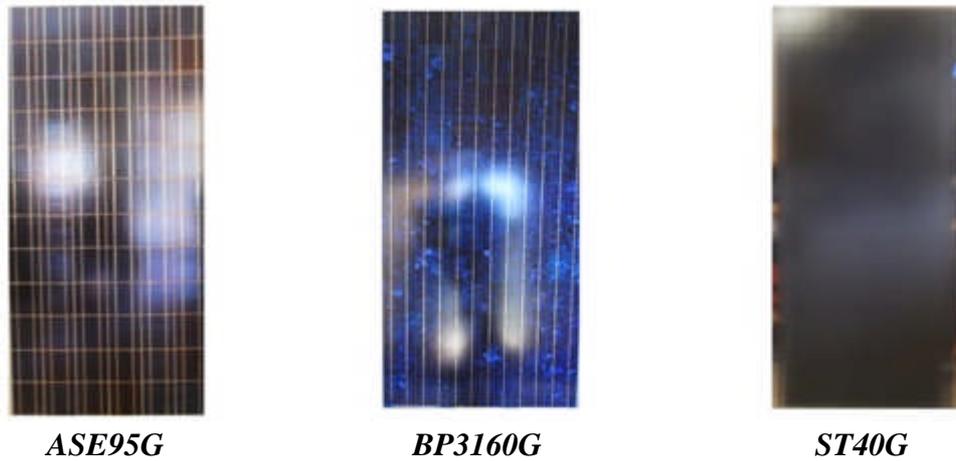


*Figure III.1 : Dispositif expérimental de mesure des courbes caractéristiques des modules photovoltaïques*

Pour tracer la courbe I-V, le système de mesure utilise une charge électronique (capacitive variable) qui nous permet d'avoir 100 points pour chaque courbe I-V. Ainsi, le point de fonctionnement est l'intersection entre la courbe I-V du module PV et la charge. La tension, le courant, l'éclairément solaire et la température du module sont mesurés en même temps. La température du module PV est mesurée grâce à une sonde Pt 1000 collée sur la face arrière d'une cellule calibrée avec un bon contact thermique.

L'éclairément solaire est mesuré à l'aide de la cellule étalon en silicium ayant la même orientation et inclinaison que le module testé.

Les modules photovoltaïques testés sont : ASE95G (monocristallin), BP3160G (polycristallin) et ST40G (CIS), qui sont représentés sur la figure (III.2). Leurs caractéristiques dans les conditions standards de test (éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$ , température de  $25^\circ\text{C}$ , spectre AM1.5) sont données dans le tableau (III.1).



**Figure III.2 :** Les modules photovoltaïques testés

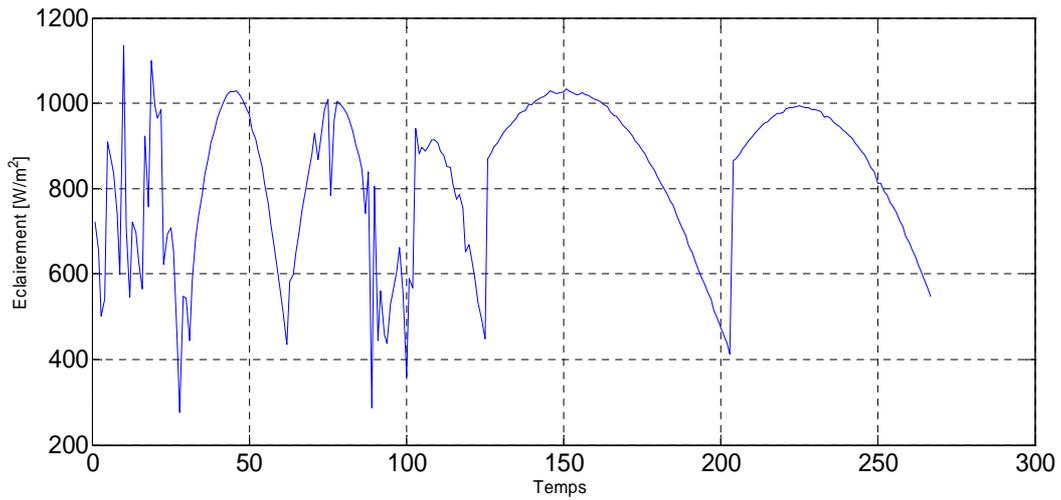
**Tableau III.1 :** Caractéristiques électriques des modules utilisés aux conditions STC (éclairage énergétique  $1000 \text{ W/m}^2$ , spectre 1,5, température de la cellule  $25^\circ\text{C}$ )

	<b>ASE95G</b>	<b>BP3160G</b>	<b>ST40G</b>
<i>Puissance maximale (W)</i>	95	160	40
<i>Tension au point de puissance maximale (V)</i>	34,1	35,1	16,6
<i>Tension à circuit ouvert (V)</i>	42,3	44,2	23,3
<i>Courant au point de puissance maximale (A)</i>	2,8	4,55	2,41
<i>Courant de court circuit (A)</i>	3,2	4,8	2,68
<i>Nombre de cellule en série</i>	72	72	42

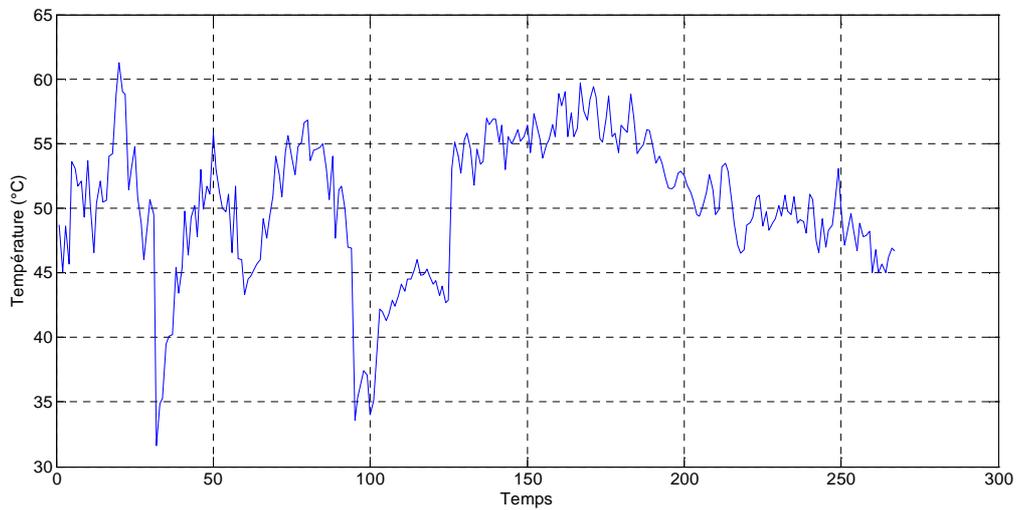
### III.4 Résultats de simulation et expérimentaux

Les mesures (tension, courant) sont collectées dans un fichier Excel soit cent points de mesure pour chaque courbe I-V du module sous un éclairage et température donnés, on peut simuler différents caractéristiques des modules photovoltaïques à un rayonnement solaire et une température donnés dans les programmes qui se sont développés sous l'environnement *MATLAB*.

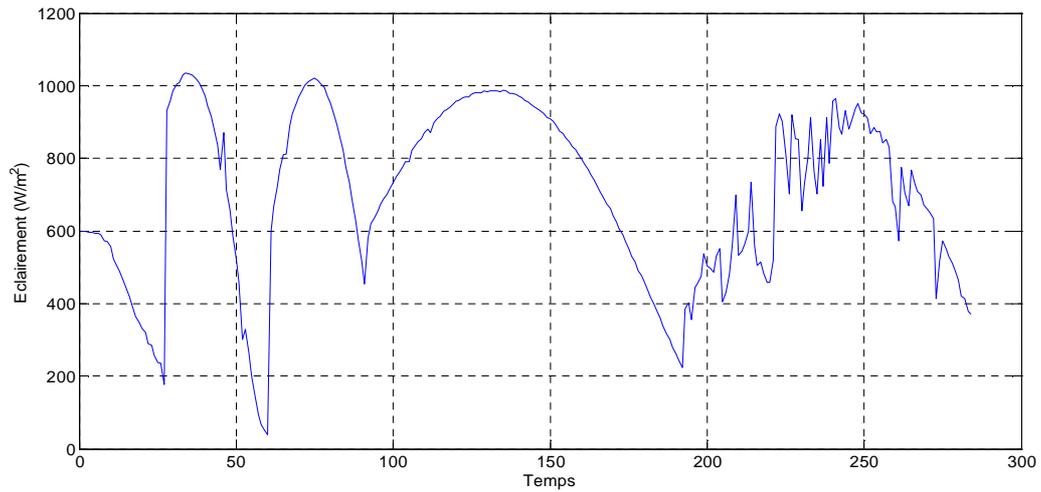
Dans les figures (III.3-III.5) nous avons présenté les courbe de l'évolution de l'éclairage solaire et de la température en fonction du temps sous les quelles les mesures ont été effectuées sur les modules photovoltaïques ASE95G, BP3160G, ST40G respectivement.



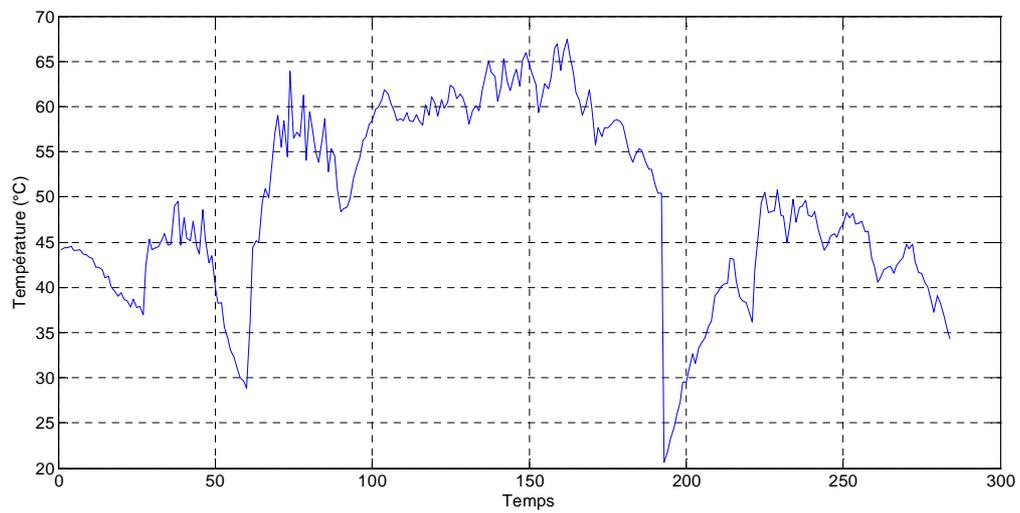
**Figure III.3.a :** Evolution de l'éclairement global  
Module ASE95G



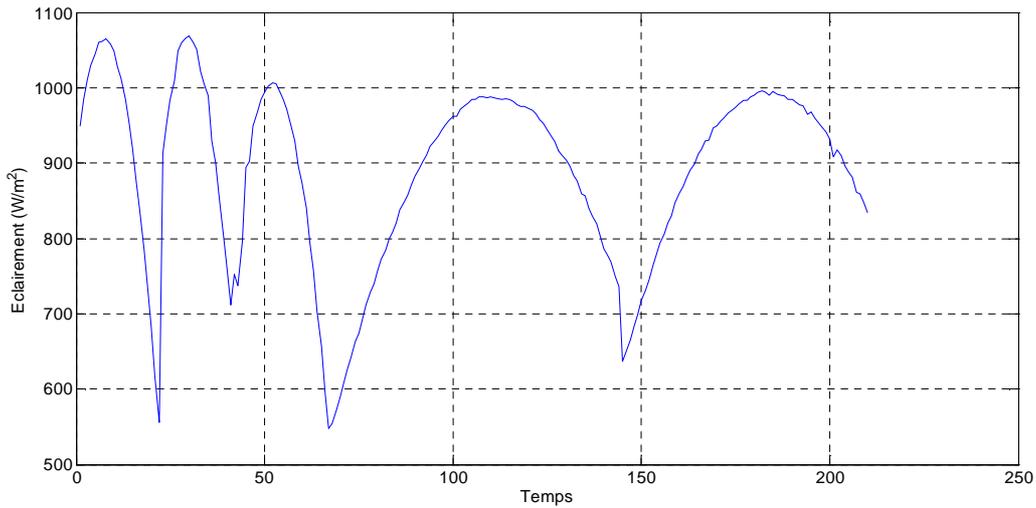
**Figure III.3.b :** Evolution de la température de la jonction  
Module ASE95G



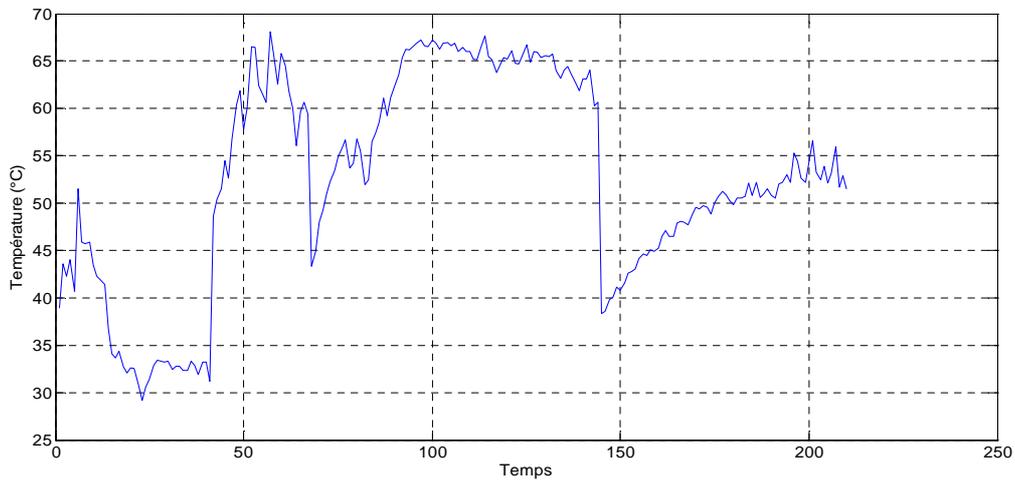
**Figure III.4.a : Evolution de l'éclairement global  
Module BP3160G**



**Figure III.4.b : Evolution de la température de la jonction  
Module BP3160G**



**Figure III.5.a :** Evolution de l'éclairement global  
Module ST40G



**Figure III.5.b :** Evolution de la température de la jonction  
Module ST40G

Nous disposons d'une large plage de variation de la puissance de l'éclairement reçu par les modules photovoltaïques et de température. Nous avons sélectionné un échantillon de cinq valeurs d'éclairements et de températures pour les différentes technologies qui sont donnés dans le tableau (III.2), ce qui nous a permis de simuler par la suite le comportement des modules photovoltaïques vis-à-vis des variations de l'éclairement et de température.

**Tableau III.2 :** Les valeurs d'éclairement et de température

ASE95G		BP3160G		ST40G	
$T$ (°C)	$E$ (W/m <sup>2</sup> )	$T$ (°C)	$E$ (W/m <sup>2</sup> )	$T$ (°C)	$E$ (W/m <sup>2</sup> )
34	361	20,6	386	30,8	556
42,7	495	31,6	531	39,8	666
48,2	690	41,9	705	48,6	753
54,3	842	54,9	895	56,6	908
59	1002	63,9	1017	66,5	1007

### III.4.1 Extraction des paramètres de modèle à une diode

Les paramètres des modèles peuvent être déterminés en fonction des données du constructeur, puisque les modules photovoltaïques commercialisés nous informent sur la puissance maximale  $P_m$ , la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$ , le courant du court-circuit  $I_{sc}$  pris à des conditions de test standard (STC), c'est-à-dire à un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Comme on a exposé dans le chapitre précédent, les équations de modèle à une diode sans et avec résistance shunt, sous éclairement sont données par les relations (II.7 et II.16)

Les équations (II.7 et II.16) sont des équations non linéaires (implicites), ce qui rend la détermination des paramètres de modèle très difficile, pour les résoudre directement il faut utiliser des méthodes numériques ou analytiques, dans notre étude nous avons utilisé une méthode basée sur des approximations mathématiques qui ont abouti aux équations analytiques pour le modèle à cinq paramètres et de même pour le modèle à quatre paramètres et par la suite on utilise la méthode des moindres carrés pour le traçage de la caractéristique I-V. Un programme développé en *MATLAB* est utilisé pour implémenter cette méthode ce qui nous a permis de déterminer :

- Les valeurs de  $m$ ,  $I_s$ ,  $R_s$ ,  $I_{ph}$  et  $R_{sh}$  qui sont obtenus par les équations (II.10-14) pour le modèle à cinq paramètres ;
- Les valeurs de  $I_s$  et  $R_s$ , qui sont obtenus par les équations (II.15 et II.19) respectivement, tandis que,  $m=1$  pour le modèle à quatre paramètres.

Les paramètres extraits de modèle à cinq et quatre paramètres avec et sans résistance shunt des trois modules sont regroupés dans les tableaux (III.3, III.4) respectivement :

**Tableau III.3 :** Les paramètres du modèle à cinq paramètres extraits par la méthode analytique

Modules	$T(^\circ\text{C})$	$E(\text{W/m}^2)$	$I_{ph}(A)$	$I_s(A)$	$R_s(\Omega)$	$R_{sh}(\Omega)$	$m$
<b>ASE95G</b>	34	361	1,099	$9,4631 \cdot 10^{-9}$	1,9016	996,35	1,3382
	42,7	495	1,5498	$3,668 \cdot 10^{-9}$	1,6813	433,79	1,2038
	48,2	690	2,1811	$1,0937 \cdot 10^{-8}$	1,365	243,45	1,1991
	54,3	842	2,6031	$2,5335 \cdot 10^{-8}$	1,2343	213,79	1,2133
	59	1002	3,1146	$5,7021 \cdot 10^{-8}$	1,1348	176,91	1,228
<b>BP3160G</b>	20,6	386	1,9414	$5,045 \cdot 10^{-11}$	1,3872	244,42	1,1496
	31,6	531	2,6834	$6,2564 \cdot 10^{-10}$	1,1042	228,07	1,19
	41,9	705	3,5365	$1,1457 \cdot 10^{-8}$	0,95468	249,5	1,2626
	54,9	895	4,3706	$3,7747 \cdot 10^{-8}$	0,92078	172,81	1,2475
	63,9	1017	5,0176	$1,5894 \cdot 10^{-7}$	0,88618	167,53	1,2631
<b>ST40G</b>	30,8	556	1,5164	$2,6363 \cdot 10^{-7}$	1,359	163,61	1,6171
	39,8	666	1,8004	$3,6643 \cdot 10^{-7}$	1,3845	126,1	1,5625
	48,6	753	2,0754	$7,9301 \cdot 10^{-7}$	1,1839	90,68	1,5293
	56,6	908	2,4931	$5,8864 \cdot 10^{-7}$	1,1926	86,167	1,425
	66,5	1007	2,7451	$5,5638 \cdot 10^{-7}$	1,1418	59,94	1,2986

**Tableau III.4 :** Les paramètres du modèle à quatre paramètres extraits par la méthode analytique

Modules	T (°C)	E (W/m <sup>2</sup> )	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s</sub> (A)	R <sub>s</sub> (Ω)
<b>ASE95G</b>	34	361	1,0969	1,8601.10 <sup>-11</sup>	4,4371
	42,7	495	1,5439	6,884.10 <sup>-11</sup>	3,4309
	48,2	690	2,1689	2,6596.10 <sup>-10</sup>	2,7097
	54,3	842	2,5881	5,3954.10 <sup>-10</sup>	2,3546
	59	1002	3,0947	1,0706.10 <sup>-9</sup>	2,0714
<b>BP3160G</b>	20,6	386	1,9304	1,4628.10 <sup>-12</sup>	3,1967
	31,6	531	2,6705	1,0053.10 <sup>-11</sup>	2,2305
	41,9	705	3,5232	7,1707.10 <sup>-11</sup>	1,7173
	54,9	895	4,3475	4,0747.10 <sup>-10</sup>	1,5409
	63,9	1017	4,9912	1,7949.10 <sup>-9</sup>	1,3991
<b>ST40G</b>	30,8	556	1,5039	2,0843.10 <sup>-11</sup>	3,3299
	39,9	666	1,7809	7,462.10 <sup>-11</sup>	2,9822
	48,6	753	2,0487	3,8567.10 <sup>-10</sup>	2,588
	56,6	908	2,459	1,0491.10 <sup>-9</sup>	2,1498
	66,5	1007	2,6937	6,6569.10 <sup>-9</sup>	1,9454

### III.4.2 Application des trois modèles étudiés

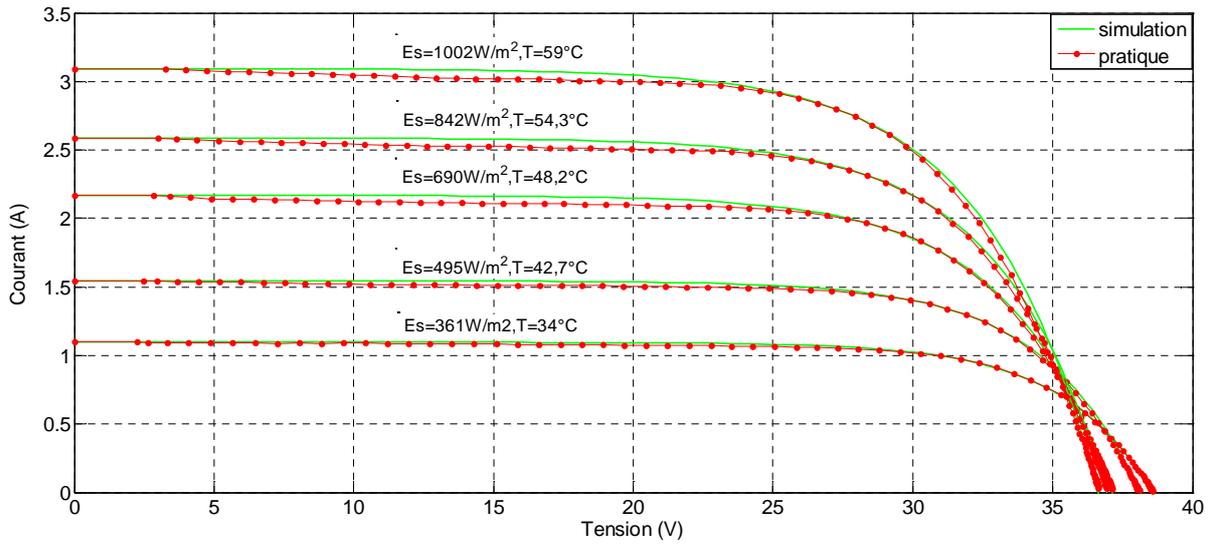
Nous avons implanté les trois modèles du générateur photovoltaïque (le modèle explicite et le modèle à une diode avec et sans résistance shunt) dans l'environnement de programmation *MATLAB*, par la suite nous avons simulé les caractéristiques I-V des modules photovoltaïques de différentes technologies, pour différentes conditions de fonctionnement d'éclairement et de température.

Pour vérifier la validité de nos modèles, Nous donnons d'une manière simultanée sur les figures (III.6- III.14) l'effet simulé et mesuré de différents éclaircissements et de températures. sur l'évolution de la caractéristique I-V pour les trois modules testés.

#### III.4.2.1 Application de modèle explicite

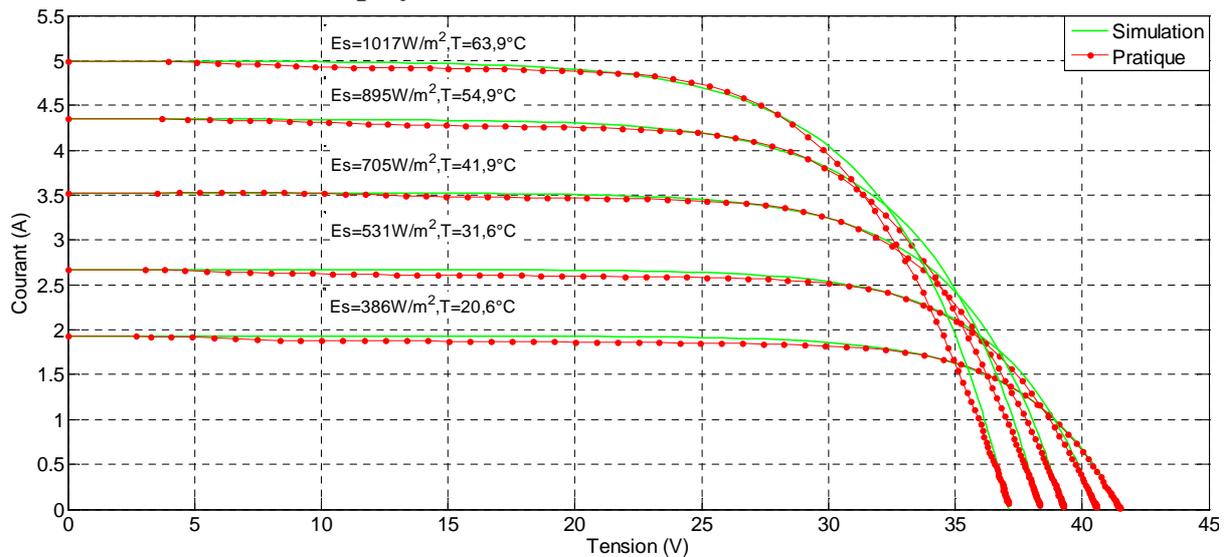
Nous appliquons le modèle explicite sur les différents modules afin de déterminer leurs caractéristiques I-V et les paramètres correspondant au modèle appliqué. Les résultats pratiques et de simulations sont représentés sur les figures (III.6 - III.8).

➤ **Module ASE95G (monocristallin)**

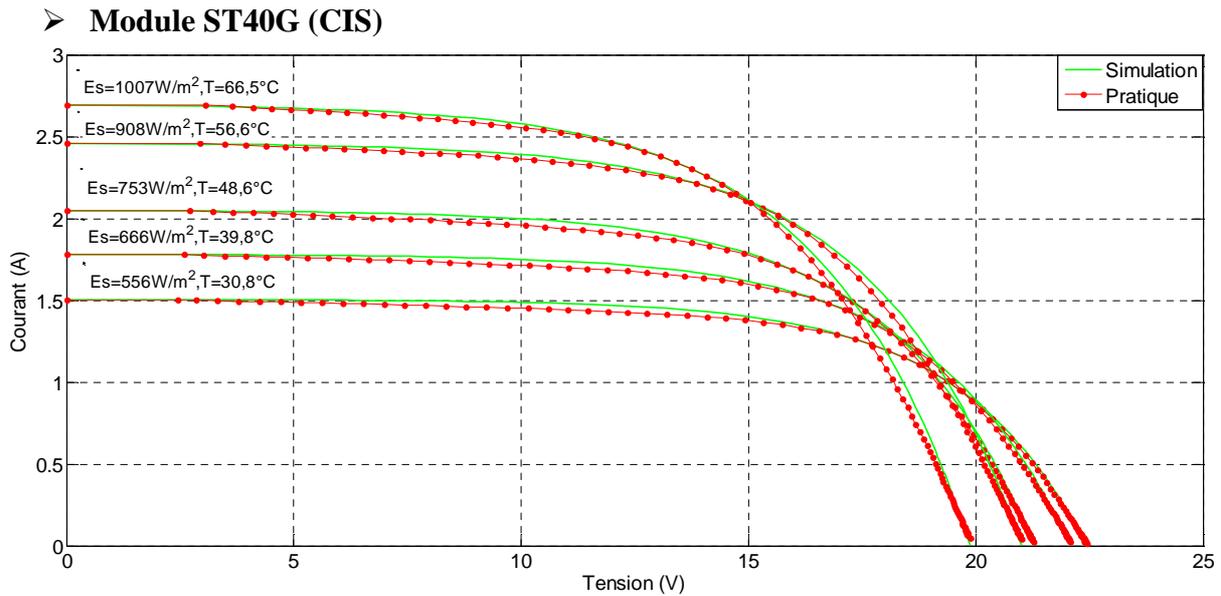


**Figure III.6 :** Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ASE95G  
-Modèle explicite-

➤ **Module BP3160G (polycristallin)**



**Figure III.7 :** Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module BP3160G  
-Modèle explicite-



**Figure III.8 :** Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ST40G  
-Modèle explicite-

➤ **Discussion des résultats**

Pour différents niveaux d'éclairement, on remarque que le courant est directement proportionnel à l'irradiation ce qui est conforme à l'étude théorique.

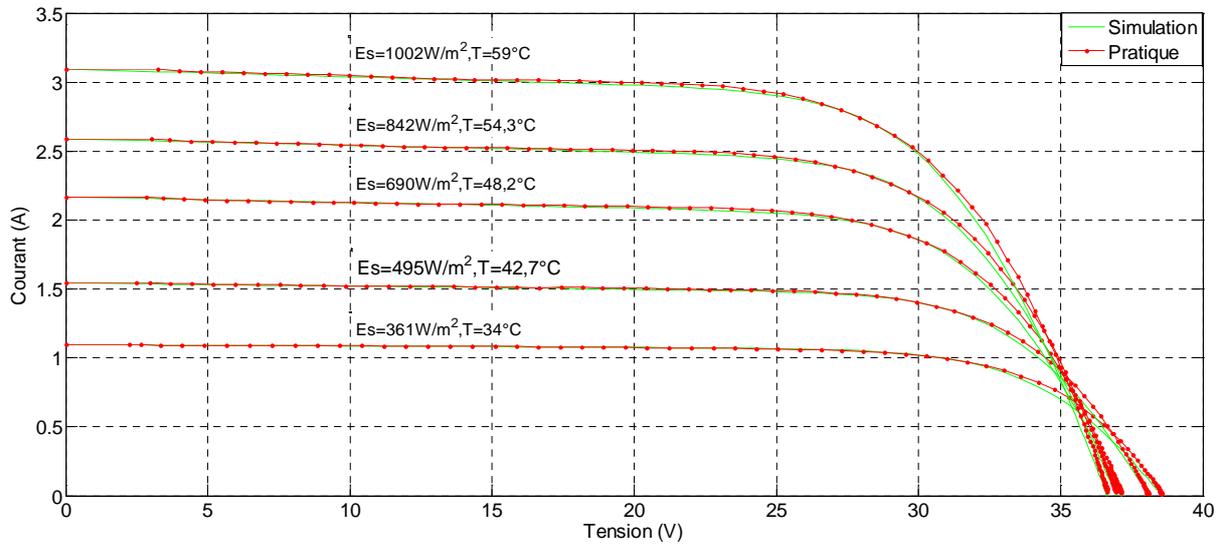
Lorsque la température augmente on remarque l'importance des variations de la tension de circuit ouvert ceci met en évidence l'effet simultané de l'éclairement et de la température sur les modules.

Nous constatons que le modèle explicite a montré un bon accord entre les résultats calculés et mesurés quelque soit le module utilisé (ASE95G, BP3160G, ST40G).

### III.4.2.2 Application de modèle à cinq paramètres

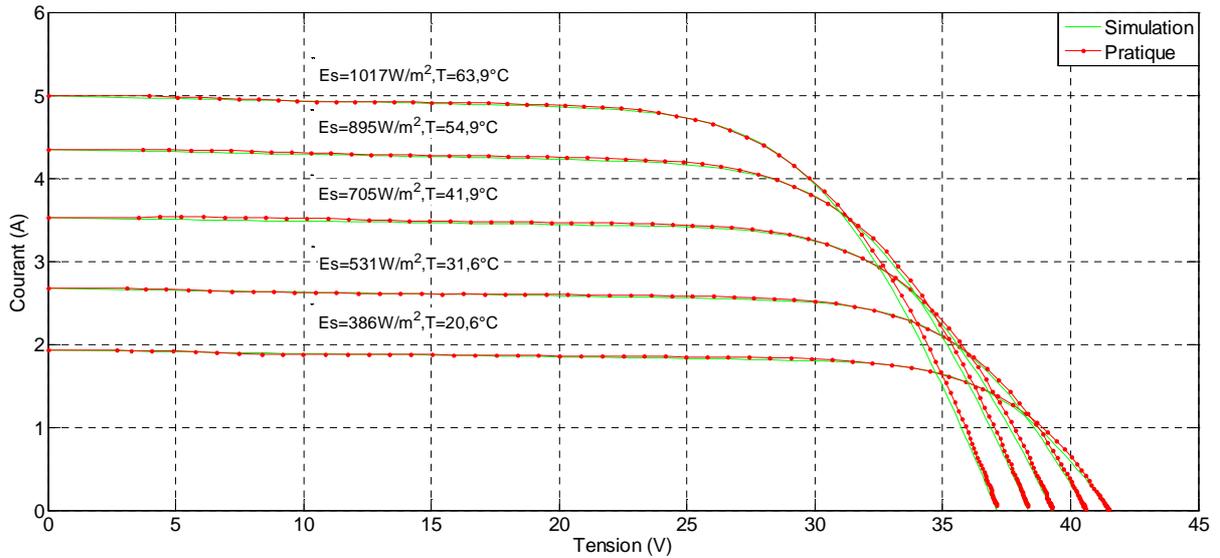
Nous appliquons le modèle à une diode avec résistance shunt (cinq paramètres) sur les différents modules afin de déterminer leurs caractéristiques I(V). Les résultats pratiques et de simulations sont donnés sur les figures (III.9 - III.11).

➤ **Module ASE95G (monocristallin)**

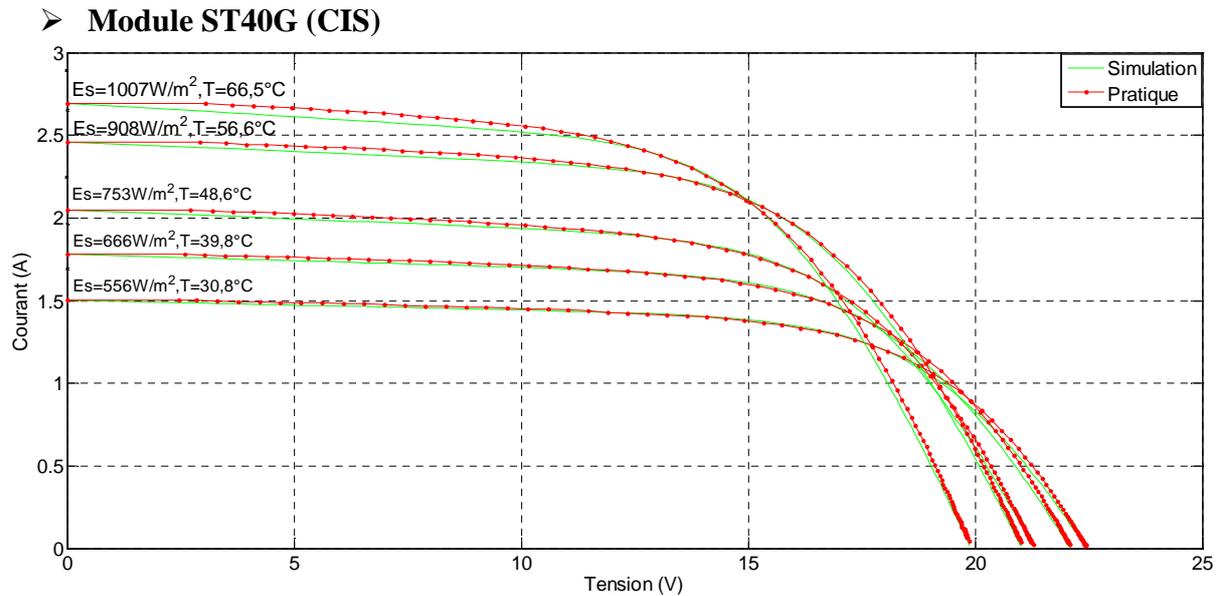


*Figure III.9 : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ASE95G  
-Modèle à 5 paramètres-*

➤ **Module BP3160G (polycristallin)**



*Figure III.10 : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module BP31605G  
-Modèle à 5 paramètres-*



➤ **Discussion des résultats**

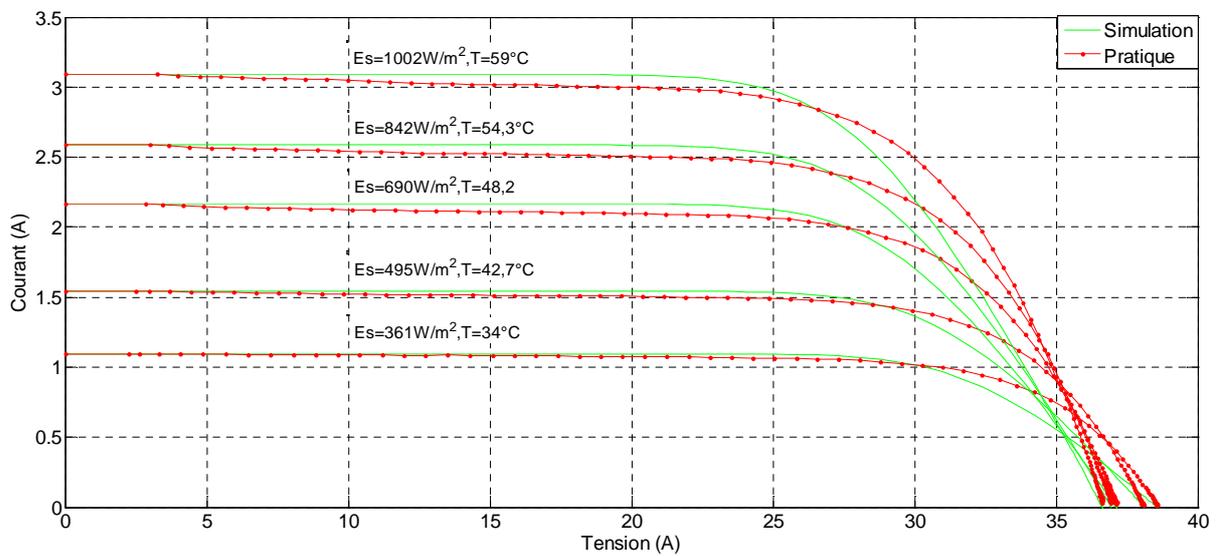
Nous constatons que l'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique I-V suivant l'axe des courants. L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique.

De même, on peut déduire d'après les figures citées précédemment que la concordance s'avère acceptable. Le modèle mathématique simulé présente une grande adéquation avec les caractéristiques expérimentales et cela est valable pour les trois technologies.

### III.4.2.3 Application de modèle à quatre paramètres

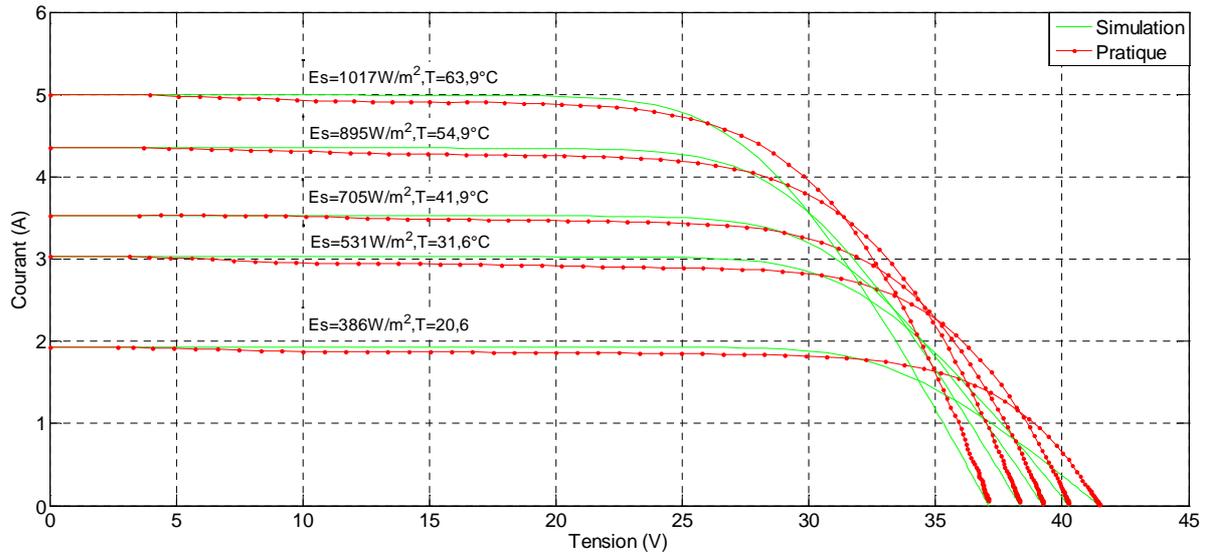
Nous appliquons le modèle à une diode sans résistance shunt (quatre paramètres ou simplifié) sur les différents modules PV afin de déterminer leurs caractéristiques I-V. Les résultats pratiques et de simulations sont donnés sur les figures (III.12 - III.14).

➤ **Module ASE95G**

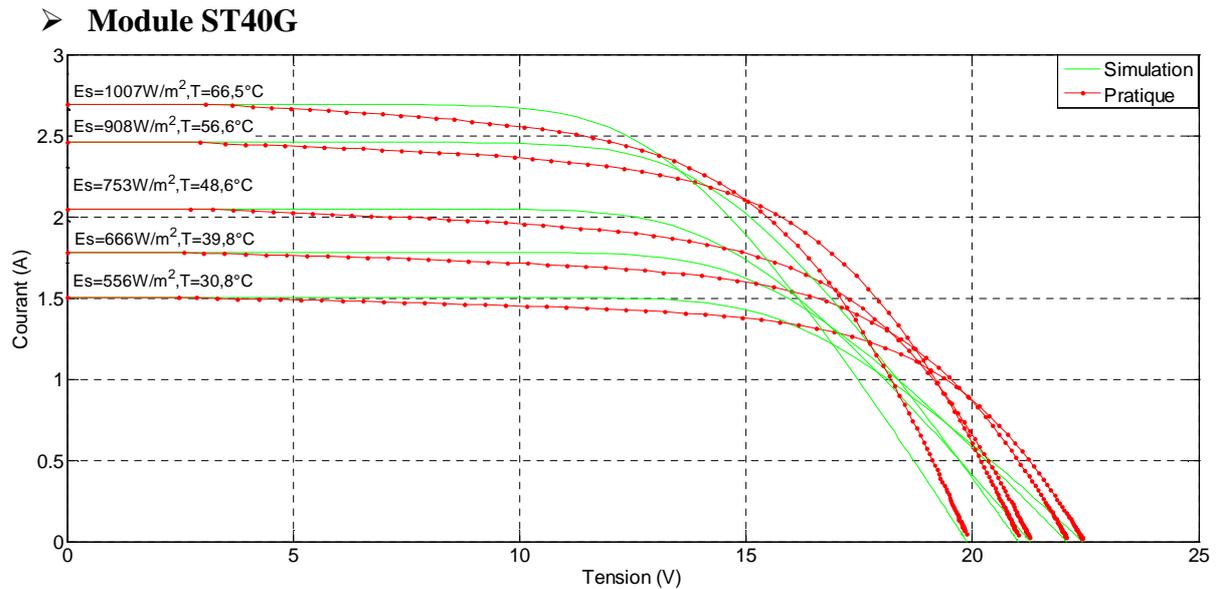


**Figure III.12 :** Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ASE95G  
-Modèle à 4 paramètres-

➤ **Module BP3160G**



**Figure III.13 :** Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module BP3160G  
-Modèle à 4 paramètres-



**Figure III.14** : Caractéristiques I-V mesurées et simulées du module ST40G  
-Modèle à 4 paramètres-

➤ **Discussion des résultats**

Nous remarquons que le modèle illustre bien le fait que le courant d'un module solaire est proportionnel à l'éclairement solaire, tandis que la tension en circuit ouvert diminue lorsque la température augmente. Toutefois nous constatons un écart important entre les résultats de la simulation et ceux de l'expérimentale (mauvaise concordance).

### III.5 Confrontation des résultats expérimentaux avec résultats théorique via RMSE

Plusieurs indicateurs statistiques, ont été utilisés dans la littérature, pour évaluer les performances des modèles d'une cellule photovoltaïque.

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, RMSE (root mean square error) est l'un des indicateurs les plus populaires et les plus utilisés, elle est donnée par l'expression suivante [61,57] :

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{mesuré}(i) - I_{expérimentale})^2 \right]^{1/2} \quad (III.1)$$

Avec :

N : le nombre de points de mesures

La RMSE, est une mesure de la variation des valeurs prédites autour des valeurs mesurées. Plus sa valeur est petite, plus le modèle est meilleur.

Nous avons conçu pour chaque modèle, un programme en *MATLAB* de telle façon que chacun de ces programmes de calcul peut délivrer la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne commise par les modèles étudiés.

Les appréciations et les études sont effectuées pour un échantillon de cinq valeurs d'éclairages et de températures (N=5) pour les différents modules. La confrontation des résultats expérimentaux et de simulation via RMSE est indiquée dans le tableau (III.5).

*Tableau III.5 : Les valeurs de RMSE*

Module	RMSE		
	Explicite	5 Paramètres	4 Paramètres
<b>ASE95G</b>	0,0348s	0,0294	0,1254
<b>BP3160G</b>	0,0806	0,0433	0,1866
<b>ST40G</b>	0,0319	0,0292	0,1403

### III.6 Interprétation des résultats

D'après la confrontation des résultats pratiques et de simulations via la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) nous remarquons que :

- Les valeurs de L'erreur quadratique moyenne commise en appliquant le modèle explicite sur les trois module est de l'ordre de : 0,0348 pour le module (ASE95G), 0,0806 pour le module BP3160G et 0,0319 pour le module ST40G.
- Le modèle à cinq paramètres donne des valeurs de l'erreur quadratique moyenne égal à : 0,0294 pour le module ASE5G, 0,0433 pour le module BP3160G et 0,0292 pour le module ST40G.
- Le modèle à quatre paramètres donne des valeurs de l'erreur quadratique moyenne égal à : 0,1254 pour le module ASE5G, 0,1866 pour le module BP3160G et 0,1403pour le module ST40G.

Selon les remarques précédentes, on peut dire que le modèle à cinq paramètres donne des valeurs d'erreurs quadratique moyenne très réduite, de même, le modèle explicite donne des valeurs de RMSE très proche de celles obtenus par le modèle à cinq paramètres, par contre, les valeurs de RMSE obtenu en appliquant le modèle à quatre paramètres sont importantes par rapport aux deux autres modèles, et cela est valable pour les trois technologies.

Les conclusions tirées en appliquant les trois modèles et les résultats obtenus via RMSE, nous ont permis de déduire que le modèle le plus adapté pour décrire le comportement des modules utilisés dans cette étude et le modèle à cinq paramètres.

### **III.7 Conclusion**

Les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module PV. Dans ce chapitre, nous avons utilisé trois modèles d'une cellule photovoltaïque pour simuler le fonctionnement des modules PV pour différentes conditions d'ensoleillement et de température, le courant d'une cellule solaire est proportionnelle à l'éclairement solaire, il augmente légèrement avec la température, la tension en circuit ouvert d'un système solaire varie légèrement avec l'éclairement et diminue lorsque la température augmente, ce qui correspond à la théorie.

Les résultats de simulation ont été validés par comparaison avec des mesures expérimentales, ces caractéristiques ne diffèrent pas beaucoup des caractéristiques expérimentales de simulation, la confrontation de ces résultats via RMSE nous a permis de déduire que le modèle à cinq paramètres est le plus adapté pour décrire le comportement d'une cellule photovoltaïque par rapport aux autres cas étudiés. Pour translater les caractéristiques d'un module de conditions réelles aux conditions standards on utilise des méthodes de translations qui seront étudiées au chapitre quatre.

*Chapitre IV*  
*Translation de la*  
*Caractéristique I-V*

## IV.1 Introduction

Vu que les fabricants des modules PV fournissent généralement les données relatives aux conditions standards. On est amené assez souvent à utiliser des méthodes de translation de la caractéristique I-V afin de palier au manque de données.

Dans ce chapitre on décrit et on valide deux méthodes de translation (selon la norme CEI 891 et la méthode simplifiée) de la courbe I-V donnée à certaines conditions déterminées d'éclairement et de température à d'autres conditions distinctes désirées, puis une comparaison entre ces deux méthodes sera effectuée.

## IV.2 Méthodes de translation

Les caractéristiques I-V doivent être traduites de conditions réelles aux conditions désirées en effet.

- Une différence entre les tests in situ et en milieu naturel existe, elle est attribuée à divers facteurs mais essentiellement à la désadaptation de la réponse spectrale entre le module PV et le dispositif de mesure de l'éclairement.
- Pour éliminer l'influence des valeurs instantanées de l'éclairement et de la température, et être en mesure de comparer des mesures effectuées.

Il existe plusieurs procédures proposées pour la correction de la caractéristique I-V de la cellule solaire (module PV) aux conditions STC. Elles donnent différentes erreurs d'extrapolation qui dépend principalement du niveau de l'éclairement réel pour lequel la courbe I-V a été prise [62].

Actuellement deux méthodes sont habituellement recommandées pour la translation de la courbe I-V de la cellule solaire aux conditions STC. Ces méthodes de translation se distinguent par le type de la technologie de la cellule solaire.

### IV.2.1 Méthode selon la norme CEI 891

La présente norme est appliquée aux caractéristiques I-V mesurées de dispositifs photovoltaïques au silicium cristallin seulement [63,64]. Avec cette méthode, la caractéristique courant-tension peut être corrigée par rapport aux valeurs de température et d'éclairement choisis.

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \left( \frac{E_2}{E_1} - 1 \right) + \alpha_T (T_2 - T_1) \quad (\text{IV.1})$$

$$V_2 = V_1 - R_S (I_2 - I_1) - K I_2 (T_2 - T_1) + \beta_T (T_2 - T_1) \quad (\text{IV.2})$$

- $I_1, V_1$  : Coordonnées d'un point de la courbe de référence ;  
 $I_2, V_2$  : Coordonnées d'un point de la courbe corrigée ;  
 $I_{sc}$  : Courant de court-circuit de la courbe de référence ;  
 $E_1, T_1$  : Eclairement et température dans les conditions de mesure ;  
 $E_2, T_2$  : Eclairement et température dans les conditions désirées ;  
 $\alpha_T, \beta_T$  : Coefficients de température du courant et de la tension ;  
 $K$  : Facteur de correction de la courbe (0,00125 Ohm/°C).

Cette méthode présente des limitations : sur l'éclairement à corriger, celle de la température n'est pas spécifiée.

#### IV.2.2 Méthode simplifiée

Cette méthode est basée sur la translation de la courbe I-V à partir des corrections en  $I_{sc}$  et  $V_{oc}$  [65].

$$I_{SC2}(E_2, T_2) = I_{SC1}(E_1, T_1) \cdot \frac{E_2}{E_1} + \alpha_T(T_2 - T_1) \quad (IV.3)$$

$$V_{OC2}(E_2, T_2) = V_{OC1}(E_1, T_1) + m \cdot V_t \cdot \ln\left(\frac{E_2}{E_1}\right) + \beta_T(T_2 - T_1) \quad (IV.4)$$

Les équations de translation sont :

$$I_2 = I_1 + \Delta I_{SC} \quad (IV.5)$$

$$V_2 = V_1 + \Delta V_{OC} \quad (IV.6)$$

Où :

$$\Delta I_{SC} = I_{SC2} - I_{SC1} \quad (IV.7)$$

$$\Delta V_{OC} = V_{OC2} - V_{OC1} \quad (IV.8)$$

$\alpha_{Tm}, \beta_{Tm}$  et  $m_m$  sont des valeurs définies pour le dispositif complet (module, générateur photovoltaïque, etc.). Dans le cas où on utiliserait  $\alpha_T, \beta_T$  et  $m$  d'une cellule on fera le calcul préalable suivant :

$$\alpha_{Tm} = \alpha_{TC} \cdot N_p$$

$$\beta_{Tm} = \beta_{TC} \cdot N_s$$

$$m_m = m_c \cdot N_s$$

Avec :

$n_s$  : nombre de cellules du module ou du générateur photovoltaïque connectées en série.

$n_p$  : nombre de cellules du module ou du générateur photovoltaïque connectées en parallèle.

### IV.3 Application de deux méthodes sur le module ASE95G

Afin de confirmer l'exactitude de ces deux méthodes de translation nous allons les appliquer sur le module ASE95G de technologie monocristallin.

A partir d'un éclairement et de température pris comme références ( $G_{ref}=1002W/m^2$ ,  $T_{ref}=59^\circ C$ ) des caractéristiques I-V d'éclairement (842, 690 et  $495W/m^2$ ) et température ( $54,3$ ,  $48,2$  et  $42,7^\circ C$  respectivement) seront translatées en appliquant les deux méthodes précitées, les courbes expérimentales et translatées sont données dans les figures (IV.1 et IV.2).

#### ➤ Méthode selon la norme CEI 891

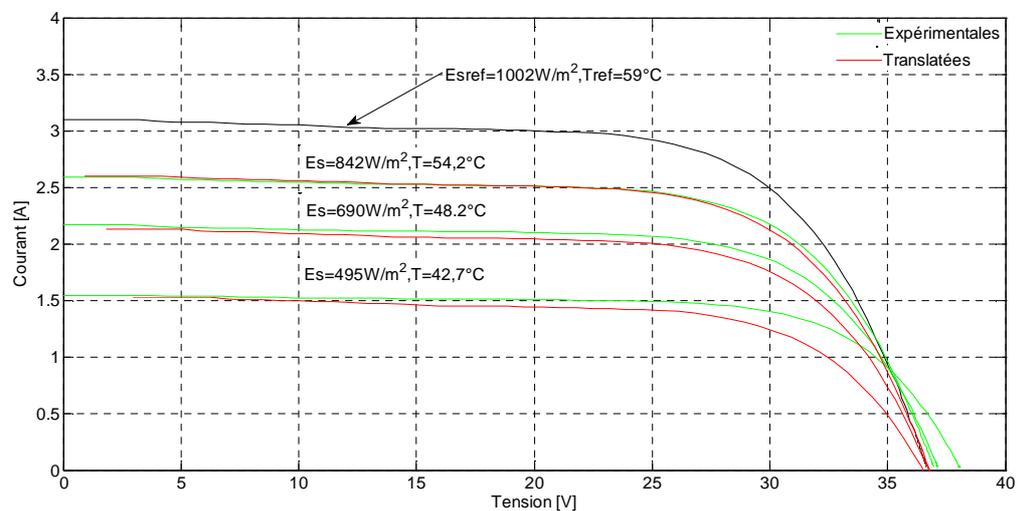


Figure IV.1 : Caractéristiques I-V mesurées et translatées selon CEI-891

➤ Méthode simplifiée

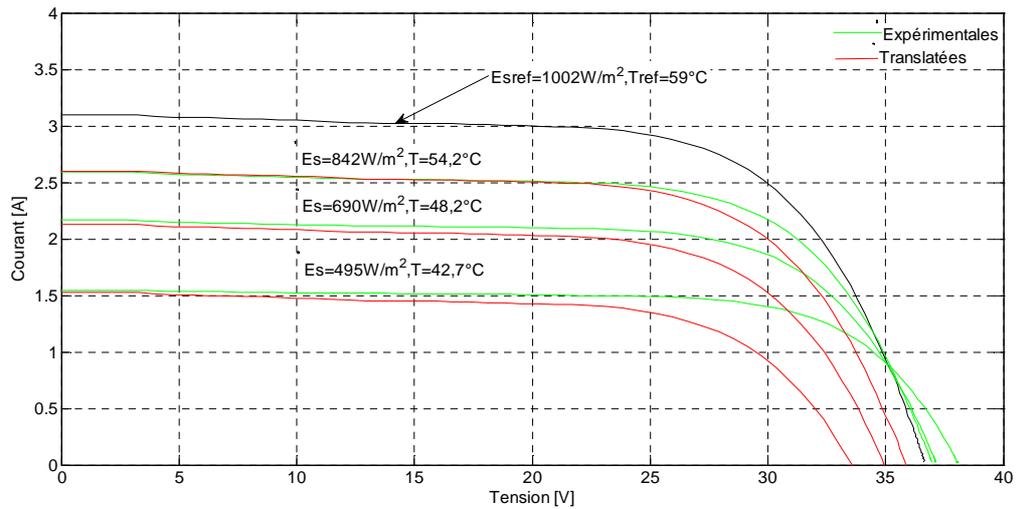


Figure IV.2 : Caractéristiques I-V mesurées et traduites selon la méthode simplifiée

IV.4 Résultats et comparaison

Les valeurs de l'erreur moyenne entre les résultats expérimentaux et de translation par les deux méthodes commis sur les paramètres  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  sont regroupées dans les tableaux (IV.1, IV.2).

Tableau IV.1 : Résultats de translation selon la norme CEI 891

Eclairement ( $W/m^2$ )	Valeurs extrapolées		
	842	690	495
Température ( $^{\circ}C$ )	54,3	48,2	42,7
$E_{ISC}$ (%)	-0,4211	1,908	1,32
$E_{VOC}$ (%)	1,502	3,21	7,26

Tableau IV.1 : Résultats de translation selon la méthode simplifiée

Eclairement ( $W/m^2$ )	Valeurs extrapolées		
	842	690	495
Température ( $^{\circ}C$ )	54,3	48,2	42,7
$E_{ISC}$ (%)	-0,4211	1,908	1,32
$E_{VOC}$ (%)	3,036	6,201	12,003

Les tableaux IV.1 et IV.2 donnent les erreurs de translation de courbes I-V à d'autres conditions d'éclairement et de température à partir de la condition initiale de référence  $1002W/m^2$ ,  $59^{\circ}C$  appliquée au même module photovoltaïque (ASE95G) en utilisant les deux méthodes de translations : selon la norme CEI-891 et selon la méthode simplifiée.

Comme on peut voir dans les erreurs obtenus entre les équations de translation et les valeurs mesurées, la méthode CEI-891 est relativement précise pour les paramètres fondamentaux analysés du générateur photovoltaïque ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ). Par conséquent, cette méthode est la plus favorable pour être utilisée.

Néanmoins les erreurs restent importantes cela est due aux choix de la méthode de translation ainsi que les problèmes liées aux mesures réalisées en outdoor.

L'augmentation de la marge d'extrapolation engendre des erreurs moyennes importantes quelque soit la méthode appliquée, Cela est probablement dû aux approximations apporter par l'application de ces méthodes en outdoor.

## **IV.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté et appliqué deux méthodes de translation à savoir la méthode simplifiée et celle selon la norme CEI-891 sur le module ASE95G, l'extrapolation selon la norme CEI-891 donne de résultats relativement bons comparativement à la méthode simplifiée quoi que nous avons constaté qu'il existe des différences notables pour les grandes translations et cela est dû au fait que :

- De l'existence d'une différence entre les tests in situ (en milieu naturel) et indoor (laboratoire).
  
- Les équations de translation sont empiriques.

Pour remédier à ça nous suggérons l'étude de tous les paramètres des modules et ceux des modèles en fonction de l'éclairement et de température simultanément afin de trouver des lois de variation de ces paramètres en fonction des conditions météorologiques.

# *Conclusion*

## ***Conclusion générale***

Le présent travail nous a permis de modéliser la cellule photovoltaïque. Cette modélisation de la cellule photovoltaïque tient compte des conditions réelles de fonctionnement d'éclairement et de température.

La prise en compte du fonctionnement dans des conditions réelles est importante car la plupart des modèles du générateur PV existants sont validés dans les conditions standards d'éclairement et de température ( $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $25^\circ\text{C}$ ).

A cet effet, nous avons comparé et validé différents modèles de la caractéristique Courant-Tension du générateur photovoltaïque, les plus utilisés, pour différents éclairagements et différentes températures et cela pour trois modules de technologies différentes.

En se basant sur les résultats obtenus pour les différents modèles, nous avons conclu que le modèle à cinq paramètres est le plus précis et converge dans tous les cas étudiés.

Le modèle explicite est le plus simple de ces modèles car il ne nécessite pas de méthodes itératives pour sa résolution, mais donne des résultats acceptables.

Le modèle à quatre paramètres a présenté un mauvais ajustement entre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation.

Pour compléter notre étude sur la modélisation, deux méthodes de translation de la caractéristique I-V ont été aussi appliquées pour différentes conditions d'éclairement et de température. Il ressort de cette étude que la méthode selon la norme CEI 891 donne des résultats relativement bons comparativement à la méthode simplifiée.

En perspective à ce travail, on pense, que pour avoir un outil de développement du générateur PV aussi complet que possible, qu'il faut :

-Augmenter la base de données avec d'autres températures et éclairagements et élargir cette étude avec différents types de modules et de configurations.

En conséquent avec une base des données météorologiques (ensoleillement température) on peut prévoir la production de l'électricité quotidienne, mensuelle et annuelle dans un emplacement choisis afin de bien choisir et dimensionner les différents éléments d'une chaîne de conversion photovoltaïque.

# *Références Bibliographiques*



## *Références Bibliographiques*

- [1] : D. Boukheres, "Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage", Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.
- [2] : Z. Bendjellouli, "Contribution à la modélisation d'une cellule solaire", Mémoire de Magister, Université de Béchar, 2009.
- [3] : [http:// www. thermesciel.Fr](http://www.thermesciel.fr).
- [4] : T.Desrus, "Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière", Thèse de Doctorat, Institut National des sciences Appliquées de Lyon, 2009.
- [5] : S. PETIBON, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de Doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.
- [6] : Le rayonnement solaire, <http://comprendre.meteofrance.com/>
- [7] : "Photopiles solaires", Alain Ricaud, Edition Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- [8] : T. Fromherz, F. Padinger, D. Gebeyehu, C. Brabec, J. C. Hummelen, Sariciftci, "Comparison of photovoltaic devices containing various blends of polymer and fullerene derivatives", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 63, Iss. 1, pp. 61-68, 2000.
- [9] : B. Chaouki, B.Tarek, "Optimisation floue neuronale et génétique d'un système photovoltaïque connecté au réseau", Mémoire Ingénieur, Université de Biskra, 2007.
- [10] : B. Omar, C. Idris, "L'intégration du photovoltaïque Au Réseau électrique Problèmes et Perspectives", Mémoire Ingénieur. Biskra, 2006.
- [11] : R. Chenni, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire", Thèse Doctorat, Université de Constantine, 2007.
- [12] : J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy, "Le pompage photovoltaïque", Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa /EIER/CREPA.Canada, 1998.

- [13] : B. WAFI, S. SAMAH, "Etude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque " Mémoire Ingénieur, Université de Biskra, 2006
- [14] : K. Benlarbi, "Optimisation floue, neuronale et neuro-floue d'un système de pompage photovoltaïque entraîné par différentes machines électriques : machine à induction, machine synchrone à aimants permanents et machine à courant continu ", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2001.
- [15] : R. Maouedj, "Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah". Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2005.
- [16] : C. Tranain, Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur D.U.T. Mesures Physiques Mai 2006/Juillet 2006, "Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques", Université Paris VII.
- [17] : [www.hallou-solaire.com](http://www.hallou-solaire.com)
- [18] : L. Protin, S. Astier, "Convertisseurs photovoltaïques", Traite Génie Electrique D 3360, Techniques de l'ingénieur.
- [19] : H.BEN CHEIKH, "Simulation numérique de modèle collecteur hybride photovoltaïque/Photothermique ", Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2009.
- [20] : J.F. REYNAUD, "Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques" Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III, 2011.
- [21] : H. BENNACER modélisation d'un système photovoltaïque, Mémoire de Magister, Université D Liabes Sidi bel Abbès, 2009.
- [22] : H. HACHEMI, "Contribution des nc-Si confinés à l'intérieur des couches antireflets dans l'amélioration de la réponse spectrale des cellules solaires conventionnelles", Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2011.
- [23] : <http://lyc-mgenevoix-ingre.tice.ac-orleans-tours.fr>
- [24] : H. CHENOUI, "Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion". Mémoire de Magister", Université de Batna, 2005.

- [25] : D. Saheb, Koussa, M. Haddadi, 4<sup>th</sup> International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP2007. Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans l'environnement « Matlab ».
- [26] : M. Benabbas, "Etude du problème de « HOT SPOT » dans un module solaire photovoltaïque ", Mémoire de Magister, Université de Constantine. 1984.
- [27] : A. Ricaud, "Photopiles solaire de la physique de conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés ". presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- [28] : R. Hamza, M. Khadraoui, "Modèle de détermination de la surface de sécurité lors du problème de "Hot Spot" dans un générateur PV " Mémoire Ingénieur, Université de Constantine, 1996.
- [29] : J.M. Navarro, "Cellules photovoltaïques Organiques transparentes dans le visible", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III, 2008.
- [30] : B. Azoui, "Modelization and experimentation of low power system aimed to electrification of mountainous and isolation region ", Mémoire de Magister, Université de Batna, 1990.
- [31] : A. Betka, "Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil ", Mémoire de Magister, Centre universitaire Biskra 1997.
- [32] : A. Benatiallah, "Etude expérimentale et simulation des performances d'une installation photovoltaïque de faible puissance", Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 1998.
- [33] : L. Protin, S. Astier, "Convertisseurs photovoltaïques", Techniques de l'Ingénieur D3 360.
- [34] : Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, Université de Toulouse III, 2003.
- [35] : W. Herrman, W. Wiesner, W. Vaaben, "Hot spot investigations on PV modules – New concepts for a test standard and consequences for module design with respect to bypass diodes ", 26th PVSC, Sept. 30 – Oct. 1997, Anaheim, CA.
- [36] : M. C. Alonso-Garcia, J. M. Ruiz, F. Chenlo, "Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic

- module", *Solar Energy Materials & Solar Cells* Volume 90, Issue 3, 15 February 2006, Pages 329-340.
- [37] : J. P. David, J. Duvéau, J. Guérin and A. Michel "Electrical and thermal testing and modelling of breakdown in space solar cells and generators", 23rd Photovoltaic Specialists Conference, 1993, 10-14 May 1993 pp 1415-1420.
- [38] : A. Kajihara, T. Harakawa; "Model of photovoltaic cell circuits Under partial shading", *Industrial Technology*, 2005. ICIT 2005, 14-17 Dec. 2005 Page(s):866 – 870.
- [39] : A.B. Rabii, M. Jraïdi and A.S. Bouazzi; "Investigation of degradation in field-adged photovoltaic modules", 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 11- 18, 2003.
- [40] : T. Fogelman, "Système photovoltaïque pour les pays en déventement, manuel d'installation et d'utilisation", Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME).
- [41] : C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi "Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger ", 2006.
- [42] : A. Guen, "Contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles Alimentés par énergie solaire ", Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 1992.
- [43] : [www.solarelectripower.org](http://www.solarelectripower.org).
- [44] : R. Mukund. Patel, Ph.D., P.E, "Wind and Solar Power Systems", U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, 1999.
- [45] : B. Sorensen, "Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects", Roskilde University Energy & Environmen Group, Institute 2, Universitetsvej 1, P. O. Box 260 DK-4000 Roskilde, Denmark.
- [46] : L. BOCQUET, " L'énergie solaire en Israël", Ambassade de France en Israël – Mission Scientifique, Web: <http://www.ambafrance-il.org/sciences>, 2004.

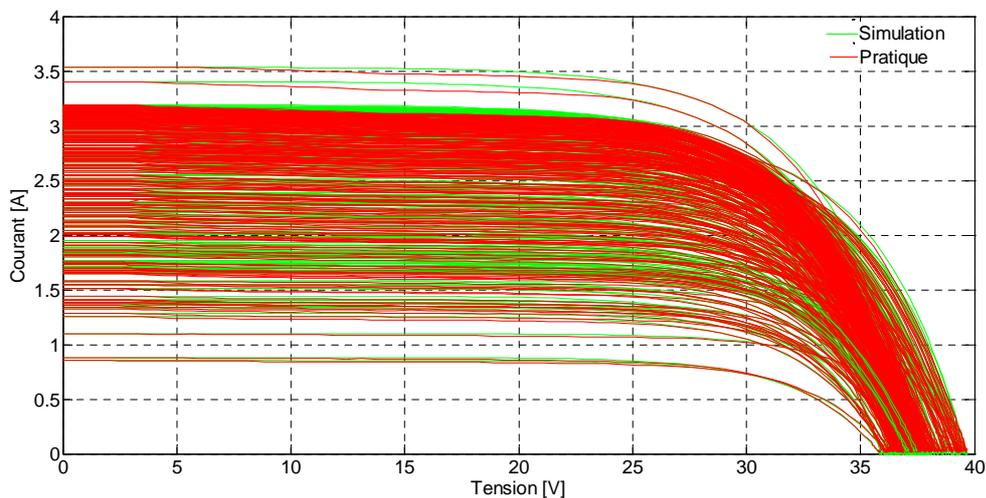
- [47] : J. Royer, "Le pompage photovoltaïque ", "Manuel de cours à l'intention des techniciens et ingénieurs" Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français
- [48] : S. J. Chiang, "Residential Photovoltaic Energy Storage System" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 45, NO. 3, JUNE 1998.
- [49] : K. AGROUI, "Contribution a l'études des performances des modules photovoltaïque en couches minces", 8ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Centre Universitaire de Béchar Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.
- [50] : H. Doming. Pontoriero, "Network Compensation with Active Power Filters Integrated to PV Generation", Paper accepted for presentation at PPT 2001 200 1 IEEE Porto Power Tech Conferenceloth -13lh September, Porto, Portugal.
- [51] : M.F. Shraif "Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique ". Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2002.
- [52] : "Conversion des énergies ", Document de cours (EN01), Université de Tlemcen, 2001-2002.
- [53] : G. W. HART, "Residential photovoltaic system simulation electrical aspect", IEEE pp: 281-288 (1982).
- [54] : V. T. CLAUDIA, LAURO DE V. B MACHADO NETO, "Model and simulation of photovoltaic modules", World Renewable Energy Congress VIII (WREC 2004).
- [55] : D. S. H. CHAN, J. R. PHILIPS and J. C. H. PHANG. "A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters", Solid State Electronics, Vol.29, N° 3, pp : 329-337 (1986).
- [56] : E. LORENZO. Solar electricity, "Proceedings of conference of engineering of photovoltaic systems", Progensa, Spain (1994).
- [57] : G. NOTTON, I. CALUIANU, I. COLDA and S. CALUIANU. "Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin", Vol. 13 N°1 (2010) 49 - 62.

- [58] : O. GERGAUD, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de Doctorat de l'école Normale Supérieure de Cachan 9 décembre 2002.
- [59] : O. AMRANI, D. REKIOUA, "Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques", université A.Mira de Bejaia.
- [60] : D. L. King, J. A. Kratochvil, W. E. Boyson, and W.I. Bower, Sandia National Laboratories. "Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays".
- [61] : Y. Jiang, "Computation of monthly mean daily global solar radiation in china using artificial neural networks and comparison with other empirical models", *Energy* 34, 1276-1283, 2009.
- [62] : S. Coors and M. Bühm, "Validation and comparison of curve correction procedures for silicon solar cells, "Proc. 141th E.C. PV Solar Energy Conf, Barcelona, 220-223 1997.
- [63] : A. RICAUD. Photopiles solaires de la physique de la conversion PV aux filières, matériaux et procédés. Presses polytechniques et universitaires romandes Ch-1015 Lausanne, 1997.
- [64] : F. CHENLO, F. FABERO and M.C. ALONSON, A comparative study between indoor and outdoor measurements. Informe final de proyecto: Testing, Norms, Reliability and Harmonisation. Joule II- contract N. JOU2-CT92-0178. 1995.
- [65] : R. BERNARD, G. MENGUY and M. SCHWARTZ, "Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, technique et documentation Lavoisier", Paris, 1983.

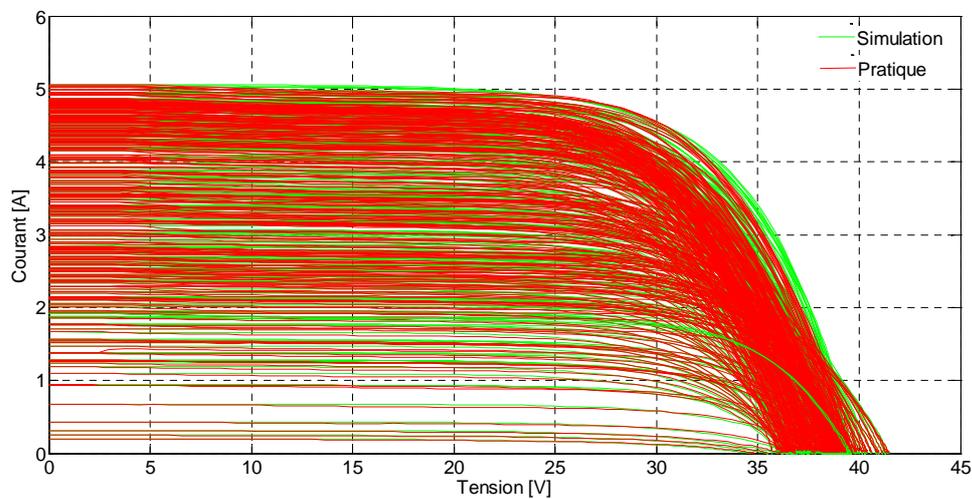
# *Annexes*

## Annexe A

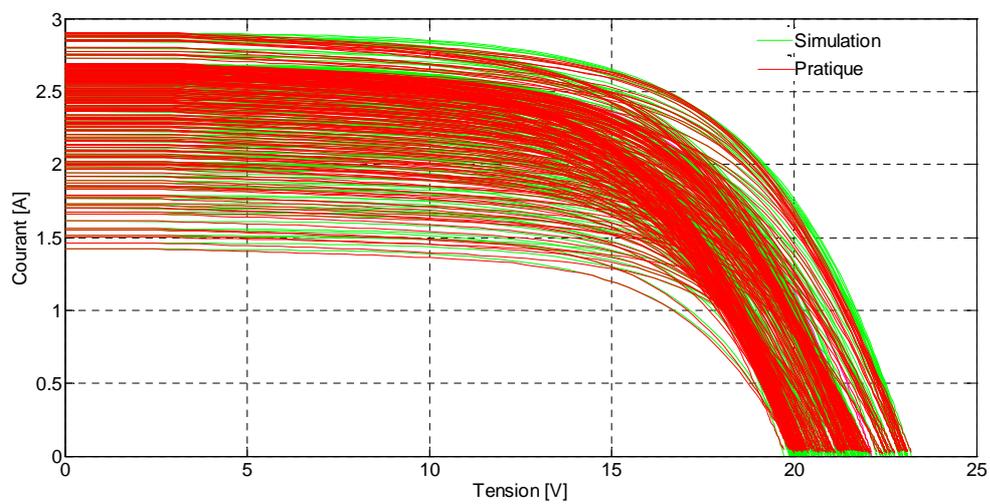
*Les caractéristiques I-V des trois modules pour toutes les données récoltées*



*Les 267 caractéristiques I-V pratiques et simulées pour le module ASE95G*



*Les 284 caractéristiques I-V pratiques et simulées pour le module BP3160G*



*Les 210 caractéristiques I-V pratiques et simulées pour le module ST40G*

## Annexe B

**Tableau** : Caractéristiques des modules photovoltaïques utilisées pour différents éclairagements et températures

Modules	T (°C)	E (W/m <sup>2</sup> )	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>m</sub> (W)	I <sub>m</sub> (A)	V <sub>m</sub> (V)	FF
<b>ASE95G</b>	34	361	1,0969	38,557	30,882	0,99676	30,983	0,7302
	42,7	495	1,5439	38,104	42,082	1,375	30,605	0,71535
	48,2	690	2,1689	37,123	55,939	1,9296	28,99	0,69474
	54,3	842	2,5881	36,948	65,674	2,3152	28,366	0,68678
	59	1002	3,0947	36,7438	76,629	2,7438	27,928	0,67604
<b>BP3160G</b>	20,6	386	1,9304	41,496	57,921	1,7149	33,774	0,72306
	31,6	539	2,6705	40,578	77,907	2,411	32,311	0,71894
	42,9	705	3,5232	39,259,	97,671	3,2055	30,47	0,70613
	54,9	895	4,3475	38,343	113,76	3,9014	29,159	0,68243
	63,9	1017	4,9912	37,102	123,15	4,4023	27,974	0,66503
<b>ST40G</b>	30,8	556	1,5039	22,438	21,932	1,2651	17,337	0,64993
	39,8	666	1,7809	22,081	24,823	1,4804	16,767	0,63125
	48,6	753	2,0487	21,275	26,931	1,6859	15,974	0,6179
	56,6	908	2,459	21,007	31,629	2,0665	15,306	0,61229
	66,5	1007	2,6937	19,877	31,808	2,2075	14,409	0,59408

## **Résumé**

Après une description succincte des principes de base liés à la conversion photovoltaïque, nous présentons les différents modèles d'une cellule photovoltaïque existant dans la littérature. Ces modèles sont étudiés dans des conditions standards d'éclairement et de température. ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ )

En se basant sur des données expérimentales obtenues à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, nous proposons une validation de ces modèles dans les conditions réelles de fonctionnement d'éclairement et de température. Nous présentons deux méthodes de translation de la courbe courant-tension (I-V) donnée à des conditions déterminées d'éclairement et de température vers d'autres conditions distinctes désirées.

**Mots clés :** Photovoltaïque, Modèle, Translation

## **Abstract**

After a brief description of the basic principles related to photovoltaic (PV) conversion, we present different models of photovoltaic generator existing in literature. These models are studied in standard illumination and temperature conditions ( $100\text{ W}/\text{m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ).

From experimental data obtained in the unit of applied research in renewable energy Ghardaïa , we propose a validation of those models in real illumination and temperature working conditions. We present two methods of the translation of the curve current-voltage (I-V) given under determined conditions of illumination and temperature to other desired distinct conditions.

**Key words :** Photovoltaic, Model, Translation