

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

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE  
FACULTE DES SCIENCES EXACTES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre :

Série :

MEMOIRE

PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE

OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES

THEME

**ETUDE ET MODELISATION DES DIFFERENTS MODELES DE LA  
CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ETABLIS SUR BASE DE VALEURS  
NOMINALES**

PAR:

**AOUN Nouar**

Soutenu le : / 0 / 2010

Devant le jury

Président : A. CHAKER	Prof	Université Mentouri	Constantine
Rapporteur : R. CHENNI	M.C.	Université Mentouri	Constantine
Examineur : M. BENABBAS MARIR	Prof	Université Mentouri	Constantine
Examineur : N. BELLEL	M.C.	Université Mentouri	Constantine
Examineur : M. DJEZZAR	M.C.	Université Mentouri	Constantine

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur Chenni Rachid, maître de conférence au département d'électrotechnique, de l'université Mentouri, qui a permis de réaliser ce travail sous sa direction et pour son soutien précieux tout le long du travail.

Je remercie vivement :

- Madame A Chaker, professeur à l'université de Constantine qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance.
- Madame M Benabbas Marir, Professeur au département d'électronique, pour son intérêt accru dans ce domaine et son accord pour être examinatrice de cette thèse;
- Monsieur N Bellel, Maitre de conférence au département de physique, qui a accepté d'examiner ce travail.
- Monsieur M. Djeddar, Maitre de conférence au département de physique qui m'honore de sa présence en étant membre de jury;

Je remercie également tous les étudiants de l'école doctorale des énergies renouvelables et tous mes amis qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

# *Dédicaces*

*À mes parents, mes frères, mes sœurs,*

*et*

*A tous ceux qui me sont chers,*

*Je dédie ce modeste travail.*

*Nouar Aoun*

## Notation et Symboles :

PV	Photovoltaïque
AM	Masse d'air
$I_{ph}$	Courant de la cellule PV (Photo-Courant)
$I_{obsc}$	Courant de l'obscurité de la diode
$I_o$	Correspondant au courant de saturation
$R_s$	Résistance série
$R_{sh}$	Résistance shunt
$\mu_{voc}$	Coefficient de la température de tension de circuit ouvert
$\mu_{Isc}$	Coefficient de la température de courant de court circuit
$k$	La constante de Boltzmann ( $1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K),
$q$	La charge de l'électron
$\gamma$	Le facteur de qualité de la jonction
$T$	Température
$T_{ref}$	Température de référence
$I_{sc}$	Courant de court circuit
$V_{oc}$	Tension de circuit ouvert
$\eta$	Rendement
$E$	Eclairement
$E_g$	Energie de Gap du matériel en eV
$E_{ph}$	Energie de photon
$\lambda$	La longueur d'onde en $\mu m$
$\alpha$ , et $\beta$	Constante empirique
$P_p$	La puissance maximum,
$V_p$ , $I_p$	La tension et le courant de la puissance maximale fournie
$V_{opt}$ , $I_{opt}$	Courant et tension de puissance optimale
FF	Facteur de forme
SRC	Condition de référence standard ( $1000 \text{ W/m}^2$ , $25^\circ\text{C}$ )
$N_s$	Nombre de module en série
$N_p$	Nombre de module en parallèle
NCS	Le nombre de cellules en série
<i>ref</i>	Indice représente les valeurs à la condition standard
$E_{g0}$	Energie de bande gap à température égale à 0 K
DC	Courant continue

MPP	Point de fonctionnement optimal 'Maximum Power Point'
MLI	Modulation à largeur d'impulsion
MPPT	Suiveur /Algorithme du point de fonctionnement optimal
L	L'inductance
K	L'interrupteur (switch)
D	Le diode
C	La capacité
$\alpha$	Rapport cyclique (duty cycle)
$R_{ch}$	Résistance de charge
$R_a$	La résistance d'armature
$K$	Constante
$\omega$	La vitesse angulaire du rotor en <i>rad/sec</i>

# SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
<b>Chapitre I - L'état de l'art du générateur photovoltaïque.....</b>	<b>04</b>
I.1- Introduction.....	05
I.2- Historique des cellules solaires.....	05
I.2.1- L'utilisation de la jonction <i>PN</i> comme capteur.....	05
I.2.2- Principe de fonctionnement .....	07
I.2.3- Variation de l'énergie de bande gap.....	09
I.3- Les différents paramètres de la cellule photovoltaïque.....	10
I.4- les différents types des cellules solaires.....	12
I.4.1- Les cellules mono-cristallines.....	12
I.4.2 - Les cellules poly-cristallines .....	12
I.4.3- Les cellules amorphes .....	12
I.5- Modélisation des cellules photovoltaïque .....	13
I.6- Influence des différents paramètres .....	14
I.6.1- Influence de l'éclairement.....	14
I.6.2- Influence de la température.....	15
I.6.3- Influence simultanée du rayonnement et de température.....	15
I.6.4- Influence de la résistance série .....	16
I.6.5- Influence de la résistance shunt .....	16
I.6.6- Influence du facteur de qualité.....	17
I.7- Le module photovoltaïque.....	17
I.8- Le générateur photovoltaïque.....	17
I.8.1- Association en série.....	18
I.8.2- Association en parallèle.....	18
I.8.3- Association mixte (série parallèle).....	19
I.9- Spécification du générateur photovoltaïque.....	20
I.10- Facteurs limitant le rendement.....	21
I.11- Avantages, inconvénients.....	22
I.11.1- Avantages.....	23
I.11.2- Inconvénients.....	23
I.12- Conclusion.....	24
<b>Chapitre II : Modèle photovoltaïque à quatre paramètres.....</b>	<b>25</b>
II.1-Introduction.....	26
II.2- Caractéristique de la cellule photovoltaïque .....	27

II.3- Les paramètres de référence .....	27
II.4- Méthode de bisection .....	28
II.4.1- Évaluation de la résistance série $R_s$ .....	29
II.5- Comportement thermique .....	32
II.5.1- La variation de la bande d'espace avec la température.....	32
II.5.2- La résistance série constante .....	33
II.5.3- La résistance série en fonction de la température.....	36
II.5.3.1- Résolution matricielle.....	39
II.5.3.2- Extrapolation à des températures éloignées de la température de référence.....	41
II.6- Conclusion.....	45
<b>Chapitre III : Modèle photovoltaïque à cinq paramètres.....</b>	<b>46</b>
III.1- Introduction.....	47
III.2- Les paramètres de référence.....	47
III.3- Simulation du comportement des modèles photovoltaïques étudiés.....	51
III.4- Le modèle à deux exponentielles.....	54
III.4.1- Les paramètres du circuit équivalent.....	54
III.5- Les paramètres de référence.....	55
III.5.1- Valeur du paramètre $\gamma_2$ .....	56
III.6- Résolution du système d'équations .....	56
III.6.1- Fixation des bornes pour $R_s$ .....	56
III.6.2- Recherche de la valeur de $R_s$ .....	57
III.7- Comment déterminer $R_{sh}$ .....	58
III.7.1- Possibilité de considérer $R_{sh}$ comme infini.....	60
III.8- Conclusion .....	62
<b>Chapitre IV : Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT).....</b>	<b>64</b>
IV.1- Introduction.....	65
IV.2- Point de puissance maximale .....	65
IV.3- Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale.....	66
IV.4- Types de régulateurs pour alimentations .....	68
IV.4.1- Convertisseur buck.....	68
IV.4.2- Convertisseur boost.....	68
IV.4.3- Convertisseur buck-boost.....	69
IV.5- Adaptation du générateur photovoltaïque au système global.....	69
IV.6- Différents types de MPPT.....	70
IV.6.1- Méthode de perturbation et d'observation (P&O) .....	70

IV.6.2- Méthode de l'Accroissement de la conductibilité (Incremental Conductance Method)...	73
IV.7- Commandes MPPT.....	74
IV.7.1- Généralités.....	74
IV.7.2- Couplage à travers un convertisseur.....	75
IV.8- Simulation du fonctionnement électrique du système photovoltaïque .....	77
IV.9-Conclusion .....	78
Conclusion générale.....	79
Annexe.....	81
Bibliographie.....	84

## *Introduction générale*

## **INTRODUCTION GENERALE :**

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entraînera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et tend dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

D'autre part, ce type de consommation énergétique n'est pas neutre sur l'impact environnemental. Pour les hydrocarbures et le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des sources non polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics.

À ce jour, le photovoltaïque a trouvé son utilité dans des applications à petites échelles et pour des systèmes de transmissions isolés. L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie intéressante. Elle est renouvelable, inépuisable et non polluante. Pour qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications et pour satisfaire les contraintes du coût, le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules photovoltaïques.

Le courant électrique produit d'un panneau photovoltaïque dépend du rayonnement solaire incident, la température de cellules, l'angle solaire d'incidence et la résistance de charge. Les fabricants ont typiquement tendance à fournir seulement des données opérationnelles limitées pour les panneaux photovoltaïques, tels que la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ , le courant de court circuit  $I_{sc}$ , le courant et tension maximum de puissance ( $I_p$ ,  $V_p$ ), les coefficients de la température à la tension de circuit ouvert et au courant de court circuit ( $\mu_{V_{oc}}$  et  $\mu_{I_{sc}}$ , respectivement), et la température des cellules en fonction nominale (NOCT).

Ces données sont disponibles seulement aux états standard d'estimation (SRC), pour ce qui est de l'irradiation  $1000 \text{ W/m}^2$  et la température de cellules  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique de chaque élément de la cellule aussi bien que les

caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque.

Pour qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications et pour satisfaire les contraintes du coût, le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules photovoltaïques.

Pour cela, il faut extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque, et en général non puisée par la charge. Une bonne rentabilité du générateur photovoltaïque peut être réalisée si celui-ci travaille au maximum de puissance tout le temps. Or, le point de puissance maximum varie selon plusieurs paramètres comme l'irradiation solaire, la température et la nature de la charge. Ce type de variation est aléatoire. Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la charge, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $I_{opt}$ ,  $V_{opt}$ ).

Notre travail consiste à définir les différents modèles existants dans la littérature, comprendre la méthodologie de simulation de ces modèles et proposer un modèle qui approcherait le comportement électrique et climatique de la cellule photovoltaïque établi sur base de valeurs nominales. Pour cela, le présent travail, sera structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet en général, Nous avons expliquée le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, la variation de l'énergie de bande gap par rapport à la température, les différents types des cellules solaires et aussi l'influence du rayonnement et de la température, et les caractéristiques des cellules sur la courbe  $I-V$  et  $P-V$ . Ainsi, nous avons étudié les caractéristiques principales des cellules photovoltaïques ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût.

Ensuite, dans le second chapitre de ce travail, nous avons voulu montrer comment déterminer les paramètres inconnus ( $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $\gamma$ ) du modèle à quatre paramètres en utilisant seulement les données du fabricant sur les modules. Nous avons montré comment utiliser le comportement thermique pour obtenir les nouvelles courbes  $I-V$  et  $P-V$ .

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié deux modèles différents; le modèle à une diode et le modèle à deux diodes avec cinq paramètres inconnues, en utilisant seulement les données du fabricant.

Dans le quatrième chapitre, nous avons expliqué comment utiliser la poursuite du point de puissance maximum (MPPT), et quelques types des méthodes (P&O, INC,...etc). Le principe de

régulation de recherche du point optimal de fonctionnement, lors des changements brusques de conditions climatiques a été étudié et testé sur un modèle simplifié qui convient bien à une réalisation pratique.

**Chapitre I :**

***L'état de l'art du générateur photovoltaïque***

**I.1- Introduction**

De tout temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. La plupart des utilisations, connues depuis des siècles, sont directes comme en agriculture à travers la photosynthèse ou dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 W/m<sup>2</sup> crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m<sup>2</sup> lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

Signalons dès à présent le flux solaire reçu au niveau de sol dépend de :

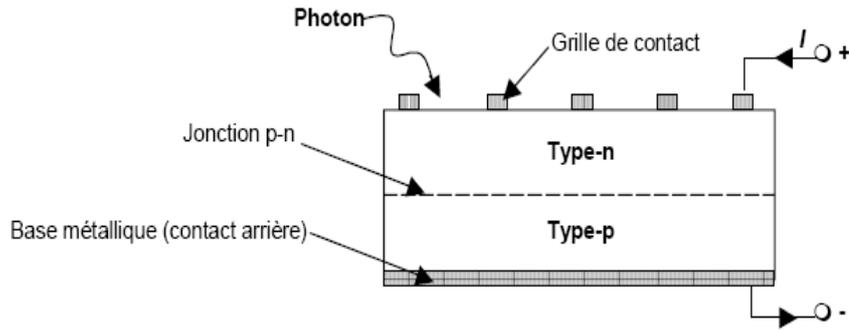
- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- la latitude du lieu de collecte, son degré de pollution ainsi que son altitude,
- la période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

**I.2- Historique des cellules solaires [1]**

C'est en 1839 que le physicien français *Edmond Becquerel* découvre que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. *Albert Einstein* expliqua le phénomène photoélectrique en 1912 mais ce n'est qu'en 1954 que la première cellule photovoltaïque a été mise au point par des chercheurs des laboratoires *Bell aux USA*. Cette première cellule photovoltaïque était en silicium.

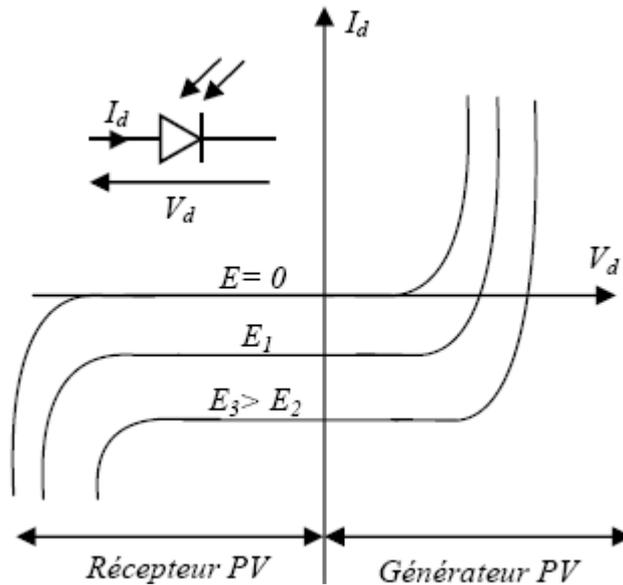
**I.2.1- L'utilisation de la jonction PN comme capteur [2]**

Une jonction PN est formée quand les semi-conducteurs de type (*n*) et de type (*p*) sont placés en contact. Dans un tel dispositif, certains des électrons de conduction excessifs dans le matériau émigrent rapidement au matériau de type (*p*) pour combler les trous de valence. Ceci provoque un champ électrique fort et permanent à proximité de la jonction, comme il est montré ci-dessous:



**Fig. I.1 : Principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque Jonction PN.** [3]

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation de composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée sur la figure I.2.



**Fig I.2 : Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclaircissements (E).** [4]

Ce comportement statique peut être décrit par l'équation électrique suivante [5]

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q.V}{\gamma.k.T}\right) - 1 \right] \tag{I.1}$$

$I_0$  correspondant au courant de saturation,  $k$  la constante de Boltzmann ( $1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $T$  la température effective des cellules (en Kelvin),  $q$  la charge de l'électron, et  $\gamma$  le facteur de qualité de la jonction. Sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule, cependant, il varie peu avec la tension appliquée, tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Il faut noter que ces courants directs ou inverses comme pour des jonctions classiques sont sensibles à la température de jonction.

**I.2.2- Principe de fonctionnement**

L'effet photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique utilisable de type continue.

A chaque photon, on associe une énergie  $E_{ph} = h\nu$  ou  $\nu$  est la fréquence associée à la longueur d'onde du photon ( $\lambda = c / \nu$ , avec  $c$  la célérité de la lumière dans le vide). Pour passer de l'énergie de photon  $E_{ph}$  à la longueur d'onde, on utilise la relation suivante où  $\lambda$  est en  $\mu m$  :

$$E_{ph} = \frac{1.24}{\lambda} \tag{I.2}$$

La cellule solaire n'est sensible que dans un domaine de longueurs d'onde particulier et seul un matériau semi-conducteur dispose de la structure de bande nécessaire à la génération, à partir de rayonnement solaire, de paires électron / trou utilisable.

En effet, dans un métal, tous les niveaux supérieurs au niveau de *Fermi* sont autorisés et toutes les longueurs d'onde sont donc susceptibles d'être absorbées. Cependant, les paires électron / trou générées se recombinent quasi-instantanément, ce qui ne laisse pas la possibilité de les exploiter.

Un matériau isolant possède un gap d'au moins  $8 eV$ . Le photon incident, pour interagir avec un électron, devra donc fournir une énergie supérieure à  $8 eV$ , ce qui correspond à des  $\lambda < 0.15 \mu m$  (UV), domaine qui ne couvre pas le rayonnement solaire.

Dans un semi-conducteur, la structure des bandes de conduction et de valence définit un gap plus faible que dans le cas des isolants : de  $0.3$  à  $2$  ou  $3 eV$ .

Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère [4].

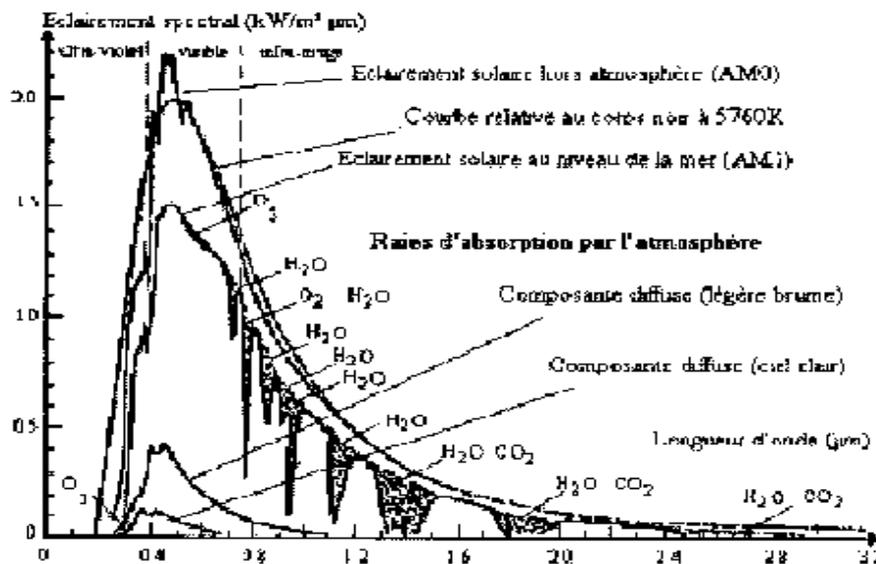


Fig 1.3 : Exemple de spectre solaire. [4]

Les longueurs d'ondes ( $\lambda$ ) du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre  $0,2\mu m$  (ultra-violet) et  $4\mu m$  (infra-rouge) avec un maximum d'énergie pour  $0,5\mu m$ . 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre  $0,2\mu m$  et  $2,5\mu m$ . De  $0,4\mu m$  à  $0,78\mu m$ , le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. Le tableau 1.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [4].

$\lambda$ ( $\mu m$ )	$E_{ph}$ (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

**Tableau I.1 Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.** [4]

Si le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de celle de valence, le gap est dit directe, les transitions sont donc directes et radiatives. Dans le cas de silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement de vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif centrale de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorbé un photon. Notons que la valeur de gap indirect du silicium est de 1.12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle de premier gap directe vaut 3.4 eV (soit 365 nm)

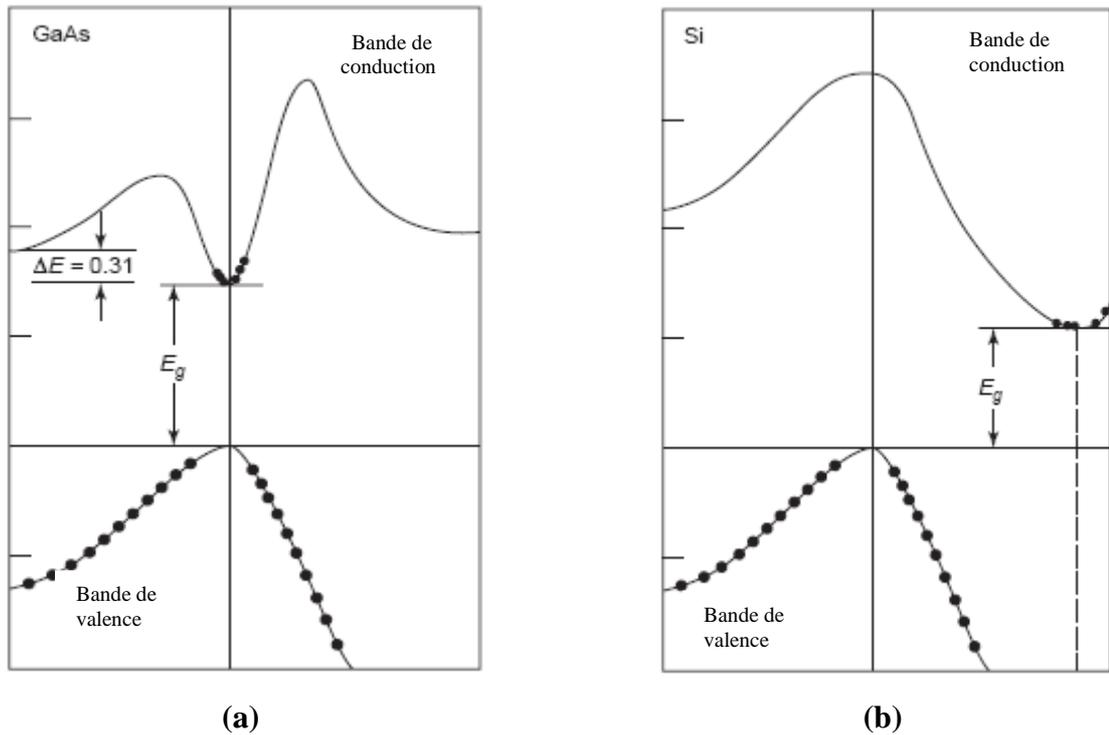


Fig. I.4 : Courbes de dispersion :(a) à gap direct ;(b) à gap indirect. [6]

### I.2.3- Variation de l'énergie de bande gap

À la température ambiante et sous la pression atmosphérique normale, les valeurs du bande gap sont 1.12 eV pour le silicium et 1.42 eV pour GaAs. Ces valeurs sont pour les matériaux de grande pureté. Pour les matériaux fortement, dopés les bandes gap deviennent plus petites. Les résultats expérimentaux prouvent que les bandes gap de la plupart des semi-conducteurs diminuent avec l'augmentation de la température [7]. La figure I.5 montre des variations des bandes gap en fonction de la température pour le silicium et GaAs. Le bande gap approche à 1.17 eV et 1.52 eV respectivement pour ces deux semi-conducteurs à 0 K [7]. La variation des bandes gap avec la température peut être exprimée approximativement par une fonction proposée par Varshni [8] [9]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)} \tag{I.3}$$

Où  $E_g(0)$ ,  $\alpha$ , et  $\beta$  sont donnés dans le tableau de la figure (I.2). Le coefficient de la température

$\frac{dE_g}{dT}$  est négatif pour les deux semi-conducteurs [7].

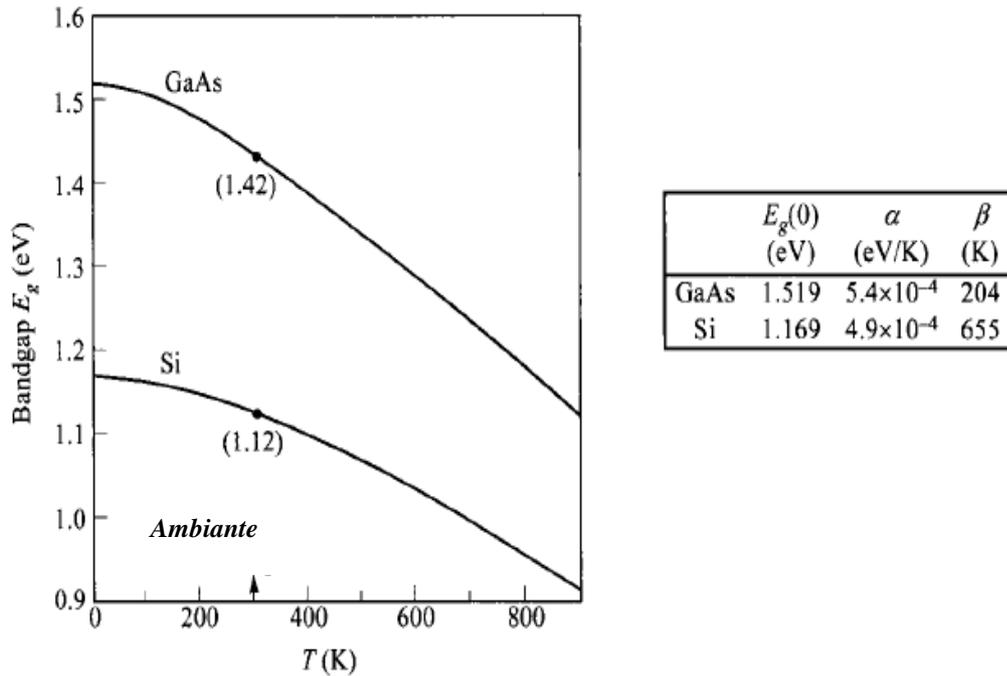


Fig. I.5 : Energie bande gap de silicium et de GaAs en fonction de la température. [7]

**I.3- Les différents paramètres de la cellule photovoltaïque [10]**

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \tag{I.4}$$

Avec:

$I_{ph}$  : densité de courant photogénéré et  $I_{obsc}$  : densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule solaire idéale, l'équation (I.4) peut être écrite sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \tag{I.5}$$

Avec:

$I_0$  : courant de saturation de la diode,  $q$  : charge élémentaire,  $k$  : constante de Boltzmann,  $T$  : température

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. [11] [12]

❖ *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.

La tension  $V_{oc}$  est donnée par la relation :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} - 1 \right) \quad (I.6)$$

❖ *La puissance maximum,  $P_p$  :*

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit :

$$P_p = I_p V_p \quad (I.7)$$

Avec :  $V_p$  : la tension correspondante à la puissance maximale fournie, et  $I_p$  : le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

❖ *Facteur de forme,  $FF$  :*

La puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement  $P_p$  ( $I_p$  et  $V_p$ ) de la courbe courant-tension. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{V_p I_p}{V_{oc} I_{sc}} \quad (I.8)$$

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme  $FF$  ne peut pas être supérieur à 0.89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension.

❖ *Le rendement,  $\eta$  :*

Le rendement,  $\eta$  des cellules photovoltaïque désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre le rapport maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

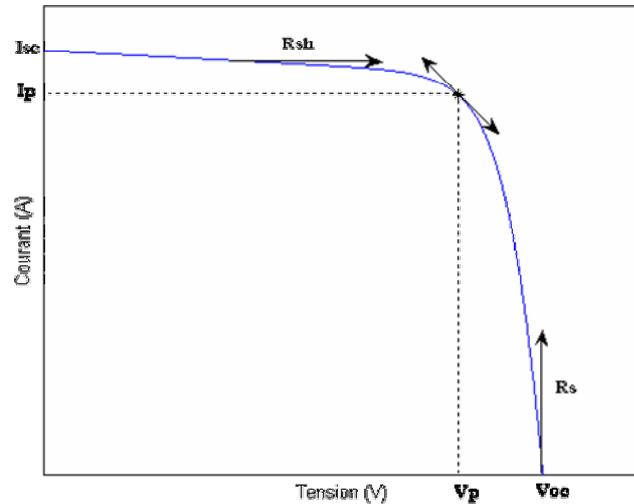
$$\eta = \frac{V_p I_p}{P_{incidente}} \quad (I.9)$$

Où bien

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{sc} V_{oc}}{P_{incidente}} \quad (I.10)$$

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

Chacune de ces grandeurs ( $V_p$ ,  $I_p$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ) est représentée sur la figure I.6.



**Fig. I.6: Points et valeurs remarquables de la caractéristique I-V.**

#### I.4- Les différents types des cellules solaires [13]

Il existe trois types principaux de cellules :

##### I.4.1- Les cellules mono-cristallines

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %.

Ces cellules présentent néanmoins des inconvénients:

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).

##### I.4.2- Les cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Les cellules poly-cristallines est caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

##### I.4.3- Les cellules amorphes

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin.

Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

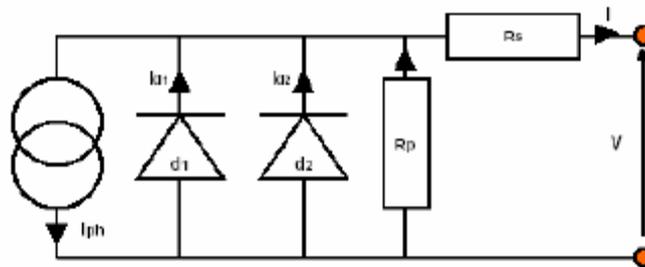
- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire.

### I.5- Modélisation des cellules photovoltaïque

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles électriques ont été proposés dans la littérature pour représenter la cellule photovoltaïque [14] [15] [16].

Pour tenir compte des différentes limitations de la cellule photovoltaïque, on introduit la figure I.7 représentant ces différentes limitations.



**Fig. I.7 : Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque. [11]**

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- Le générateur de courant* : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photogénééré.
- La résistance série* : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact *métal-semiconducteur*, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Son effet devient très remarquable dans un module photovoltaïque composé de beaucoup de cellules connectées en série, et la valeur de la résistance est multipliée par le nombre de cellules.
- La résistance parallèle* : également connue sous le nom de résistance shunt, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion

des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible. Son effet est beaucoup moins remarquable dans un module photovoltaïque par rapport à la résistance série, et il deviendra seulement apparent quand un certain nombre de modules photovoltaïques sont reliés en parallèle pour un plus grand système.

d) *La diode (d1)* : modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.

e) *La diode (d2)* : modélise la génération/recombinaison dans la zone de charge d'espace.

Récapitulant ces effets, le rapport courant-tension de la cellule photovoltaïque est donc donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ e^{q \left( \frac{V + IR_s}{kT} \right)} - 1 \right] - I_{02} \left[ e^{q \left( \frac{V + IR_s}{\gamma kT} \right)} - 1 \right] - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (I.11)$$

Le facteur de qualité,  $\gamma$  (constante empirique) permet de qualifier les mécanismes de conduction [5]:

- une valeur inférieure à l'unité est associée à une recombinaison de type *Auger* dans des conditions de forte injection ( $\gamma=2/3$ ). Pour une homojonction dissymétrique ce mécanisme conduit à des durées de vie de porteurs minoritaires réduites et à un courant de recombinaison élevé.

- $\gamma=1$  correspond à la jonction idéale.

- pour  $\gamma$  compris entre 1 et 2, le niveau des pièges est décentré et  $\gamma$  est alors dépendant de la polarisation. Dans le cas où les pièges sont localisés à la surface de la zone de charge d'espace le facteur de qualité ne serait pas fonction de la polarisation.

- la valeur particulière  $\gamma=2$  correspond au modèle de *Shockley*.

- une valeur du facteur de qualité supérieure à 2 peut indiquer que la recombinaison s'effectue par des courants de fuite à la surface de la zone de charge d'espace, par des courants shunt indépendants de la température, et peut correspondre aussi à une distribution de pièges non uniforme avec une densité plus faible au milieu de la zone de charge d'espace.

## **I.6- Influence des différents paramètres**

### **I.6.1- Influence de l'éclairement**

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit. Pour un module référencié MSX60; L'augmentation du flux lumineux fait accroître le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , ainsi que la tension à circuit ouvert, comme le montre la figure I.8.

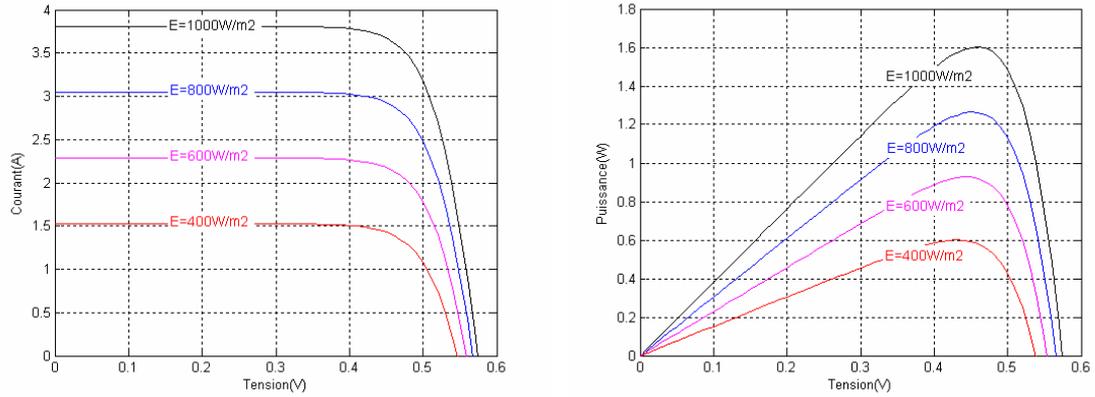


Fig.I. 8 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique *I-V* et *P-V*.

I.6.2- Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. La figure I.9 montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

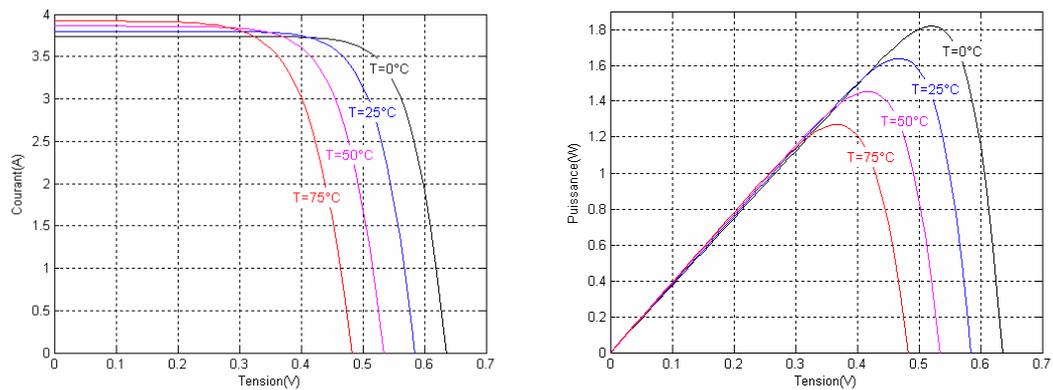


Fig.I. 9 : Influence de la température sur la caractéristique *I-V* et *P-V*.

I.6.3- Influence simultanée du rayonnement et de température

L'augmentation du rayonnement et de la température entraîne une diminution de la tension et une augmentation du courant

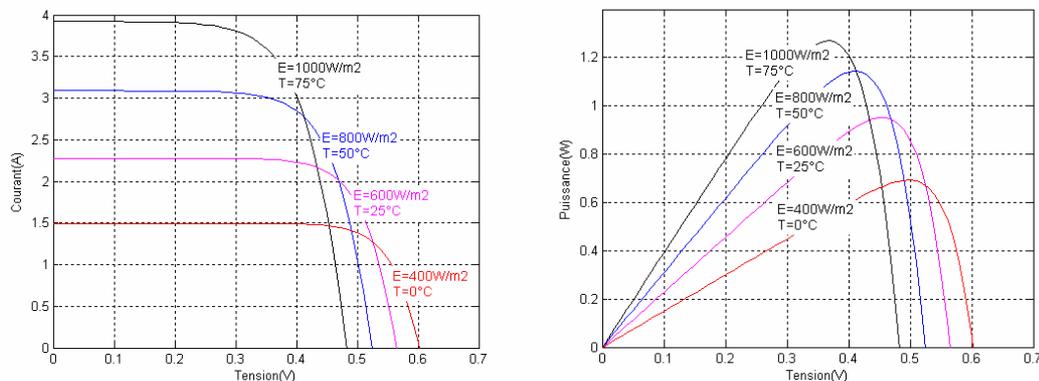
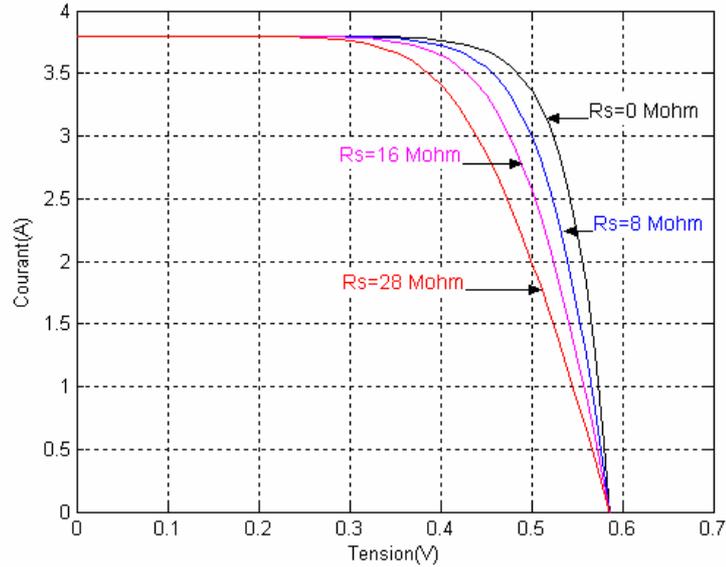


Fig.I.10 : Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur *I-V* et *P-V*.

**I.6.4- Influence de la résistance série**

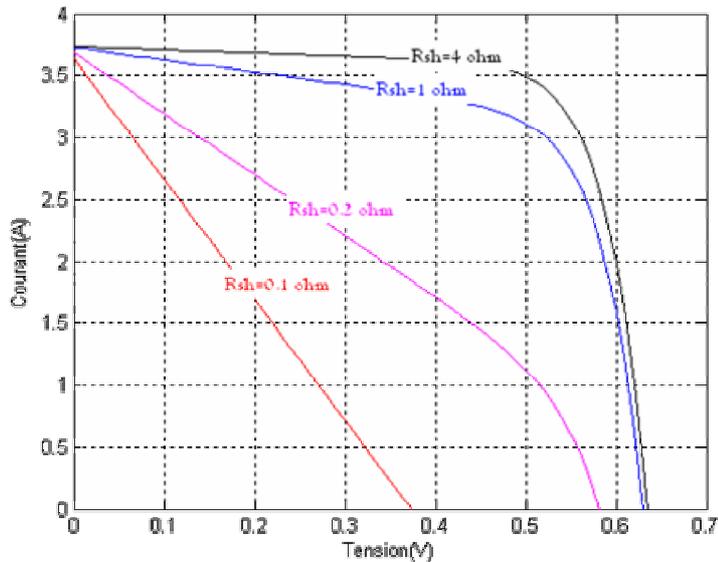
La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit.



**Fig.I.11 : influence de la résistance série sur I-V.**

**I.6.5- Influence de la résistance shunt**

Lorsque la résistance shunt diminue, la tension de circuit ouvert et le courant de court circuit sont diminués. Lorsque la résistance shunt est très petite son influence est très remarquable, comme le montre la figure 1.12.



**Fig. I. 12 : Influence de la résistance shunt sur I-V.**

### I.6.6- Influence du facteur de qualité

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement

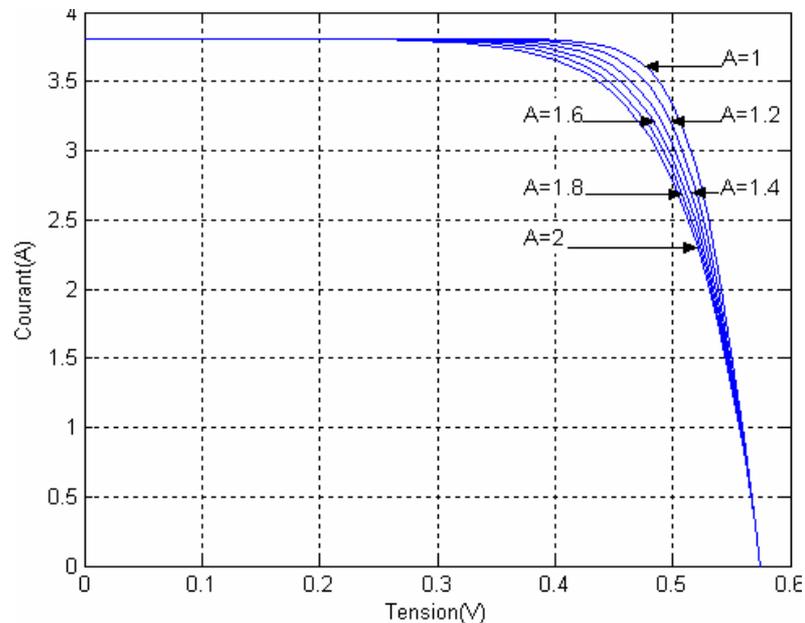


Fig. I. 13 : Influence du facteur de qualité sur I-V.

### I.7- Le module photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque produit une tension d'environ 0.6V, pour augmenter cette tension on connecte un certain nombre des cellules (36 ou 72 cellules) en série pour aboutir à une tension désirée de l'ordre de 21V. Quand les cellules connectées en séries sont placées dans une armature, l'ensemble constitue un module photovoltaïque.

Un module de 36 cellules fournit une tension appropriée pour charger une batterie de 12V, et pareillement un module de 72 cellules est approprié pour une batterie de 24V.

### I.8- Le générateur photovoltaïque

Des modules multiples peuvent être câblés ensemble en série ou parallèle pour livrer la tension et le courant nécessaire. Le groupe de modules s'appelle un panneau photovoltaïque.

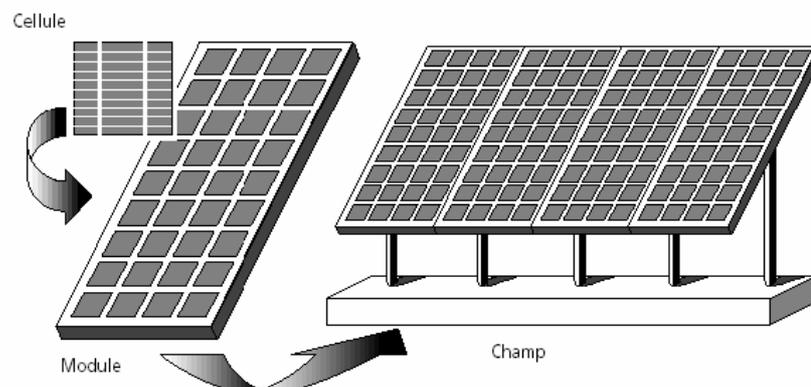
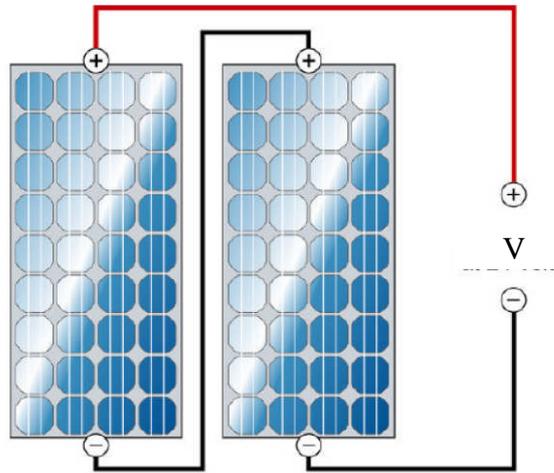


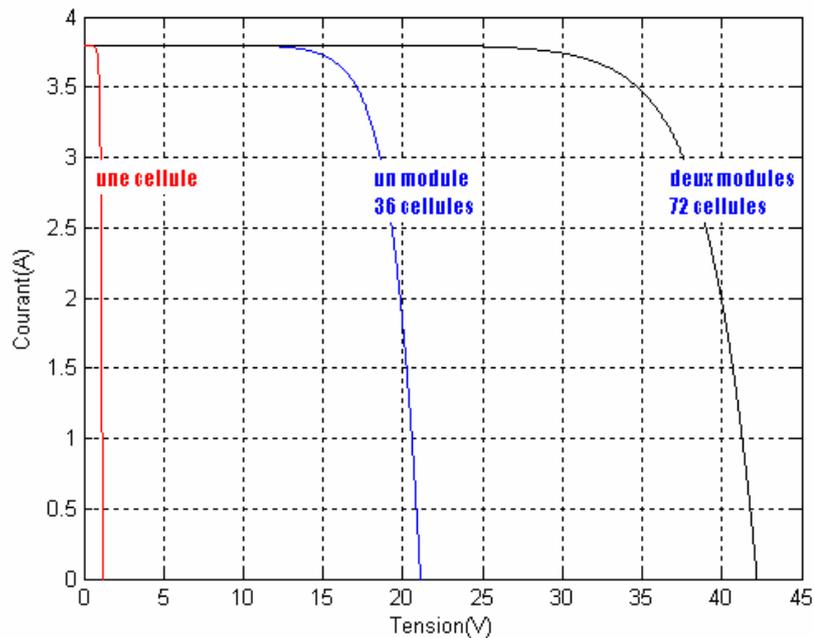
Fig. I. 14 : Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque. [13]

**I.8.1- Association en série**

Dans une association en série, comme illustré sur la figure ci-dessous, le même courant traverse chaque cellule tandis que la tension globale est la somme des tensions à travers toutes les cellules.



**Fig. I. 15 : Association des modules en série. [17]**



**Fig. I. 16: Caractéristique I-V en association en série.**

**I.8.2- Association en parallèle**

Si un grand courant est exigé dans un système, les piles solaires sont reliées en parallèle comme illustré sur la figure ci-dessous.

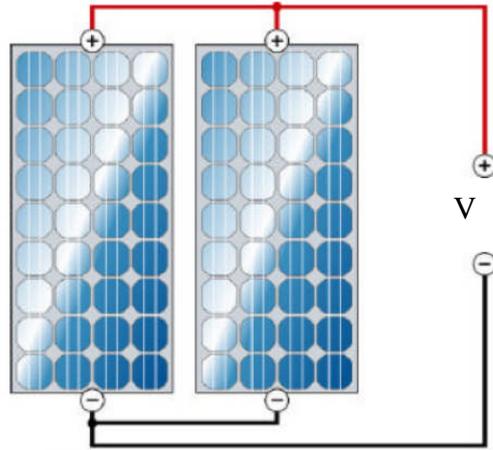


Fig.I.17: Association des modules en parallèle. [17]

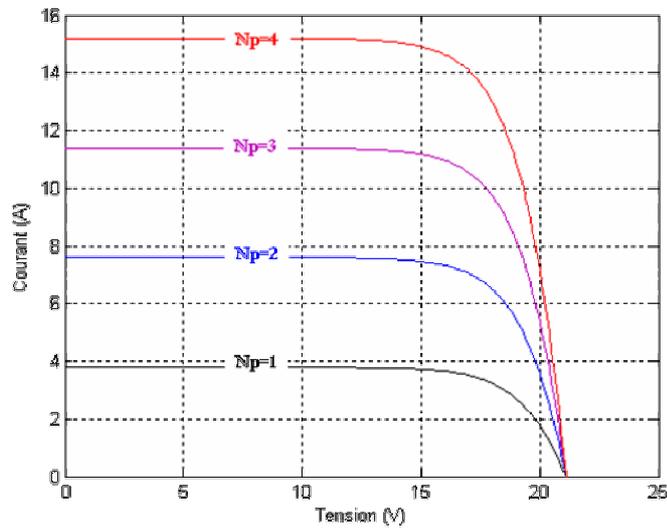


Fig.I.18: Caractéristique I-V en association en parallèle.

**I.8.3- Association mixte (série parallèle)**

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

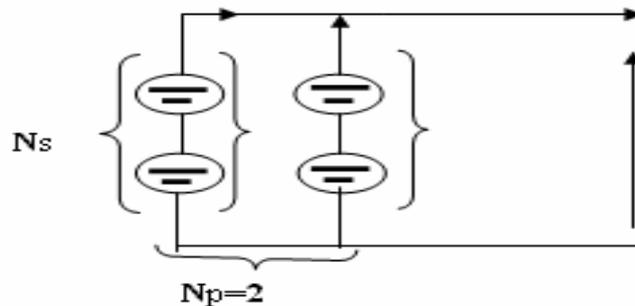
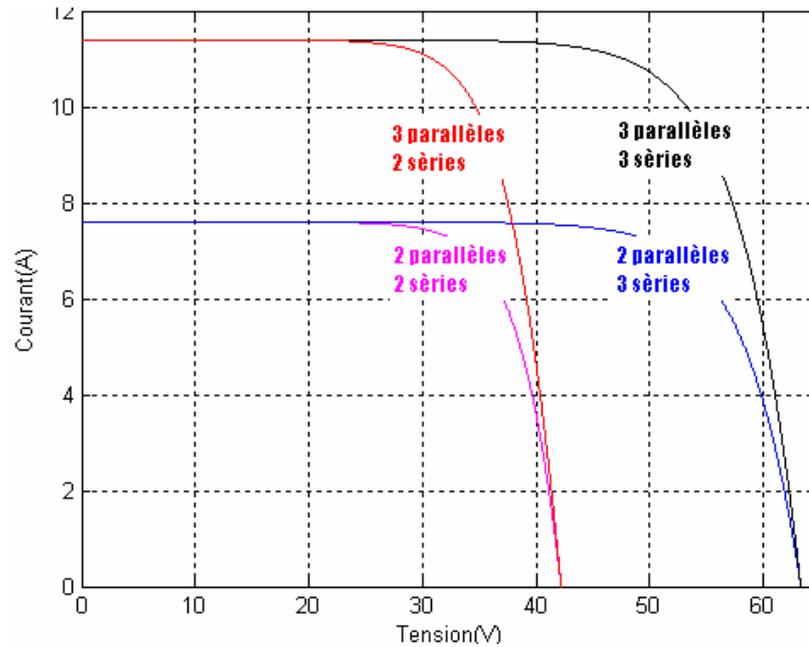


Fig.I.19: Association mixte des modules. [13]



**Fig.I.20: Caractéristiques I-V pour l'association mixte.**

### I.9- Spécification du générateur photovoltaïque

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe I-V est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure I.21 représente trois zones essentielles :

- ❖ *La zone de courant constant* : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- ❖ *La zone de puissance maximale* : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- ❖ *La zone de tension constante* : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

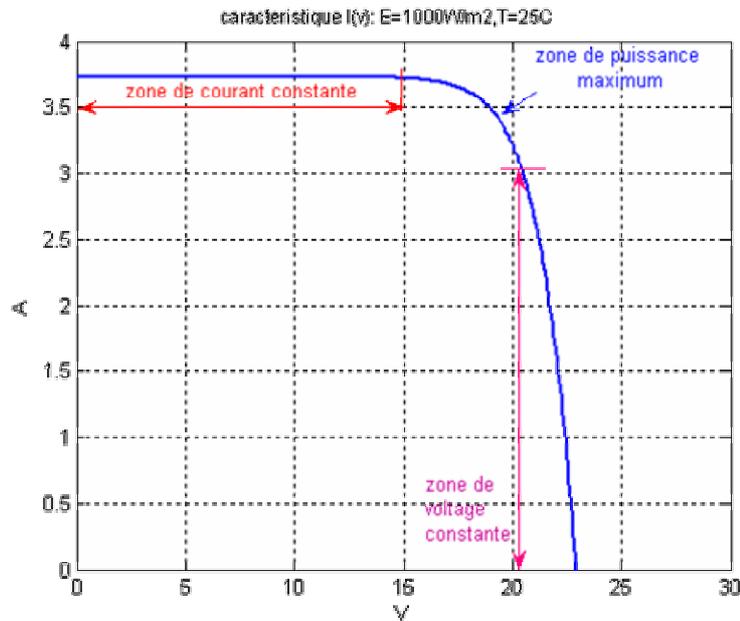


Fig.I.21: les différentes zones de la caractéristique I-V.

### I.10- Facteurs limitant le rendement [1]

En pratique la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisé. Ces pertes sont évoquées ci-après :

- Les pertes énergétiques :

La première limitation correspond aux photons utiles dans la conversion.

Les photons dont l'énergie est inférieure au gap du matériau, ne peuvent générer de paires électron / trou, et ne sont donc pas absorbés par la cellule photovoltaïque : dans le cas du silicium tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à 1250 nm sont perdus. Un modèle plus détaillé du phénomène permet toutefois de considérer les mécanismes d'absorption assistée par phonons. Ceci repousse la limite de l'énergie du gap de silicium de 1.124 eV à 1.052 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon.

Les photons dont l'énergie est supérieure à  $E_g$  sont absorbés par le matériau, mais l'excès d'énergie ( $h\nu - E_g$ ) est dissipé sous forme de chaleur par les phonons du réseau : ce phénomène s'appelle la thermalisation. Sous un éclairage de AM 1.5, cette perte est évaluée à 33 % dans le cas du silicium.

Enfin, les photons les plus énergétiques sont absorbés dans les premiers micromètres sous la surface éclairée de la cellule, c'est-à-dire dans la « zone morte » que constitue l'émetteur, à l'intérieure de laquelle les porteurs photogénérés sont perdus par recombinaison avec les dopants.

Compte tenu de ces pertes énergétiques, en considérant que les pertes optiques sont nulles et que chaque photon d'énergie supérieure à  $E_g$  génère une paire électron/trou, le rendement maximal d'une cellule photovoltaïque en silicium est de l'ordre de 40 %.

- Les pertes optiques :

Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons  $\gamma$  pénétrant.

Le silicium est un matériau d'aspect métallique, très réfléchissant. L'indice de réfraction du silicium étant environ 3,5, le coefficient de réflexion d'une interface air-silicium est de l'ordre de 30 %, ce qui représente les pertes directes des photons par réflexion. D'autre part, il y a une partie des photons qui, bien qu'ayant l'énergie nécessaire, traversent l'épaisseur de la cellule sans être absorbés. Ce terme devient important que la cellule est très fine ( $<100 \mu m$ ) conduisant à des pertes par transmission. Ceci peut être minimisé en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule.

- Recombinaison des porteurs photogénérés :

On distingue deux types de recombinaisons, qui ne dépendent que de la qualité du matériau :

\* *les recombinaisons de surface.*

\* *les recombinaisons en volume (Auger et Shokley-Reed-Hall).*

- Les pertes liées à la cellule et au procédé de fabrication :

En effet, même dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme  $FF$  ne peut dépasser 0.89 [9], puisque les équations courant-tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle :  $exp(qV/kT)$ . Il ne pourra donc pas exister de courbe courant / tension rectangulaire. Ce paramètre dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction p-n et du matériau, de la résistivité des contacts métalliques, etc....

A cette première limitation, peuvent s'ajouter également l'influence de la résistance série et de la résistance parallèle qui vont consommer une partie du courant photogénéré et donc affecter le facteur de forme. La résistance série est due à la résistivité du matériau, à la résistance de contact entre le silicium et les connexions métalliques et à la résistance des lignes de connexion. La résistance parallèle quant à elle représente les courants de fuite dans la cellule, les fuites par les bords de la cellule photovoltaïque, les fuites locales au niveau de la jonction.

### **I.11- Avantages, inconvénients [13]**

Tout système de production d'énergie a ses avantages et ses inconvénients :

**I.11.1- Avantages**

- Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au mégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- Temps de réalisation d'une centrale PV minimum.
- Ils ont une longue durée de vie.
- On élimine les frais et les risque de transport associés des énergies fossiles.

**I.11.2- Inconvénients**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent en alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est continue 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 5 ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement

**I.12- Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet en général, Nous avons donnée une explication sur le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, puis nous avons expliqué la variation de l'énergie de bande gap par rapport à la température et les différents types des cellules solaires et aussi l'influence du rayonnement et de la température, et les caractéristiques des cellules photovoltaïques ( $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $\gamma$ ). Ensuite les différents d'assemblage des générateurs.

Ainsi, nous avons expliqué les caractéristiques principales de cellule photovoltaïques et les différents paramètres qu'influe sur le rendement de ce dernier et leur coût.

## **Chapitre II :**

### ***Modèle photovoltaïque à quatre paramètres***

## II.1- Introduction

Le générateur photovoltaïque est un dispositif non linéaire et est habituellement décrit par ses caractéristiques  $I$ - $V$  et par le circuit équivalent [18]. Comme il a été étudié au chapitre I, il y a plusieurs types des circuits équivalents de la cellule photovoltaïque dans la littérature [15]. Dans ce chapitre nous allons formuler le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une seule exponentielle (modèle à quatre paramètres) comme représenté sur la figure II.1 [19], [20]. Le modèle à quatre paramètres a été mis en application dans beaucoup de programmes, et il prévoit sûrement avec succès l'exécution du modèle à simple cristal et celui des rangées polycristallines de cellules photovoltaïques. Le modèle à quatre paramètres suppose que la pente de la courbe  $I$ - $V$  est plate à la région de court-circuit.

Cependant, cette prétention n'est pas généralement valide pour le photovoltaïque amorphe. La pente du court circuit de la courbe  $I$ - $V$  est finie et négative, ainsi le modèle à quatre paramètres ne peut pas reproduire les caractéristiques  $I$ - $V$  typiques du silicium amorphe. Une modification est nécessaire pour élargir le modèle et inclure les cellules amorphes (modèle à cinq paramètres).

L'effet de la résistance shunt est négligeable, puisque sa valeur est généralement très haute. Nous allons cependant dans les développements ci-dessous considérer une résistance shunt  $R_{sh}$  en parallèle sur la diode, mais en supposant que la valeur de cette résistance est fixée à priori ( $R_{sh}$  égale l'infini).

Nous souhaitons, pouvoir déterminer le modèle en n'utilisant qu'une information limitée sur les modules, à savoir leurs valeurs nominales (les valeurs fournies par les fabricants).

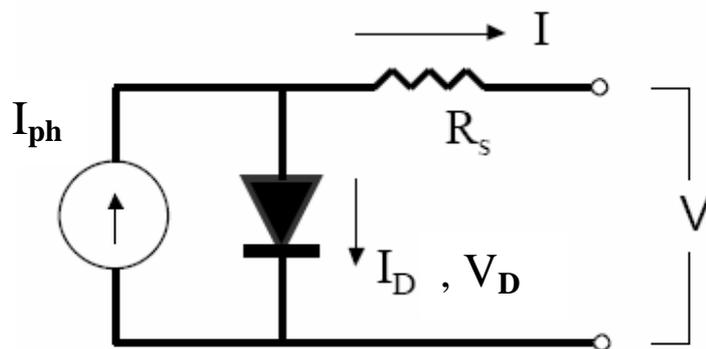


Fig.II.1 : Circuit équivalent du modèle à quatre paramètres. [16]

## II.2- Caractéristique de la cellule photovoltaïque

Sous sa représentation physique, le modèle de la cellule photovoltaïque comporte une zone de charge d'espace complètement vide de porteurs libres (les électrons et les trous) et séparant deux régions semi-conductrices de types  $p$  et  $n$  supposées homogènes. Sa première expression est issue du modèle de diffusion de *Shockley* [5].

La caractéristique de cellules solaires à l'obscurité a été généralement décrite par l'équation de diode pour une jonction  $p-n$  à la température  $T$  :

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

Où ( $I_0$ ) est le courant de saturation,  $q$  la charge électronique,  $k$  la constante de Boltzmann, et  $\gamma$  est une constante empirique. Selon la dérivation théorique de l'équation (II.1) par *Shockley*, basé sur la diffusion de porteurs minoritaires en négligeant l'épaisseur de la couche de déplétion, la quantité  $\gamma$  devrait être égale à l'unité [21].

Dans le modèle, la tension de la diode est reliée à la tension et au courant du module par :

$$V_D = V + R_s I \quad (\text{II.2})$$

La relation courant-tension à une température et un rayonnement solaire fixe, est exprimée dans l'équation (II.3) [22]. Quatre paramètres doivent être connus afin de déterminer le courant et la tension, et ainsi la puissance fournie à la charge. Ceux-ci sont : la source de courant  $I_{ph}$ , le courant inverse de saturation de diode  $I_0$ , la résistance série  $R_s$ , et le facteur d'idéalité  $\gamma$ .

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

## II.3- Les paramètres de référence

Pour évaluer les quatre paramètres dans l'équation (II.3), quatre informations indépendantes sont nécessaires. En général, ces quatre paramètres sont fonction avec le rayonnement solaire incident sur la cellule et la température. Les valeurs de référence de ces paramètres sont déterminées pour une condition de fonctionnement indiquée comme SRC (condition de référence standard). Trois paires courant-tension sont normalement fournies par le fabricant dans la condition de référence: le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert et le courant et la tension au point de puissance maximum. Une quatrième information résulte de la reconnaissance que la dérivation de la puissance au point de puissance maximum est zéro.

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation (II.3) correspondent à l'opération dans les conditions de références sont indiqués :  $\gamma$ ,  $I_0$ ,  $I_{ph}$  et  $R_s$ . Pour déterminer les valeurs de ces paramètres, les trois paires  $I$ - $V$  connues dans les conditions de références sont substituées dans l'équation (II.3) ayant pour résultat les équation (II.4) et (II.6) :

- Pour la tension de circuit ouvert:  $I = 0$ ,  $V = V_{oc}$

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_{oc}}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (II.4)$$

- Au point maximum de puissance:  $I = I_p$ ,  $V = V_p$

$$I_p = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (II.5)$$

- Pour le courant de court circuit:  $I = I_{sc}$ ,  $V = 0$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qR_s I_{sc}}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (II.6)$$

Pour déterminer les quatre paramètres inconnues  $\gamma$ ,  $I_0$ ,  $I_{ph}$  et  $R_s$  de l'équation (II.3). Il faut utiliser les méthodes itératives pour résoudre les équations non linéaires comme par exemple (*Newton-Raphson*, *point fixe*, *Levenberg-Marquardt*, *Bisection*...etc). Nous allons utiliser dans cette étude la méthode de *bisection*.

#### **II.4- Méthode de bisection**

Cette méthode est utilisée dans plusieurs littératures [14], [16] et [23]. Les trois paires  $I$ - $V$  connues dans les conditions de références sont substituées dans l'équation (II.3) ayant pour résultat les équations (II.4), (II.5) et (II.6).

Le courant inverse de saturation  $I_0$ , pour n'importe quelle diode est une quantité très petite, de l'ordre de  $10^{-5}$  ou  $10^{-6}$  ampères [16]. Une autre simplification peut être faite concernant la première limite dans l'équation (II.5) et (II.6). Dans les deux cas, indépendamment de la taille du système, la limite exponentielle est beaucoup plus grande que la première limite. Pour cette raison le premier terme peut être négligé [23]. Alors le système d'équations devient :

$$I_{ph} \cong I_{sc} \quad (II.7)$$

$$0 \approx I_{sc} - I_0 \exp\left(\frac{qV_{oc}}{\gamma kT}\right) \quad (II.8)$$

$$I_p \approx I_{sc} - I_0 \exp\left(\frac{q(V_p + I_p R_s)}{\gamma kT}\right) \quad (II.9)$$

En remplaçant (II.8) dans l'équation (II.9), la solution pour  $\gamma$  donne :

$$\gamma = \frac{q(V_p + I_p R_s - V_{oc})}{kT \ln\left(1 - \left(I_p / I_{sc}\right)\right)} \quad (\text{II.10})$$

#### II.4.1- Évaluation de la résistance série $R_s$ [23]

Pour ce cas, le problème a été réduit à un système avec deux inconnus ( $R_s$  et  $\gamma$ ) et une équation. Une expression additionnelle impliquant l'information fournie par le fabricant est nécessaire pour trouver les deux paramètres restants.

Nous allons utiliser le coefficient de température de tension de circuit ouvert pour fournir une équation additionnelle. L'expression analytique pour  $\mu_{voc}$  est obtenue par réarrangement de l'équation (II.8) :

$$V_{oc} = \frac{\gamma kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right) \quad (\text{II.11})$$

L'expression analytique de  $\mu_{voc}$  est :

$$\mu_{voc} = \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{\gamma k}{q} \left[ \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right) + \frac{T \mu_{Isc}}{I_{sc}} - \left(3 + \frac{q E_g}{\gamma kT}\right) \right] \quad (\text{II.12})$$

Cette valeur analytique est comparée avec la valeur mesurée de  $\mu_{voc}$  et de nouvelles conjectures pour  $R_s$  sont faites jusqu'à ce que la valeur analytique et empirique soit suffisamment proche.

La méthode de *bisection* exige une limite inférieure et une limite supérieure pour la convergence des variables, dans ce cas-ci pour  $R_s$ , la limite inférieure est choisie pour être zéro, les paramètres résultants sont obtenus en utilisant les équations (II.13), (II.14) et (II.15)

$$I_{ph,low} = I_{sc} \quad (\text{II.13})$$

$$\gamma_{low} = \frac{q(V_p - V_{oc})}{kT \ln\left(1 - \left(I_p / I_{sc}\right)\right)} \quad (\text{II.14})$$

$$I_{0,low} = I_{sc} \exp\left(\frac{-qV_{oc}}{\gamma_{low} kT}\right) \quad (\text{II.15})$$

Pour toute valeur particulière de  $R_s$ ,  $\gamma$  peut être déterminée explicitement à partir de (II.10). Puis  $\gamma$  est substitué dans (II.12) pour déterminer le coefficient de la température de tension de circuit ouvert  $\mu_{voc}$ . La limite supérieure pour  $R_s$  est telle que  $A = 1$ .

La plus basse limite de  $\gamma$  est donnée par le nombre de cellules en série  $NCS$ . Puisque  $\gamma$  est le produit du facteur d'accomplissement  $A$  et  $NCS$ , et la limite inférieure de  $A$  égale 1, la limite inférieure de  $A$  correspond au comportement idéal de la cellule. La limite supérieure de  $R_s$  est montrée dans l'équation (II.16) :

$$R_{s,sup} = \frac{1}{I_p} \left[ \frac{kT.NCS}{q} \ln \left( 1 - \frac{I_p}{I_{sc}} \right) + V_{oc} - V_p \right] \quad (II.16)$$

La limite supérieure de  $I_{ph}$  est identique à la limite inférieure,  $I_{ph}$  n'est pas affecté par  $R_s$ ,  $I_0$  est recalculé selon l'équation (II.15). La valeur finale de  $R_s$  est déterminée par l'organigramme suivant.

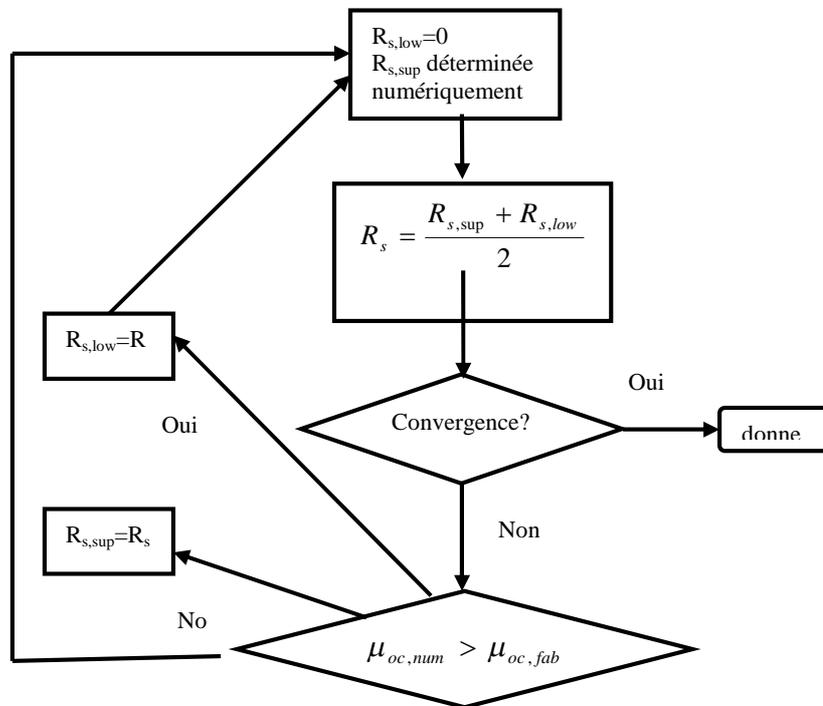


Fig.II.2: Organigramme pour déterminer la valeur finale de  $R_s$ . [16]

En utilisant la valeur nominale dans le tableau (II.1), pour déterminer les valeurs inconnues de référence  $\gamma$ ,  $I_0$ ,  $I_{ph}$  et  $R_s$  (Tableau.II.2), nous avons comparé nos résultats aux résultats obtenus par Ernest. Matagne [24], dans le tableau (II.3).

	$V_{p,ref}$ (V)	$I_{p,ref}$ (A)	$V_{oc,ref}$ (V)	$I_{sc,ref}$ (A)
BP MSX60	0.475	3.5	0.586111	3.8
GTO136-80/2	0.4694445	4.25	0.5972222	4.73
Conergy C 167P	0.4805556	4.83	0.5986111	5.37
SM55 Siemens	0.4833333	3.15	0.6027778	3.45
Shell 36 S	0.4583333	2.181818	0.5944445	2.3
PVL-136	0.5	4.1	0.7	5.1

Tableau.II.1 : Les valeurs nominales données par le fabricant. [24]

	$\gamma$	$R_{s,ref}$ ( $\Omega$ )	$I_{o,ref}$ (A)	$I_{ph,ref}$ (A)
BP MSX60	1.55107362194840	0.00282605315386	1.566206167999e-6	3.80000205039021
GTO136-80/2	2.02445605912421	0.00205422079895	4.900038630863e-5	4.73005905990766
Conergy C 167P	2.12167492859403	<b>-0.00149192921788</b>	9.176178942286e-5	5.37007922272250
SM55 Siemens	1.75705302606878	0.00290363543071	5.509525519358e-6	3.45000687778763
Shell 36 S	0.80917385771386	0.03408813532383	8.88549468406e <sup>-13</sup>	2.30000000003854
PVL-136	4.72406016389323	5.310631497272e-4	0.01609069786238	5.11640206991366

Tableau.II.2 : Les valeurs mesurées des paramètres inconnus  $\gamma$ ,  $I_{o,ref}$ ,  $I_{ph,ref}$  et  $R_{s,ref}$ .

	$\gamma$	$R_{s,ref}$ ( $\Omega$ )	$I_{o,ref}$ (A)	$I_{ph,ref}$ (A)
BP MSX60	1.551213	$2.825961 \cdot 10^{-3}$	$1.566341 \cdot 10^{-6}$	3.8
GTO136-80/2	2.024795	$2.053229 \cdot 10^{-3}$	$4.904687 \cdot 10^{-5}$	4.73
Conergy C 167P	2.122104	<b><math>-1.49351 \cdot 10^{-3}</math></b>	$9.187926 \cdot 10^{-5}$	5.37
SM55 Siemens	1.740601	$3.121143 \cdot 10^{-3}$	$4.846379 \cdot 10^{-6}$	3.45
Shell 36 S	0.8093506	$3.408432 \cdot 10^{-2}$	$8.919679 \cdot 10^{-13}$	2.3
PVL-136	4.839917	<b><math>-2.076509 \cdot 10^{-4}</math></b>	$1.841185 \cdot 10^{-2}$	5.1

Tableau.II.3 : Les valeurs obtenues par le logiciel de E. Matagne. [24]

On observe que les résultats dans les deux tableaux (II.2 et II.3) sont presque identiques sauf pour le modèle *PVL-136*.

Pour quelques conditions atmosphériques ( $T$ ,  $E$ ) la valeur prévue pour la résistance série est avérée négative (modèle *Conergy C 167P*), ce qui n'est pas physiquement possible.

## II.5- Comportement thermique

La température est un paramètre important dans la détermination du fonctionnement des dispositifs à semi-conducteur. Dans le cas de la jonction  $p-n$ , le courant de saturation est essentiellement dû aux porteurs minoritaires générés par agitation thermique. Ce courant de saturation sera donc particulièrement sensible à la température [25].

Alors l'influence principale de la température est sur le coefficient de courant de saturation  $I_0$ . L'expression suivante pour la dépendance de la température de  $I_0$  est une prolongation des expressions fréquemment produites dans la littérature:

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/\gamma'} \exp \left[ \frac{q}{\gamma k} \left( \frac{E_{g,ref}}{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \right) \right] \quad (II.17)$$

$E_g$  est l'énergie de bande d'espace (énergie de gap) du semi-conducteur à une température donnée. L'indice ( $ref$ ) représente les valeurs à la condition standard.

L'équation (II.17) est une prolongation pour deux raisons. Tout d'abord, la plupart des auteurs supposent que  $\gamma'$  et  $\gamma$  sont identiques. Cependant, comme dit ci-dessus, les modèles les plus sophistiqués utilisent plusieurs termes exponentiels de la forme (II.3) (II.17). Dans une partie de ces limites,  $\gamma = \gamma'$ , mais ce n'est pas le cas pour toutes les limites, il y'a d'autres limites [21].

En plus des quatre données utilisées précédemment, il est possible d'obtenir auprès du constructeur les valeurs de :

$$\left. \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \right|_{ref}, \left. \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \right|_{ref} \text{ et parfois } \left. \frac{\partial P_p}{\partial T} \right|_{ref}$$

La dérivation de l'équation (II.17) par rapport de la température donne :

$$\left. \frac{\partial I_0}{\partial T} \right|_{ref} = I_{0,ref} \left[ \frac{3}{\gamma' T_{ref}} + \left( \frac{q}{\gamma k T_{ref}} \right) \left( \frac{E_{g,ref}}{T_{ref}} - \left. \frac{\partial E_g}{\partial T} \right|_{ref} \right) \right] \quad (II.18)$$

Dans la littérature, la plupart des auteurs supposent que  $E_{g,ref} = E_g$  pour simplifier l'expression (II.17). En réalité,  $E_g$  est fonction de la température.

### II.5.1- La variation de la bande d'espace avec la température

La variation de la bande d'espace ( $E_g$ ) avec la température peut être décrite par l'expression suivante [8] :

$$E_g(T) = E_{g0} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (II.19)$$

$\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes ,  $E_{g0}$  est l'énergie de bande gap à température égale à 0 et  $T$  la température absolue.

Où  $T$  et les deux paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont indiqués dans le tableau qui suit [9].

	$E_g(T=0K)$ , eV	$\alpha \cdot 10^{-4}$ , eV/K <sup>2</sup>	$\beta$ , K
Si (a)	1.17	4.730	636
GaAs (a)	1.52	5.405	204
InP (b)	1.42	4.906	327

Tableau .II.4 : les paramètres  $E_{g0}$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  de l'équation.

### II.5.2- La résistance série constante

Sur base des valeurs données par les fabricants  $\partial V_{oc}/\partial T \Big|_{ref}$ ,  $\partial I_{sc}/\partial T \Big|_{ref}$  et  $\frac{\partial P_p}{\partial T} \Big|_{ref}$ , nous pouvons alors déterminer les inconnues suivantes :  $\gamma'$ ,  $\partial I_{ph}/\partial T$  et connaissant la troisième donnée  $\partial R_s/\partial T$ . On suppose initialement que la résistance série  $R_s$  est constante, alors la variation de  $R_s$  en fonction de la température est nulle ( $\partial R_s/\partial T = 0$ ).

La dérivée de l'équation (II.3) en fonction de la température donne l'expression suivant :

$$\frac{\partial I}{\partial T} = \frac{\partial I_{ph}}{\partial T} - \frac{\partial I_0}{\partial T} \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\gamma k T}\right) - 1 \right] + I_0 \frac{q}{\gamma k T} \left( \frac{\partial V}{\partial T} + \frac{\partial R_s}{\partial T} I + R_s \frac{\partial I}{\partial T} - \frac{V + R_s I}{T} \right) \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\gamma k T}\right) \quad (II.20)$$

L'équation (II.20) à la condition de référence est écrite comme suit :

- Au point de court-circuit :

$$\frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \Big|_{ref} = \frac{\partial I_{ph}}{\partial T} \Big|_{ref} - \frac{\partial I_0}{\partial T} \Big|_{ref} \left[ \exp\left(\frac{q R_{s,ref} I_{sc,ref}}{\gamma k T_{ref}}\right) - 1 \right] + I_{0,ref} \frac{q}{\gamma k T_{ref}} \left[ \frac{\partial R_s}{\partial T} \Big|_{ref} I_{sc,ref} + R_{s,ref} \left( \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \Big|_{ref} - \frac{I_{sc}}{T_{ref}} \right) \right] \exp\left(\frac{q R_{s,ref} I_{sc,ref}}{\gamma k T_{ref}}\right) \quad (II.21)$$

- Au point de circuit ouvert :

$$0 = \frac{\partial I_{ph}}{\partial T} \Big|_{ref} - \frac{\partial I_0}{\partial T} \Big|_{ref} \left[ \exp\left(\frac{q V_{oc,ref}}{\gamma k T_{ref}}\right) - 1 \right] +$$

$$I_{0,ref} \frac{q}{\gamma k T_{ref}} \left( \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \Big|_{ref} - \frac{V_{oc,ref}}{T_{ref}} \right) \exp \frac{q V_{oc,ref}}{\gamma k T_{ref}} \quad (II.22)$$

Il est facile de trouver les deux inconnues  $\gamma'$ ,  $\partial I_{ph} / \partial T$  par la substitution de l'équation (II.18) dans les équations (II.21), (II.22). Mises sous forme matricielle, les deux équations peuvent être résolues assez simplement de la manière suivante :  $A \times X = B \Rightarrow X = B / A$

Il a été appliqué encore aux modules BP MSX60, GTO136-80/2, Conergy C 167P, SM55 Siemens, et Shell 36 S. Les valeurs nominales suivantes (Tableau.II.5) pour ces modules sont également indiquées par le fabricant [24] :

	$dV_{oc} / dT_J \Big _{ref}$ (V/ k)	$dI_{sc} / dT_J \Big _{ref}$ (A/ K)	$dP_p / dT \Big _{ref}$ (W/ °C)
BP MSX60	$-2.222222 \cdot 10^{-3}$	$2.47 \cdot 10^{-3}$	-0.0083125
GTO136-80/2	$-2.277778 \cdot 10^{-3}$	$3. \cdot 10^{-3}$	0
Conergy C 167P	$-2.166667 \cdot 10^{-3}$	$2.846 \cdot 10^{-3}$	-0.01125725
SM55 Siemens	$-2.138889 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0
Shell 36 S	$-2.111111 \cdot 10^{-3}$	$1. \cdot 10^{-3}$	-0.0045
PVL-136	$-2.666666 \cdot 10^{-3}$	$5.1 \cdot 10^{-4}$	-0.004333333

**Tableau.II.5 : les coefficients donnés par le fabricant. [24]**

Avec ces valeurs et en utilisant l'algorithme de *E. Matagne* [24], nous obtenons les nouvelles valeurs de  $\gamma'$  et  $\partial I_{ph} / \partial T \Big|_{ref}$  (Tableau.II.6.b),

	$\gamma'$	$\partial I_{ph} / \partial T \Big _{ref}$ (A/ K)
BP MSX60	1.947105	$2.470056 \cdot 10^{-3}$
GTO136-80/2	1.711231	$3.000304 \cdot 10^{-3}$
Conergy C 167P	2.80789	$2.845069 \cdot 10^{-3}$
SM55 Siemens	2.670544	$1.19994 \cdot 10^{-3}$
Shell 36 S	1.974763	$1. \cdot 10^{-3}$
PVL-136	1.218528	$1.024683 \cdot 10^{-4}$

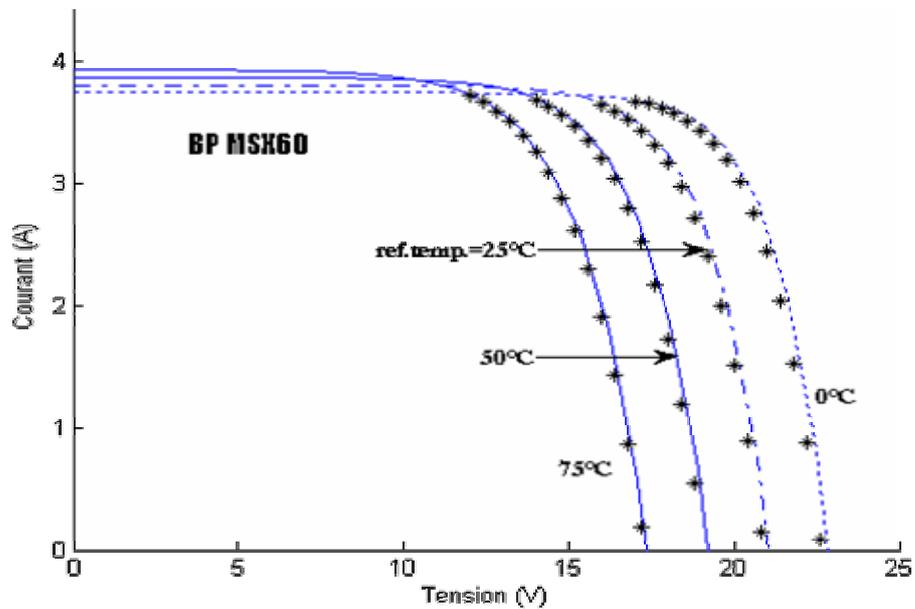
**Tableau.II.6.a : les nouvelles valeurs de  $\gamma'$  et  $\partial I_{ph} / \partial T \Big|_{ref}$  de E. Matagne.**

	$\gamma'$	$\gamma$	$\partial I_{ph}/\partial T \Big _{ref}$ (A/ K)
BP MSX60	1.95656224548442	1.55107362194840	$2.47004969689 \cdot 10^{-3}$
GTO136-80/2	1.71685314567604	2.02445605912421	$3.00080423217 \cdot 10^{-3}$
Conergy C 167P	2.82162096829658	2.12167492859403	$2.84506624379 \cdot 10^{-3}$
SM55 Siemens	2.71391096860388	1.75705302606878	$1.2001219760010^{-3}$
Shell 36 S	1.99203570541631	0.80917385771386	$1.00000000702 \cdot 10^{-3}$
PVL-136	1.18211361897049	4.72406016389323	$5.238824788173857 \cdot 10^{-3}$

**Tableau.II.6.b : les nouvelles valeurs de  $\gamma'$  et  $\partial I_{ph}/\partial T \Big|_{ref}$  de notre simulation.**

Il faut noter qu'il y a une différence significative entre les valeurs de  $\gamma$  et  $\gamma'$  dans tous les modèles étudiés.

En utilisant les valeurs des paramètres obtenus de *BP MSX60* et *Shell 36 S*, nous avons dessiné la caractéristique *I-V* pour quatre températures, à savoir 0°C, 25°C, 50°C et 75°C. Sur la figure II.3, ces caractéristiques sont comparées aux valeurs extraites à partir des valeurs calculées par la méthode de *bisection* (Tableau.II.2).



**Fig.II.3.a : Caractéristiques *I-V* calculées et expérimentales du module BP MSX60.**

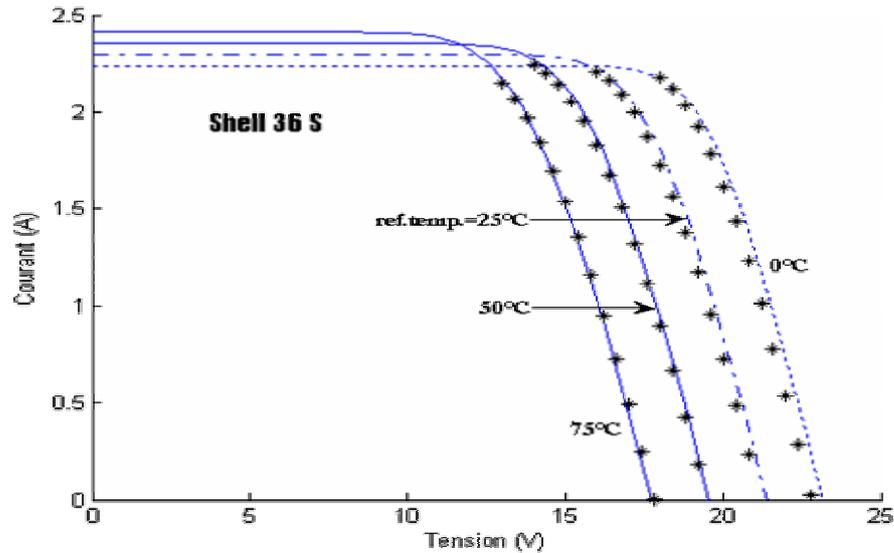


Fig.II.3.b : Caractéristiques I-V calculées et expérimentales du module Shell 36 S.

Il est évident à partir de la figure (II.3), que l'approximation est suffisamment précise pour beaucoup d'applications. On observe quelques divergences dans les courbes, ceci vient de la

valeur arbitraire donnée à  $\left. \frac{\partial R_s}{\partial T} \right|_{ref}$ .

### II.5.3- La résistance série en fonction de la température

Nous essayerons d'obtenir une valeur de  $\left. \frac{\partial R_s}{\partial T} \right|_{ref}$  en utilisant une autre valeur nominale,

autrefois disponible. Cette valeur est la dérivée de la puissance maximale par rapport à la tension au point maximum. L'équation de la puissance est :

$$P_p = V_p I_p \tag{II.23}$$

On peut exploiter le fait que la puissance est maximale au point de puissance maximum  $(V_p, I_p)$ , c'est-à-dire :

$$\left. \frac{\partial P}{\partial V} \right|_{V=V_p} = 0. \tag{II.24}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d}{dV}(VI) = 0 \tag{II.25}$$

qui donne :

$$I + V \frac{dI}{dV} = 0 \tag{II.26}$$

Donc :

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_p} = -\frac{I_p}{V_p} \quad (\text{II.27})$$

La dérivation de l'équation (II.3) par rapport la tension V,

$$\frac{dI}{dV} = -\left[ \frac{I_0 q}{\gamma k T} \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\gamma k T}\right) \right] \left( 1 + R_s \frac{dI}{dV} \right) \quad (\text{II.28})$$

En introduisant (II-27) dans (II-28), on a,

$$-\frac{I_p}{V_p} = -\left[ \frac{I_0 q}{\gamma k T} \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T}\right) \right] \left( 1 - R_s \frac{I_p}{V_p} \right) \quad (\text{II.29})$$

Finalement on obtient l'équation suivante

$$I_p = \left[ \frac{I_0 q}{\gamma k T} \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T}\right) \right] (V_p - R_s I_p) \quad (\text{II.30})$$

Nous supposons que  $\gamma$  ne dépend pas de la température. En dérivant par rapport à la température les équations (II.1), (II.23) et (II.24), on obtient respectivement :

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dT} = \frac{dI_{ph}}{dT} - \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\gamma k T}\right) - 1 \right] \frac{dI_0}{dT} - \left[ \frac{I_0 q}{\gamma k T} \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\gamma k T}\right) \right] \frac{dV}{dT} - \\ \left[ \frac{I_0 q}{\gamma k T} \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\gamma k T}\right) \right] I \frac{dR_s}{dT} - \left[ \frac{I_0 q}{\gamma k T} \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\gamma k T}\right) \right] R_s \frac{dI}{dT} + \\ \frac{I_0 q}{\gamma k T} \left( \frac{V + R_s I}{T} \right) \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\gamma k T}\right) \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_p}{dT} = \frac{q(V_p - R_s I_p)}{\gamma k T} \left[ \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T}\right) \right] \frac{dI_0}{dT} + \\ \left\{ \frac{I_0 q}{\gamma k T} \left[ \frac{q(V_p - R_s I_p)}{\gamma k T} - 1 \right] \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T}\right) \right\} I_p \frac{dR_s}{dT} + \\ \left\{ \frac{I_0 q}{\gamma k T} \left[ \frac{q(V_p - R_s I_p)}{\gamma k T} + 1 \right] \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T}\right) \right\} \frac{dV_p}{dT} + \\ \left\{ \frac{I_0 q}{\gamma k T} \left[ \frac{q(V_p - R_s I_p)}{\gamma k T} - 1 \right] \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T}\right) \right\} R_s \frac{dI_p}{dT} - \end{aligned}$$

$$\frac{I_0 q}{\gamma k T} \left[ \frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T} \right] \left[ \exp \left( \frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T} \right) \right] \cdot \frac{V_p - R_s I_p}{T} \quad (\text{II.32})$$

$$\frac{dP_p}{dT} = I_p \frac{dV_p}{dT} + V_p \frac{dI_p}{dT} \quad (\text{II.33})$$

En particulierisant l'équation (II.24) aux trois points connus de la caractéristique en condition standard et (II.25), (II.26) au point à puissance nominale, on obtient après classement et regroupement des termes :

$$\begin{aligned} \left. \frac{dI_{ph}}{dT} \right|_{ref} + \left[ 1 - \exp \frac{qV_{oc,ref}}{\gamma k T_{ref}} \right] \left. \frac{dI_0}{dT} \right|_{ref} \\ = \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \exp \frac{qV_{oc,ref}}{\gamma k T_{ref}} \left( \left. \frac{dV_{oc}}{dT} \right|_{ref} - \frac{V_{oc,ref}}{T_{ref}} \right) \end{aligned} \quad (\text{II.34})$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{dI_{ph}}{dT} \right|_{ref} + \left[ 1 - \exp \left( \frac{qR_s I_{sc,ref}}{\gamma k T_{ref}} \right) \right] \left. \frac{dI_0}{dT} \right|_{ref} - \left[ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \exp \left( \frac{qR_{s,ref} I_{sc,ref}}{\gamma k T_{ref}} \right) \right] I_{sc,ref} \left. \frac{dR_s}{dT} \right|_{ref} \\ = \left. \frac{dI_{sc}}{dT} \right|_{ref} + \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left( \exp \frac{qR_s I_{sc,ref}}{\gamma k T_{ref}} \right) R_{s,ref} \left[ \left. \frac{dI_{sc}}{dT} \right|_{ref} - \frac{I_{sc,ref}}{T_{ref}} \right] \end{aligned} \quad (\text{II.35})$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{dI_{ph}}{dT} \right|_{ref} + \left[ 1 - \exp \left( \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \right) \right] \left. \frac{dI_{0,ref}}{dT} \right|_{ref} - \\ \left[ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \exp \left( \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \right) \right] I_{p,ref} \left. \frac{dR_s}{dT} \right|_{ref} - \\ \left[ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \exp \left( \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \right) \right] \left. \frac{dV_p}{dT} \right|_{ref} - \\ \left\{ \left[ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \exp \left( \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \right) \right] R_{s,ref} + 1 \right\} \left. \frac{dI_p}{dT} \right|_{ref} \\ = - \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left[ \exp \left( \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \right) \right] \left( \frac{V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref}}{T_{ref}} \right) \quad (\text{II.36}) \\ \frac{q(V_{p,ref} - R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \left( \exp \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \right) \left. \frac{dI_0}{dT} \right|_{ref} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left[ \frac{q(V_{p,ref} - R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} - 1 \right] \exp \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \right\} I_{p,ref} \frac{dR_s}{dT} \Big|_{ref} + \\
 & \left\{ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left[ \frac{q(V_{p,ref} - R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} + 1 \right] \exp \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \right\} \frac{dV_p}{dT} \Big|_{ref} + \\
 & \left\{ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left( \frac{q(V_{p,ref} - R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} - 1 \right) \exp \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \right\} R_{s,ref} - 1 \left\} \frac{dI_p}{dT} \Big|_{ref} \right. \\
 & = \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left[ \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} + 1 \right] \times \\
 & \quad \left( \exp \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \right) \cdot \frac{(V_{p,ref} - R_{s,ref} I_{p,ref})}{T_{ref}}
 \end{aligned} \tag{II.37}$$

$$I_{p,ref} \frac{dV_p}{dT} \Big|_{ref} + V_{p,ref} \frac{dI_p}{dT} \Big|_{ref} = \frac{dP_p}{dT} \Big|_{ref} \tag{II.38}$$

### II.5.3.1- Résolution matricielle

Les équations (II.34), (II.35), (II.36), (II.37) et (II.38) constituent un système de cinq équations linéaires à cinq inconnues. On peut les écrire sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 \\ 1 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{dI_{ph}}{dT} \Big|_{ref} \\ \frac{dI_0}{dT} \Big|_{ref} \\ \frac{dR_s}{dT} \Big|_{ref} \\ \frac{dV_p}{dT} \Big|_{ref} \\ \frac{dI_p}{dT} \Big|_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \\ X4 \\ X5 \end{bmatrix} \tag{II.39}$$

Où :

$$a_{12} = \left[ 1 - \exp \frac{qV_{oc,ref}}{\gamma k T_{ref}} \right] \tag{II.40}$$

$$a_{22} = \left[ 1 - \exp\left(\frac{qR_s I_{sc,ref}}{\gamma k T_{ref}}\right) \right] \quad (\text{II.41})$$

$$a_{23} = - \left[ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \exp\left(\frac{qR_{s,ref} I_{sc,ref}}{\gamma k T_{ref}}\right) \right] \cdot I_{sc,ref} \quad (\text{II.42})$$

$$a_{32} = \left[ 1 - \exp\left(\frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}}\right) \right] \quad (\text{II.43})$$

$$a_{33} = - \left[ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \exp\left(\frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}}\right) \right] \quad (\text{II.44})$$

$$a_{34} = - \left[ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \exp\left(\frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}}\right) \right] \quad (\text{II.45})$$

$$a_{35} = - \left\{ \left[ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \exp\left(\frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}}\right) \right] R_{s,ref} + 1 \right\} \quad (\text{II.46})$$

$$a_{42} = \frac{q(V_{p,ref} - R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} \left( \exp\left(\frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}}\right) \right) \quad (\text{II.47})$$

$$a_{43} = \left\{ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left[ \frac{q(V_{p,ref} - R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} - 1 \right] \exp\left(\frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}}\right) \right\} \cdot I_{p,ref} \quad (\text{II.48})$$

$$a_{44} = \left\{ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left[ \frac{q(V_{p,ref} - R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} + 1 \right] \exp\left(\frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}}\right) \right\} \quad (\text{II.49})$$

$$a_{45} = \left\{ \left[ \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left( \frac{q(V_{p,ref} - R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} - 1 \right) \exp\left(\frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}}\right) \right] R_{s,ref} - 1 \right\} \quad (\text{II.50})$$

$$a_{54} = I_{p,ref} \quad (\text{II.51})$$

$$a_{55} = V_{p,ref} \quad (\text{II.52})$$

$$X1 = \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \exp\left(\frac{qV_{oc,ref}}{\gamma k T_{ref}}\right) \left( \frac{dV_{oc}}{dT} \Big|_{ref} - \frac{V_{oc,ref}}{T_{ref}} \right) \quad (\text{II.53})$$

$$X2 = \frac{dI_{sc}}{dT} \Big|_{ref} + \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left( \exp\left(\frac{qR_{s,ref} I_{sc,ref}}{\gamma k T_{ref}}\right) R_{s,ref} \left[ \frac{dI_{sc}}{dT} \Big|_{ref} - \frac{I_{sc,ref}}{T_{ref}} \right] \right) \quad (\text{II.54})$$

$$X3 = -\frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left[ \exp\left(\frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}}\right) \right] \left( \frac{V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref}}{T_{ref}} \right) \quad (II.55)$$

$$X4 = \frac{I_{0,ref} q}{\gamma k T_{ref}} \left[ \frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}} + 1 \right] \left( \exp\left(\frac{q(V_{p,ref} + R_{s,ref} I_{p,ref})}{\gamma k T_{ref}}\right) \right) \frac{(V_{p,ref} - R_{s,ref} I_{p,ref})}{T_{ref}} \quad (II.56)$$

$$X5 = \left. \frac{dP_p}{dT} \right|_{ref} \quad (II.57)$$

La solution de ce système matriciel est très facile. Les valeurs données par le fabricant sont représentées dans le tableau (II.6) et les résultats de simulation sont donnés dans le tableau (II.7.a).

Le tableau (II.7.b) contient les résultats obtenus par *E. Matagne* [24].

	$dI_{ph}/dT _{ref}$	$dI_0/dT _{ref}$	$dR_s/dT _{ref}$
BP MSX60	$2.47005614420 \cdot 10^{-3}$	$1.655899373042642e-007$	$3.298890435247297e-005$
GTO136-80/2	$2.99779934180 \cdot 10^{-3}$	$4.063343385626150e-006$	<b><math>-5.610159460819e-4</math></b>
Conergy C 167P	$2.84506629808 \cdot 10^{-3}$	$7.074684505945664e-006$	$6.076108513397419e-007$
SM55 Siemens	$1.19973092360 \cdot 10^{-3}$	$5.096138729714359e-007$	<b><math>-7.441605336621728e-004</math></b>
Shell 36 S	$1.00000001887 \cdot 10^{-3}$	$1.758041035881864e-013$	$-4.071991542002780e-005$

**Tableau.II.7.a : les nouvelles valeurs de:  $dI_{ph}/dT|_{ref}$ ,  $dI_0/dT|_{ref}$  et  $dR_s/dT|_{ref}$ .**

	$dI_{ph}/dT _{ref}$	$dI_0/dT _{ref}$	$dR_s/dT _{ref}$
BP MSX60	$2.470056 \cdot 10^{-3}$	$1.655644 \cdot 10^{-7}$	$3.303723 \cdot 10^{-5}$
GTO136-80/2	$3.000804 \cdot 10^{-3}$	$4.065972 \cdot 10^{-6}$	0
Conergy C 167P	$2.845069 \cdot 10^{-3}$	$7.08127 \cdot 10^{-6}$	$6.044503 \cdot 10^{-7}$
SM55 Siemens	$1.19994 \cdot 10^{-3}$	$4.524715 \cdot 10^{-7}$	0
Shell 36 S	$1 \cdot 10^{-3}$	$1.76413 \cdot 10^{-13}$	$-4.067454 \cdot 10^{-5}$

**Tableau.II.7.b : les nouvelles valeurs de:  $dI_{ph}/dT|_{ref}$ ,  $dI_0/dT|_{ref}$  et  $dR_s/dT|_{ref}$  par E.**

**Matagne.**

### II.5.3.2- Extrapolation à des températures éloignées de la température de référence

Compte tenu de la faible valeur de  $\left. \frac{dI_{ph}}{dT} \right|_{ref}$ , une extrapolation linéaire suffit pour obtenir la

valeur de  $I_{ph}$  à une température quelconque :

$$I_{ph} = I_{ph,ref} + \left. \frac{dI_{ph}}{dT} \right|_{ref} (T - T_{ref}) \quad (II.58)$$

Par contre, lorsque la température de jonction s'éloigne de sa valeur de référence, une extrapolation linéaire ne suffit plus pour les paramètres  $I_0$  et  $R_s$ . Nous supposons donc pour ces paramètres une dépendance vis-à-vis de la température dont la forme est donnée ci-dessous :

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/\gamma''} \exp \left[ \frac{e}{\gamma k} \left( \frac{E_{g,ref}}{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \right) \right] \quad (II.59)$$

et

$$R_s = R_{s,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^\beta \quad (II.60)$$

Où  $\gamma''$  et  $\beta$  sont de nouveaux paramètres. On peut facilement exprimer ces paramètres en

fonction de :  $\left. \frac{dI_0}{dT} \right|_{ref}$  et  $\left. \frac{dR_s}{dT} \right|_{ref}$ .

On obtient en effet, en dérivant (II.59) et (II.60)

$$\left. \frac{dI_0}{dT} \right|_{ref} = I_{0,ref} \left[ \frac{3}{\gamma'' T_{ref}} + \frac{e}{\gamma k T_{ref}} \left( \frac{E_{g,ref}}{T_{ref}} - \left. \frac{dE_g}{dT} \right|_{ref} \right) \right] \quad (II.61)$$

$$\left. \frac{dR_s}{dT} \right|_{ref} = R_{s,ref} \frac{\beta}{T_{ref}} \quad (II.62)$$

D'où l'on extrait aisément les valeurs de  $\gamma''$  et  $\beta$ . Les valeurs obtenues sont :

	$\gamma''$	$\beta$
BP MSX60	1.947105	3.485558
GTO136-80/2	1.711231	0
Conergy C 167P	2.80789	-0.1206666
SM55 Siemens	2.670544	0
Shell 36 S	1.974763	-0.3557975

**Tableau.II.8.a : Les valeurs données de  $\gamma''$  et  $\beta$  à partir de [24].**

	$\gamma''$	$\beta$
BP MSX60	1.95656160030748	3.47859469083572
GTO136-80/2	1.71703960869784	-81.38499620773990
Conergy C 167P	2.82162027020352	-0.12136502960679
SM55 Siemens	2.71399388771354	-76.37316885098848
Shell 36 S	1.99203570339071	-0.35597531750836

Tableau.II.8.b : Les valeurs simulées de  $\gamma''$  et  $\beta$ .

Dans la figure II.4, nous avons comparé les courbes calculées par la méthode de *bisection* et la nouvelle valeur de  $\gamma''$  dans le tableau (II.8.b). Les étoiles rouges représentent le cas de la nouvelle valeur de  $\gamma''$  (Tableau.II.8.b). On observe sur la figure II.4.a qui représente le modèle *BP MSX60* que les deux courbes sont très identiques sauf pour le cas où la température est égale 0 °C, il y a une petite différence mais non remarquable.

Par contre pour le modèle *Shell 36 S*, figure II.4.b, la différence entre les deux courbes est remarquable à T=0°C et T=25°C

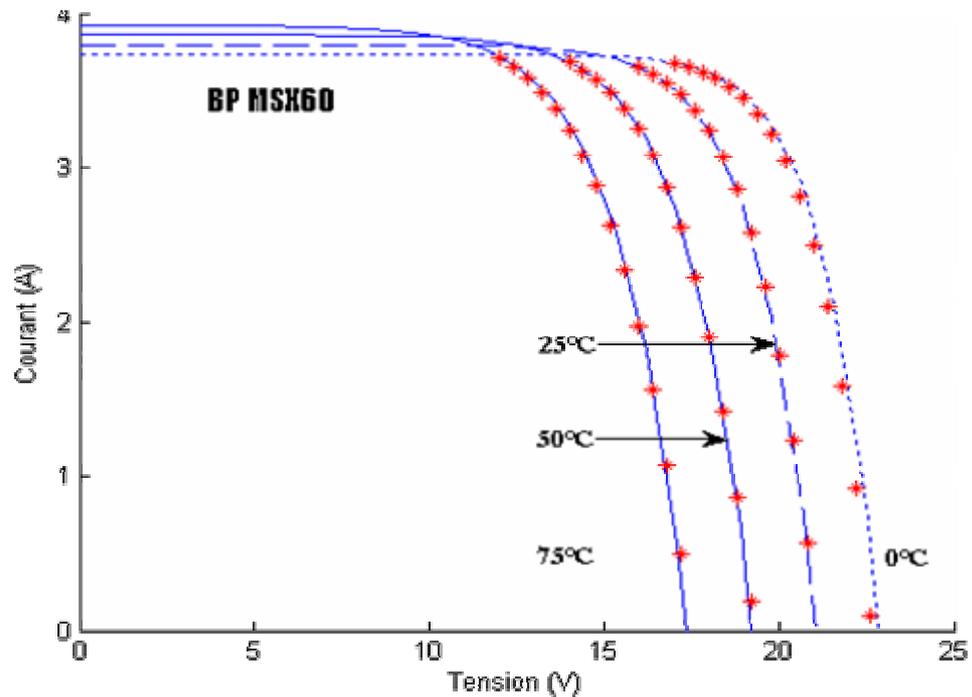


Fig.II.4.a: Courbes simulées et calculées à partir de la nouvelle valeur de  $\gamma''$ .

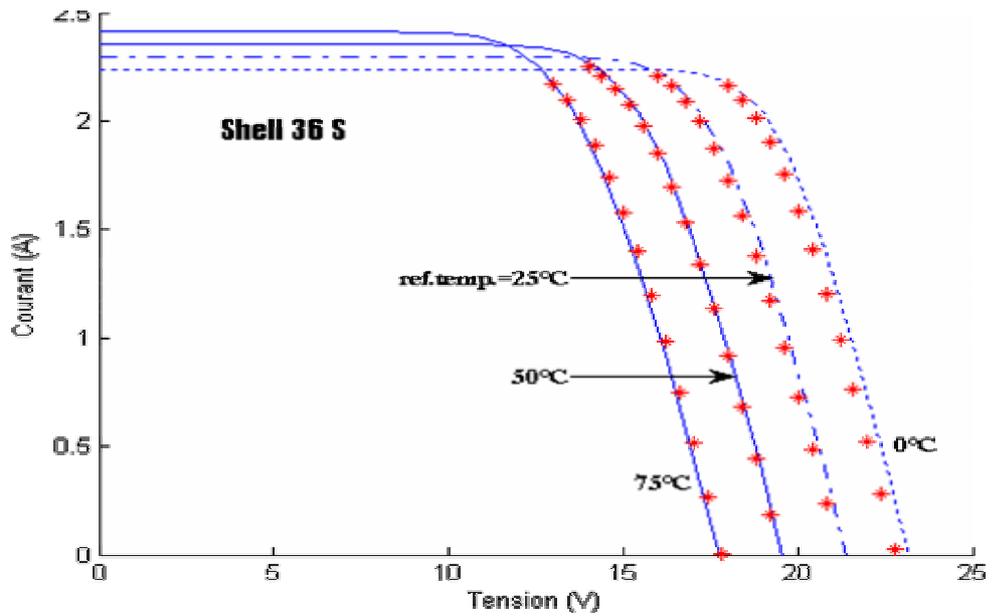


Fig.II.4.b : Courbes simulées et calculées à partir de la nouvelle valeur de  $\gamma''$ .

A partir du résultat obtenu au paragraphe (II.5.2), (II.5.3) et pour mieux comprendre la différence entre elles, nous avons représenté les figures II.5.a et II.5.b pour les deux modèles *BP MSX60* et *Shell 36 S*. Les étoiles noires représentent le résultat calculé au paragraphe (II.5.2) et les rouges représentent le résultat calculé au paragraphe (II.5.3) et les courbes en bleu sont obtenues à partir de la valeur simulée par la méthode de *bisection*.

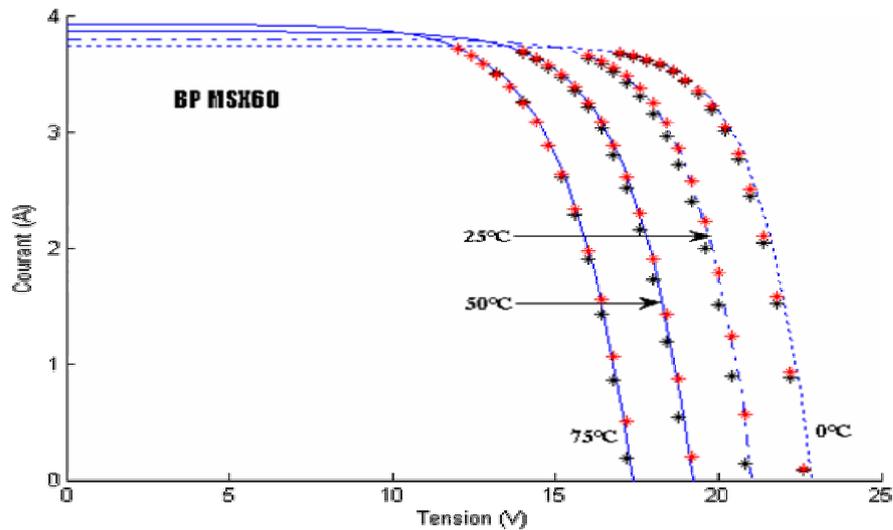


Fig.II.5.a : Comparaison entre les résultats de simulation pour  $\gamma$ ,  $\gamma'$  et  $\gamma''$ .

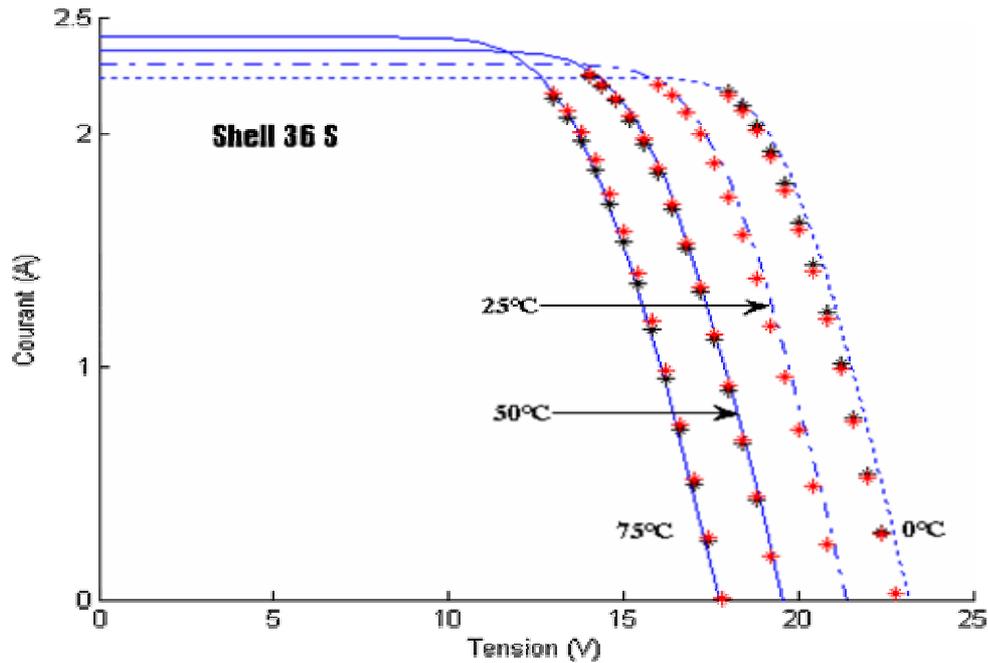


Fig.II.5.b : Comparaison entre les résultats de simulation pour  $\gamma$ ,  $\gamma'$  et  $\gamma''$ .

On observe dans les figures II.5.a et II.5.b une petite différence entre les trois courbes (bleu, rouge et noir). Cette déviation représente la correction des paramètres pour retrouver les courbes qui correspondent aux courbes expérimentales.

### II.6- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons voulu montrer comment déterminer les paramètres inconnus ( $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $\gamma$ ) du modèle à quatre paramètres en utilisant seulement les données du fabricant sur les modules. Après la détermination des paramètres, nous utilisons le comportement thermique. La variation thermique de la caractéristique  $I$ - $V$  de la cellule dépend de trois paramètres ce que

nous n'avons pas encore déterminé, à savoir :  $\left. \frac{\partial I_{ph}}{\partial T} \right|_{ref}$ ,  $\left. \frac{\partial I_0}{\partial T} \right|_{ref}$  et  $\left. \frac{\partial R_s}{\partial T} \right|_{ref}$ .

Pareillement et à températures éloignées de la température de référence, nous avons montré comment déterminer les nouveaux paramètres pour tracer la nouvelle courbe obtenue par l'utilisation de  $\gamma'$  et  $\gamma''$ .

En tentant d'appliquer la méthode de *bisection* à un autre module, à savoir le *Cenergy C 167P*, nous avons obtenu une résistance série négative qui est physiquement inacceptable. Une possibilité serait peut-être de considérer un modèle à cinq paramètres.

**Chapitre III :**

***Modèle photovoltaïque à cinq paramètres***

### III.1- Introduction

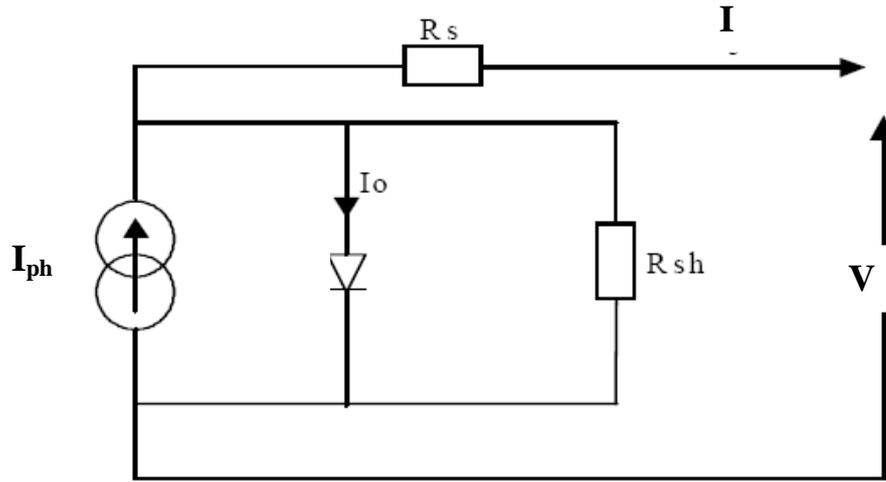
Dans ce chapitre nous allons étudier deux modèles différents; le modèle à une diode et le modèle à deux diodes avec cinq paramètres inconnues. Comme nous avons vu dans le deuxième chapitre le modèle à une diode avec la résistance shunt infini (une exponentielle) donne dans certains cas des résultats inacceptables (la valeur de la résistance série est négative pour des modèles comme *Conergy C 167P*). Donc, nous avons supposé que la résistance shunt est finie, mais la valeur du facteur d'idéalité  $\gamma$  varie entre 0.1 et 10 pour chaque itération.

L'approche adoptée concerne à priori en la résolution d'un système d'équations constituant les trois points de fonctionnement (court circuit, circuit ouvert et point de puissance maximale) pour écrire tous les paramètres du modèle en fonction de la résistance série. Dans une seconde étape, nous faisons une résolution itérative en utilisant la méthode de *Newton-Raphson* pour calculer la valeur de la résistance série ainsi que les paramètres du modèle pour toute les valeurs de  $\gamma$  [27].

Dans le deuxième modèle de deux diodes (deux exponentielles), nous montrerons comment obtenir un modèle de cellule solaire comportant deux exponentielles, parce que les paramètres pourraient relativement être calculés depuis l'information de la fiche technique [22], en utilisant seulement ces données: tension à vide, courant de court circuit, tension et courant correspondants au point à puissance nominale ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_p$  et  $V_p$ ). La solution obtenue comporte encore un degré de liberté arbitraire qui pourra être utilisé pour mieux rendre compte de l'influence de la température.

### III.2- Les paramètres de référence

Le comportement des cellules photovoltaïques peut être modélisé avec un circuit équivalent [22] [28] et [26]. Ce circuit peut être utilisé pour une cellule individuelle, pour un module se composant de plusieurs cellules, ou pour une panneau se composant de plusieurs modules. Comme il est montré dans la figure III.1, le modèle à une seule exponentielle avec une résistance parallèle  $R_{sh}$ , l'équation (III.1) est non linéaire et implicite; donc, une solution sera déterminée par des méthodes itératives (*Newton-Raphson*, *Levenberg-Marquardt*,...etc). Dans notre travail, la méthode de *Newton-Raphson* est utilisée numériquement pour calculer les paramètres inconnus ( $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ) pour telle valeur de  $\gamma$ .



**Fig.III.1 : Circuit équivalent avec  $R_{sh}$ .** [29]

La relation courant-tension aux conditions standards ( $T=25\text{ °C}$ ,  $E=1000\text{ W/m}^2$ ) pour le circuit équivalent, figure III.1 est exprimée dans l'équation (III.1).

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q}{\gamma k T} (V + IR_s)\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{III.1})$$

En général, ces cinq paramètres dépendent du rayonnement solaire incident sur la cellule et de la température de cellules. Les valeurs de référence de ces paramètres sont déterminées pour une condition de fonctionnement indiquée comme SRC (condition de référence standard). Trois paires paramètres de la caractéristique courant-tension sont normalement fournies par le fabricant: le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert et le courant et la tension au point de puissance maximum. Une quatrième information résulte de la supposition que la dérivation de la puissance au point de puissance maximum est nulle. Bien que tous les deux paramètres : le coefficient de température de la tension de circuit ouvert  $\mu_{Voc}$  et le coefficient de température du courant de court circuit  $\mu_{Isc}$  sont connus, seulement  $\mu_{Voc}$  est employé pour trouver les cinq paramètres de référence.  $\mu_{Isc}$  est utilisé quand la cellule fonctionne aux conditions autre que les conditions de référence.

Les cinq paramètres apparaissant dans l'équation (III.1) correspondent aux conditions standards sont :  $\gamma$ ,  $I_0$ ,  $I_{ph}$ ,  $R_s$ , et  $R_{sh}$ . Pour déterminer les valeurs de ces paramètres, les trois paires  $I-V$  sont substituées dans l'équation (III.1) pour aboutir aux équations (III.2)-(III.3).

Pour le courant de court circuit:  $I = I_{sc}$ ,  $V = 0$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{q R_s I_{sc}}{\gamma k T}\right) - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (\text{III.2})$$

Pour la tension de circuit ouvert:  $I = 0$ ,  $V = V_{oc}$

$$0 = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{qV_{oc}}{\gamma kT} \right) - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (III.3)$$

Au point de puissance maximum:  $I = I_p$ ,  $V = V_p$

$$I_p = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma kT} \right) - 1 \right) - \frac{(V_p + R_s I_p)}{R_{sh}} \quad (III.4)$$

Sous forme matricielle, l'équation ci-dessus peut être écrite selon [27]:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_{sc} \\ I_p \end{bmatrix} = [M] \times \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_0 \\ 1/R_{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -C & -V_{oc} \\ 1 & -B & -R_s I_{sc} \\ 1 & -A & -V_p - R_s I_p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_0 \\ 1/R_{sh} \end{bmatrix} \quad (III.5)$$

Où :

$$A = \exp \left( \frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma kT} \right) - 1 \quad (III.6)$$

$$B = \exp \left( \frac{qR_s I_{sc}}{\gamma kT} \right) - 1 \quad (III.7)$$

$$C = \exp \left( \frac{qV_{oc}}{\gamma kT} \right) - 1 \quad (III.8)$$

La matrice (M) est une fonction de  $R_s$ ,  $\gamma$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_p$  et  $I_p$ . L'étape prochaine est de déterminer les paramètres  $I_{ph}$ ,  $I_0$  et  $R_{sh}$  en fonction de  $R_s$ , ce qui suit:

$$I_{ph} = \frac{\begin{bmatrix} 0 & -C & -V_{oc} \\ I_{sc} & -B & -R_s I_{sc} \\ I_p & -A & -V_p - R_s I_p \end{bmatrix}}{\det_M} = \det^{-1} \cdot (V_{oc} I_{sc} A - V_{oc} I_p B - V_p I_{sc} C) \quad (III.9)$$

$$I_{sc} = \frac{\begin{bmatrix} 1 & 0 & -V_{oc} \\ 1 & I_{sc} & -R_s I_{sc} \\ 1 & I_p & -V_p - R_s I_p \end{bmatrix}}{\det_M} = \det^{-1} \cdot (V_{oc} I_{sc} - V_{oc} I_p - V_p I_{sc}) \quad (III.10)$$

$$R_{sh}^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} 1 & -C & 0 \\ 1 & -B & I_{sc} \\ 1 & -A & I_p \end{bmatrix}}{\det_M} = \det^{-1} \cdot (I_{sc} A - I_p B - (I_{sc} - I_p) C) \quad (III.11)$$

Avec (det) est le déterminant de la matrice M :

$$\det = (V_{oc} - R_s I_{sc}) A + (-V_{oc} + V_p + R_s I_p) B + (-V_p + R_s (I_{sc} - I_p)) C \quad (III.12)$$

La dérivée de la puissance au point de puissance maximum est nulle [28]

$$\left. \frac{d(IV)}{dV} \right|_p = I_p - V_p \left. \frac{dI}{dV} \right|_p = 0 \quad (III.13)$$

Avec  $\left. \frac{dI}{dV} \right|_p$  donné par la relation suivante :

$$\frac{dI}{dV_p} = \frac{-qI_0 \exp\left(\frac{q(V_p + I_p R_s)}{NCS \cdot \gamma kT}\right) - \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{qI_0 R_s}{NCS \cdot \gamma kT} \exp\left(\frac{q(V_p + I_p R_s)}{NCS \cdot \gamma kT}\right) + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (III.14)$$

La dérivée de l'équation (III.1) par rapport à la tension peut être exprimée par :

$$\frac{dI}{dV} = -1 / \left[ R_s + \left( \frac{qI_0}{NCS \cdot \gamma kT} \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{NCS \cdot \gamma kT}\right) + \frac{1}{R_{sh}} \right)^{-1} \right] \quad (III.15)$$

Nous introduisons l'équation (III.13) dans l'équation (III.15), puis nous définissons une fonction  $f_{R_s}$  donnée par :

$$f_{R_s} = I_p - (V_p - R_s I_p) \left( \frac{qI_0}{NCS \cdot \gamma kT} \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{NCS \cdot \gamma kT}\right) + \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad (III.16)$$

Comme  $I_0$  et  $R_{sh}$  dépendent de  $R_s$ , la fonction  $f_{R_s}$  l'est également. La résolution de l'équation  $f_{R_s} = 0$  avec l'algorithme de *Newton-Raphson* implique le calcul de sa dérivée; soit :

$$\begin{aligned} \frac{df_{R_s}}{dR_s} = & -\frac{V_T I_p I_{sc} (V_p - R_s I_p) (A - B)}{\det} + \frac{1}{R_{sh}} \left[ I_M + \left( \frac{V_p - R_s I_p}{\det} \right) \left( \frac{d \det}{dR_s} \right) \right] + \\ & V_T I_0 \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{N_s \gamma kT}\right) \left[ I_M \left( 1 - \frac{q(V_p - R_s I_p)}{N_s \gamma kT} \right) + \left( \frac{V_p - R_s I_p}{\det} \right) \left( \frac{d \det}{dR_s} \right) \right] \end{aligned} \quad (III.17)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \frac{d \det}{dR_s} = & [V_T I_p (V_{oc} - R_s I_{sc}) - I_{sc}] A + [V_T I_{sc} (-V_{oc} + V_p + R_s I_p) + I_p] B + \\ & [I_{sc} - I_p] C + V_T [V_p I_{sc} - V_{oc} (I_{sc} - I_p)] \end{aligned} \quad (III.18)$$

et

$$V_T = \frac{q}{NCS \cdot \gamma kT} \quad (III.19)$$

L'approche de détermination des paramètres régissant le comportement de la cellule photovoltaïque peut être schématisée par l'organigramme qui suit.

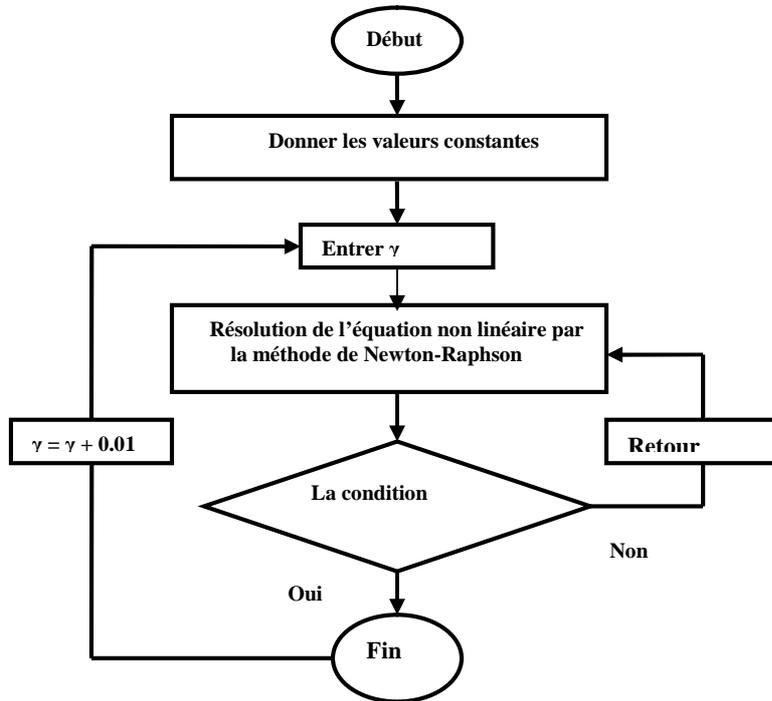


Fig.III.2 : Organigramme de résolution du système à cinq paramètres.

III.3- Simulation du comportement des modèles photovoltaïques étudiés

Les caractéristiques fournies par le fabricant sont représentées dans le chapitre II (Tableau.II.1). Ces dernières ont été obtenues sous un ensoleillement de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C [25]. Le tableau ci-dessous représente les résultats positifs obtenus par simulation. Pour le modèle BP MSX60, les valeurs des paramètres  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{ph}$  et  $I_0$  sont positives quant la valeur de  $\gamma$  varié de 1.1 jusqu'à 1.55.

	BP MSX60	Conergy C167P	SM55 Siemens	Shell 36 S	PVL-136
$\gamma$	[1.1 - 1.55]	[1.12 - 1.93]	[1.19 - 1.76]	0.96	[2.15-4.8]
$R_s$	[0.011102- 0.002784]	[0.010659 - 4.71e <sup>-5</sup> ]	[0.014054 - 0.0027977]	0.028571	[0,0093027-4.87e <sup>-6</sup> ]
$R_{sh}$	[86.684 - 261.56]	[50.2 - 10.444]	[95.611 - 435.2]	170.61	[0,62661-62.892]
$I_{ph}$	[3.8005 - 3.8]	[5.3711 - 5.37]	[3.4505 - 3.45]	2.3004	[5,1757-5.1]
$I_0$	[3.77e <sup>-9</sup> - 1.55e <sup>-6</sup> ]	[4.99e <sup>-9</sup> - 3.05e <sup>-5</sup> ]	[9.51e <sup>-9</sup> - 5.63e <sup>-6</sup> ]	7.9e <sup>-11</sup>	[1,28e <sup>-05</sup> -0.017538]

Tableau.III.1 : Les paramètres simulés des différents modèles photovoltaïques.

Nous avons comparé les résultats obtenus pour le modèle à quatre paramètres (chapitre II) pour les cinq modèles étudiés. Pour le cas de cinq paramètres, nous avons utilisé les deux valeurs à l'extrémité de l'intervalle mesuré (Tableau.III.1), c'est à dire pour le modèle *SM55 Siemens*; nous avons choisi les valeurs de  $\gamma=1.19$  et de  $\gamma=1.76$  et leurs paramètres correspondants, et ainsi de suite pour les autre modèles.

Les figures III.3, III.4, III.5, III.6 et III.7 représentent les courbes *I-V* et *P-V* pour les deux modèles utilisés (quatre et cinq paramètres). (On utilise la méthode de *bisection* pour le modèle à quatre paramètres étudié au chapitre II).

On remarque que les caractéristiques *I-V* pour les deux modèles (quatre et cinq paramètres à une exponentielle) sont presque identiques quand nous avons choisi l'extrémité supérieure de  $\gamma$  (Tableau.III.1). Mais pour l'extrémité inférieure de l'intervalle de  $\gamma$ , la déviation de la courbe *I-V* est très remarquable pour les modèles *Conergy C167P* et *PVL-136*. La même remarque pour la courbe *P-V*.

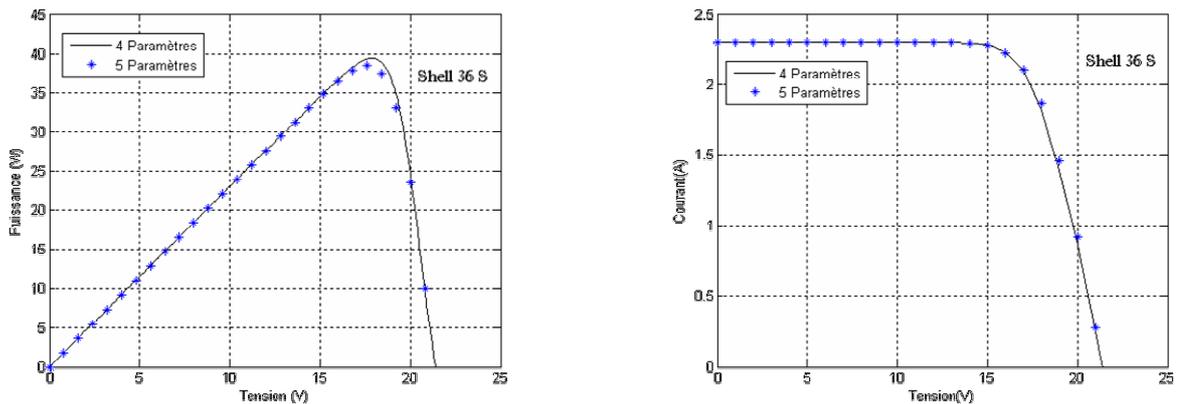


Fig.III.3: Courbes *I-V* et *P-V* des modèles à quatre et cinq paramètres type Shell 36 S.

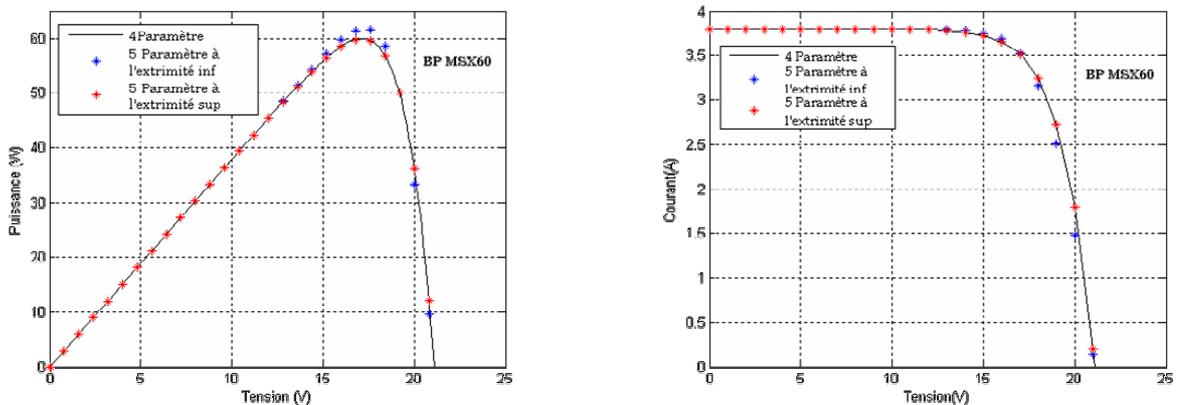


Fig.III.4: Courbes *I-V* et *P-V* des modèles à quatre et cinq paramètres type BP MS60.

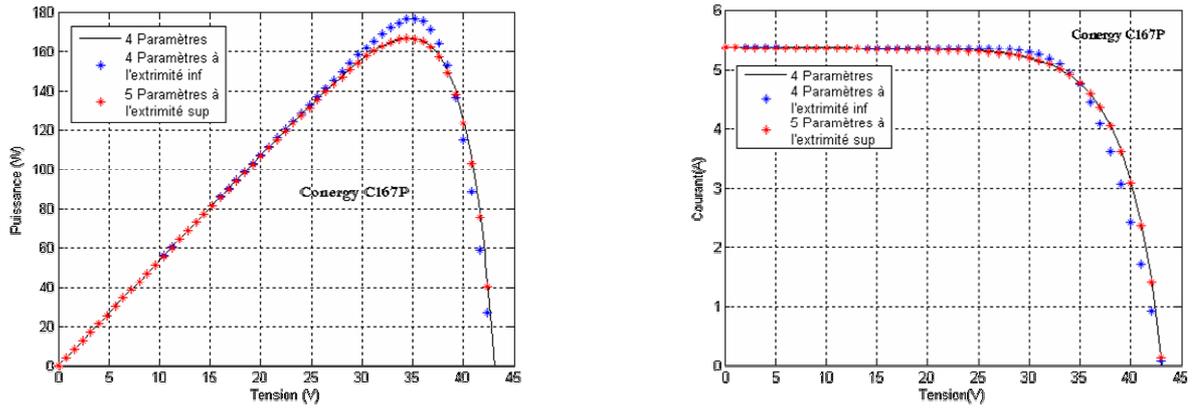


Fig.III.5: Courbes *I-V* et *P-V* des modèles à quatre et cinq paramètres type Conergy C167P.

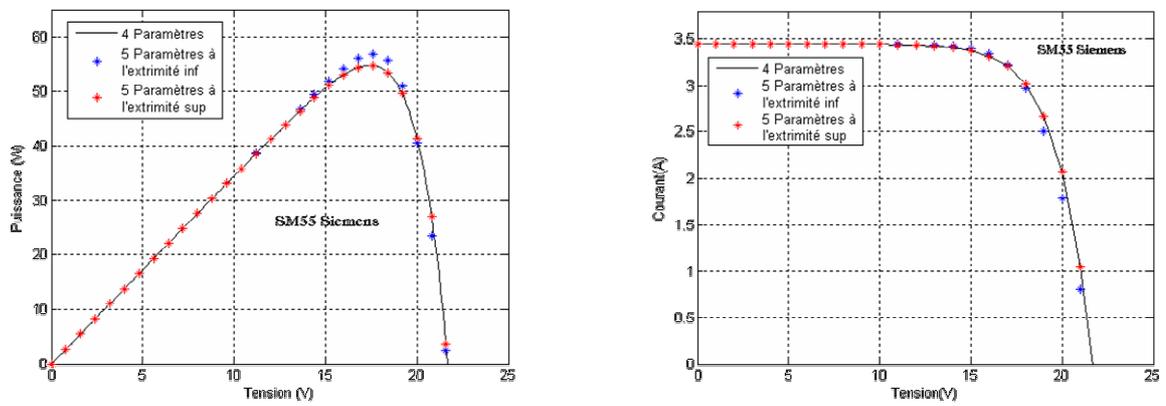


Fig.III.6: Courbes *I-V* et *P-V* des modèles à quatre et cinq paramètres type SM55 Siemens.

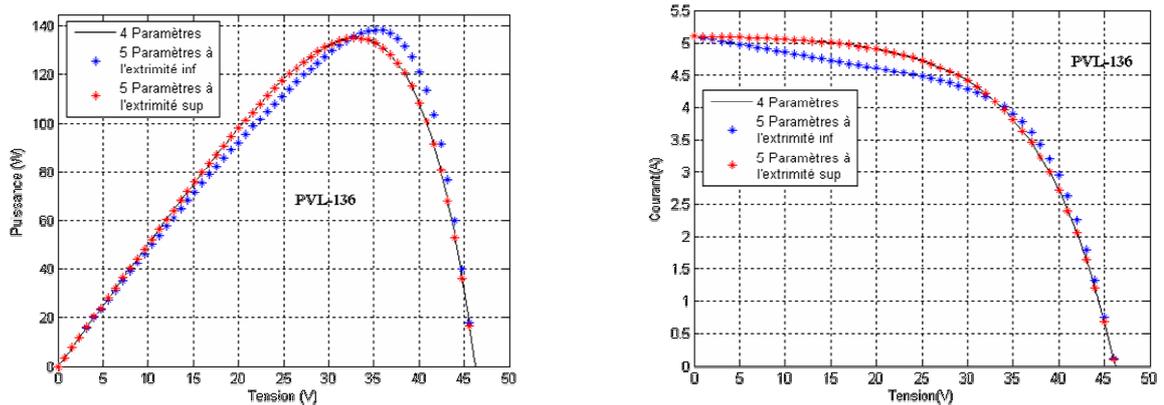


Fig.III.7: Courbes *I-V* et *P-V* des modèles à quatre et cinq paramètres type PVL-136.

**III-4- Le modèle à deux exponentielles**

Dans le chapitre qui suit, nous allons étudier un modèle à quatre paramètres, ce modèle est représenté par une équation implicite comportant une seule exponentielle:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{e(V + R_s I)}{\gamma_1 kT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{III.20}$$

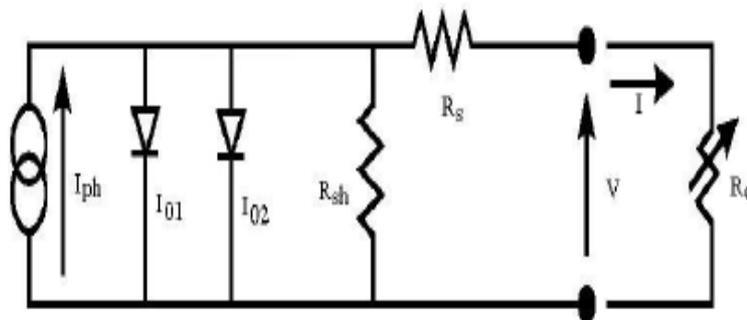
Après avoir choisi arbitrairement la valeur de  $R_{sh}$ , on peut fixer la valeurs des paramètres  $I_{ph}$ ,  $I_{01}$ ,  $\gamma_1$  et  $R_s$  de telle sorte que la courbe  $I$ - $V$  tirée de l'équation (III.20), rende compte exactement des données fournies par le fabricant dans les conditions standards ( $T=298^\circ K$ , éclairement AM 1.5  $E=1000W/m^2$ ), à savoir la tension à vide, le courant de court-circuit, la tension et le courant correspondants à la puissance de crête. Le choix de la résistance shunt  $R_{sh}$  a peu d'influence sur le résultat, de sorte que l'on peut faire abstraction de cette résistance, ce qui revient à lui attribuer une valeur infinie  $R_{sh} = \infty$ .

Cependant, comme nous avons vu dans la chapitre II, cette procédure conduit pour certains modules à des valeurs irréalistes (*Conergy C 167P, PVL-136*) des paramètres ( $R_s < 0$ ) même en incluant une résistance shunt.

Nous examinons ici la possibilité de suivre une procédure, mais en utilisant un modèle à deux exponentielles.

**III.4.1- Les paramètres du circuit équivalent**

Le circuit équivalent d'un modèle à deux exponentielles est représenté sur la figure III.8. Plusieurs auteurs ont utilisé ce modèle dans leurs travaux [30], [31], [32]. Ce circuit inclut deux diodes parallèlement et une résistance série et une autre résistance shunt. Ce circuit peut être utilisé pour une cellule individuelle, pour un module comportant plusieurs cellules, ou pour une panneau photovoltaïque composé de plusieurs modules.



**Fig. III.8: Circuit équivalent du modèle à deux diodes.** [30]

La relation de la caractéristique courant-tension dans les conditions standard, figure.III.8 est exprimée par l'équation (III.21). Six paramètres doivent être connus afin de déterminer le courant et la tension, et la puissance fournie à la charge. Ces six paramètres sont : le courant

généralisé par l'effet photoélectrique  $I_{ph}$ , le courant inverse de saturation des deux diodes  $I_{01}$  et  $I_{02}$ , la résistance série  $R_s$ , la résistance shunt  $R_{sh}$ , et le facteur de qualité  $\gamma_2$ .

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{kT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\frac{q(V + R_s I)}{\gamma_2 kT} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{III.21})$$

Ces paramètres peuvent être déterminés uniquement sur base des données nominales fournies par le fabricant.

### III.5- Les paramètres de référence

La résistance shunt  $R_{sh}$  étant supposée connue, les paramètres du modèle sont au nombre de cinq :  $I_{ph}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $R_s$  et  $\gamma_2$ .

Pour évaluer les cinq paramètres de l'équation (III.21), cinq informations indépendantes sont nécessaires. En général, ces cinq paramètres sont fonction du rayonnement solaire incident sur la cellule et de la température de cellules. Les valeurs de référence de ces paramètres sont déterminées dans les conditions standard ( $T=298\text{K}$ , éclairement AM 1.5  $E=1000\text{W/m}^2$ ). Trois paires courant-tension sont normalement fournies par le fabricant aux conditions standard: le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert et le courant et la tension au point maximum de puissance.

En imposant à l'équation (III.21) de passer par ces points, on obtient :

$$0 = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp\frac{qV_{oc}}{kT} - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\frac{qV_{oc}}{\gamma_2 kT} - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (\text{III.22})$$

$$I_p = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp\frac{q(V_p + R_s I_p)}{kT} - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma_2 kT} - 1 \right] - \frac{V_p + R_s I_p}{R_{sh}} \quad (\text{III.23})$$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp\frac{qR_s I_{sc}}{kT} - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\frac{qR_s I_{sc}}{\gamma_2 kT} - 1 \right] - \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (\text{III.24})$$

Une quatrième information résulte de la reconnaissance que la dérivation de la puissance au point de puissance maximum est nulle:

$$I_p = \left[ \frac{qI_{01}}{kT} \exp\frac{q(V_p + R_s I_p)}{kT} + \frac{qI_{02}}{\gamma_2 kT} \exp\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma_2 kT} + \frac{1}{R_{sh}} \right] (V_p - R_s I_p) \quad (\text{III.25})$$

Ne disposant que de quatre équations pour fixer cinq paramètres, nous allons fixer la valeur de l'un d'entre eux, à savoir  $\gamma_2$ .

### III.5.1- Valeur du paramètre $\gamma_2$ [33]

Le paramètre  $\gamma$  peut prendre différentes valeurs selon les phénomènes physiques dont cette exponentielle rend compte. Un premier cas particulier est celui correspondant à la diffusion, auquel cas  $\gamma=1$ , c'est la valeur que nous avons considérée explicitement dans la première exponentielle. Un autre cas souvent cité est celui correspondant à une recombinaison de porteurs se produisant uniquement par des pièges situés au milieu du gap interdit et distribués uniformément dans la zone de déplétion, auquel cas  $\gamma=2$ .

On s'attend donc à trouver dans notre modèle à deux exponentielles une valeur  $\gamma_2$  proche de 2, mais une valeur différente est acceptable car la valeur 2 correspond à des hypothèses très particulières.

Remarquons que comme dans [34] et [20], le système des quatre équations ainsi constitué est linéaire en une partie des variables, à savoir dans le cas présent  $I_{ph}$ ,  $I_{01}$  et  $I_{02}$ . Pour examiner les possibilités de choix que l'on a sur les valeurs de  $\gamma_2$  menant à une solution admissible, nous avons dès lors procédé comme suit pour une série de modules dont nous connaissons les valeurs nominales: nous avons fait varier  $\gamma_2$  depuis 0.1 jusqu'à 10 par pas de 0.01. Pour chacune de ces valeurs de  $\gamma_2$ , nous résolvons le système des quatre équations (III.22), (III.23), (III.24) et (III.25) à quatre inconnues  $I_{ph}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  et  $R_s$ . Les étapes de cette résolution sont détaillées ci-dessous.

### III.6- Résolution du système d'équations [33]

#### III.6.1- Fixation des bornes pour $R_s$

Nous pouvons déterminer une borne supérieure pour la valeur de la résistance série. En effet, en dérivant l'équation (III.23) et en l'évaluant en  $I=0$ , on obtient [31]:

$$R_s = - \left[ \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} + \frac{1}{X_{1v} + X_{2v} + 1/R_{sh}} \right] \quad (III.26)$$

Où

$$X_{1v} = \frac{qI_{01}}{kT} \exp \frac{q(V_{oc})}{kT} \quad (III.27)$$

Et

$$X_{2v} = \frac{qI_{02}}{\gamma_2 kT} \exp \frac{q(V_{oc})}{\gamma_2 kT} \quad (III.28)$$

La résistance shunt  $R_{sh}$  est supposée connue et infinie, alors l'équation (III.22) devient [31]:

$$R_s = - \left[ \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} + \frac{1}{X_{1v} + X_{2v}} \right] \quad (III.29)$$

Comme les équations (III.27) et (III.28) sont positives alors on peut écrire:

$$R_s < - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} \quad (III.30)$$

En admettant que la caractéristique  $I$ - $V$  est monotone et convexe, on doit avoir:

$$\frac{V_{oc} - V_p}{I_p} > - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} \quad (III.31)$$

De sorte que l'on peut prendre comme borne supérieure:

$$R_{s,max} = \frac{V_{oc} - V_p}{I_p} \quad (III.32)$$

Physiquement la valeur de la résistance série doit être positive, donc la deuxième borne de la résistance série c'est à dire la borne inférieure est  $R_s=0$ .

### III.6.2- Recherche de la valeur de $R_s$

Nous pouvons alors utiliser une méthode itérative bien connue : la recherche des racines d'une fonction (méthode de *Newton-Raphson*), celle par encadrement, moyennant certaines conditions:

1) Choisir une des quatre équations pour constituer la fonction erreur( $R_s$ ) à annuler. Nous avons opté ici pour l'équation (III.22). Les autres équations, formant un système linéaire, servent à trouver les courants  $I_{ph}$ ,  $I_{01}$  et  $I_{02}$  utilisés dans l'expression de la fonction erreur pour  $R_s$  et  $\gamma_2$  examinés

2) Les bornes pour  $R_s$  doivent donner à la fonction erreur( $R_s$ ) des valeurs de signes opposés. Si  $R_s = 0$ ,  $R_s = R_{s,max}$  donnent des erreurs de mêmes signes, soit il n'y a pas de racine (pas de solution avec une résistance positive ou système impossible), soit il y en a au moins deux, soit il y a une racine et un changement de signe en passant par une asymptote verticale. Il faut alors parcourir la fonction. Ainsi nous pouvons dresser le tableau (III.2) fournissant les bornes du domaine des  $\gamma_2$  qui conduisent à une solution acceptable physiquement.

Module	BP MSX60	Ase 165	Conergy C 167P	SM55 Siemens	Shell 36 S	PVL-136
Borne Inf	$\gamma=1.56$ $I_{01}=2,7325e^{-11}$	$\gamma=2.88$ $R_s=5,4145e^{-5}$	$\gamma=2.13$ $R_s=6,6802e^{-4}$	$\gamma=1.76$ $I_{01}=6,6791e^{-12}$	$\gamma=0$	$\gamma=1.35$ $R_s=1.0387e^{-4}$
Borne Sup	—	—	—	—	$\gamma=0.8$ $I_{01}=6,3435e^{-12}$	—
Juste avant Borne Inf	$I_{01}<0$	$R_s<0$	$R_s<0$	$I_{01}<0$	—	$R_s<0$
Juste après Borne Sup	—	—	—	—	$I_{01}<0$	—

Tableau .III.2: Domaines de  $\gamma_2$ .

### III.7- Comment déterminer $R_{sh}$

Beaucoup de modèles rencontrés dans la littérature comportent une résistance  $R_{sh}$  finie. Cependant, les données fournies de façon standard par les fabricants de modules ne permettent pas de déterminer cette résistance, qui doit donc être déterminée expérimentalement. Pour discuter des condition d'une telle détermination, nous avons dressé le tableau (III.3) qui donne la valeur de l'inverse de la pente en  $V=0, I=0$  de la caractéristique d'une cellule sous un éclairement nul (caractéristique d'obscurité), pour un modèle sans résistance shunt. Cette pente est une résistance incrémentale qui a été calculée en utilisant la formule (III.33) [31], obtenue en dérivant la caractéristique en  $V=0$ .  $1/R_{sh}$ , ainsi que  $I$  ont été annulés. Les valeurs de  $R_s, I_{01}, I_{02}$  ont été calculées à partir des données nominales, donc en conditions standard, comme expliqué ci-dessus.

Avec ce modèle, on obtient sous éclairement nul:

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=0} = - \left[ \frac{1}{\frac{qI_{01}}{kT} + \frac{qI_{02}}{\gamma_2 kT}} + R_s \right] \tag{III.33}$$

Comme on le voit au tableau (III.3) ci-dessous, la pente à l'origine de la caractéristique d'obscurité dépend fortement de la valeur de  $\gamma_2$ . En outre, elle prend des valeurs qui sont dans la gamme des valeurs de  $R_{sh}$  habituellement rencontrées. On en déduit que la mesure de la pente à l'origine de le caractéristique d'obscurité ne peut être considérée comme la valeur de  $1/R_{sh}$ , contrairement à ce qui est parfois suggéré.

Dans la littérature, on assimile parfois  $1/R_{sh}$  à la pente au point de court circuit [35] de la caractéristique en conditions standard. Or, le modèle prévoit pour cette pente une valeur:

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I_{sc}} = - \left[ \frac{1}{X_{li} + X_{2i} + 1/R_{sh}} + R_s \right] \tag{III.34}$$

Avec

$$X_{1i} = \frac{qI_{01}}{kT} \exp \frac{q(R_s I_{sc})}{kT} \tag{III.35}$$

$$X_{2i} = \frac{qI_{01}}{\gamma_2 kT} \exp \frac{q(R_s I_{sc})}{\gamma_2 kT} \tag{III.36}$$

On constate que les conductances équivalentes des diodes (III.35), (III.36) ont une valeur plus grande que ce qu’elles avaient au point origine de la caractéristique d’obscurité, comme on peut le voir en les comparant aux termes correspondant de (III.33). Cette situation se prête donc encore moins bien à une détermination directe de  $R_{sh}$ .

Cellule	<b>C167P</b>		<b>Msx 60</b>		<b>Siemens Sm55</b>	
	$\gamma_2$	$-\frac{dV}{dI} \Big _{I_{sc}}$	$\gamma_2$	$-\frac{dV}{dI} \Big _{I_{sc}}$	$\gamma_2$	$-\frac{dV}{dI} \Big _{I_{sc}}$
Unité	—		—		—	
	2.13	<b>713.94</b>	1.56	<b>24972</b>	1.76	<b>8274.4</b>
	2.304	<b>575.55</b>	2.248	<b>1977.3</b>	2.408	<b>1289.3</b>
	3.278	<b>99.251</b>	2.936	<b>419.872</b>	3.056	<b>339.908</b>
	3.853	<b>51.261</b>	3.624	<b>161.659</b>	3.704	<b>142.768</b>
	4.426	<b>31.535</b>	4.312	<b>11.5290</b>	4.352	<b>78.3992</b>
	5	<b>21.796</b>	5	<b>54.5543</b>	5	<b>50.7304</b>
Cellule	<b>Ase 165</b>		<b>Bp 350</b>		<b>Shell 36 s</b>	
	$\gamma_2$	$-\frac{dV}{dI} \Big _{I_{sc}}$	$\gamma_2$	$-\frac{dV}{dI} \Big _{I_{sc}}$	$\gamma_2$	$-\frac{dV}{dI} \Big _{I_{sc}}$
Unité	—		—		—	
	2.88	<b>113.94</b>	1.73	<b>14503</b>	0.1	<b>2.475e<sup>8</sup></b>
	3.304	<b>68.465</b>	1.984	<b>11309</b>	0.24	<b>2.475e<sup>8</sup></b>
	3.728	<b>43.082</b>	2.238	<b>4979.4</b>	0.38	<b>2.475e<sup>8</sup></b>
	4.152	<b>29.43</b>	2.492	<b>2508.6</b>	0.52	<b>2.475e<sup>8</sup></b>
	4.576	<b>21.543</b>	2.746	<b>1421.6</b>	0.66	<b>2.461e<sup>8</sup></b>
	5	<b>16.607</b>	5	<b>118.353</b>	0.8	<b>3.610e<sup>9</sup></b>

**Tableau.III.3 : Dépendance de  $\gamma_2$  et l’inverse de la pente de la caractéristique d’une cellule pour un éclairement nul.**

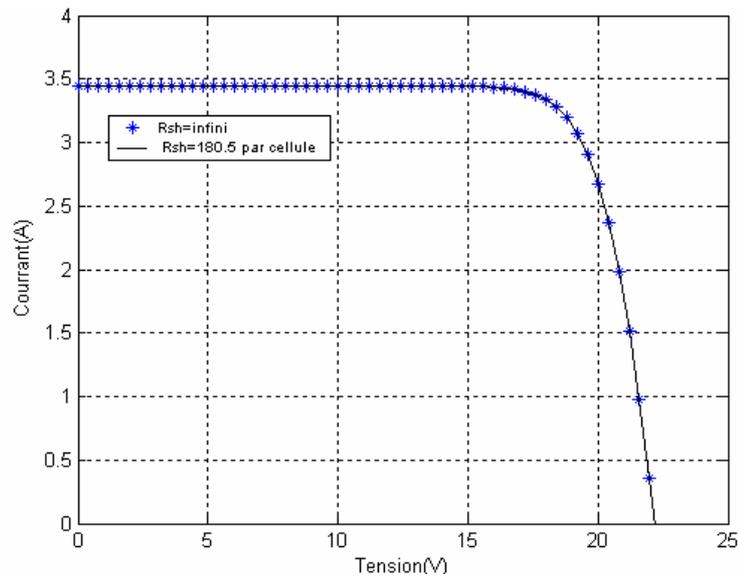
En fait, pour qu’une telle détermination ait un sens, il faut se placer dans une situation où les diodes sont bloquées, c’est-à-dire où la tension de jonction est négative au module, ce qui n’est possible que si l’on peut déconnecter pour la mesure, les diodes en antiparallèle qui assurent la protection contre les points chauds. La pente de la caractéristique relevée à tension négative est alors l’inverse de  $R_{sh}+R_s$ , et fournit  $R_{sh}$  soit en négligeant  $R_s$  devant  $R_{sh}$ , soit en effectuant une correction pour tenir compte de  $R_s$ .

Si une valeur de  $R_{sh}$  est disponible, notre approche pour déterminer les autres paramètres du modèle reste valide, puisque les équations du modèle tiennent compte de  $R_{sh}$ .

### II.7.1- Possibilité de considérer $R_{sh}$ comme infini

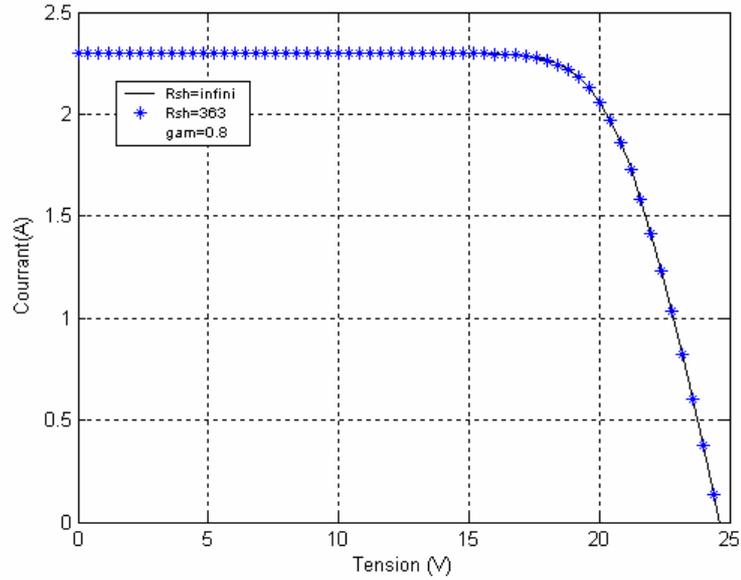
Puisque les données fournies par les fabricants ne permettent pas de déterminer la valeur de  $R_{sh}$ , la question se pose de savoir si omettre une telle résistance dans un modèle à deux exponentielles n'est en pratique pas dommageable pour le tracé de la caractéristique.

En résolvant le système d'équation pour  $\gamma_2 = 2$  et  $R_{sh} = 180.5 \Omega/\text{cellule}$  [36] ou l'infini, nous avons déterminé les deux jeux de paramètres du modèle voir figure III.9.



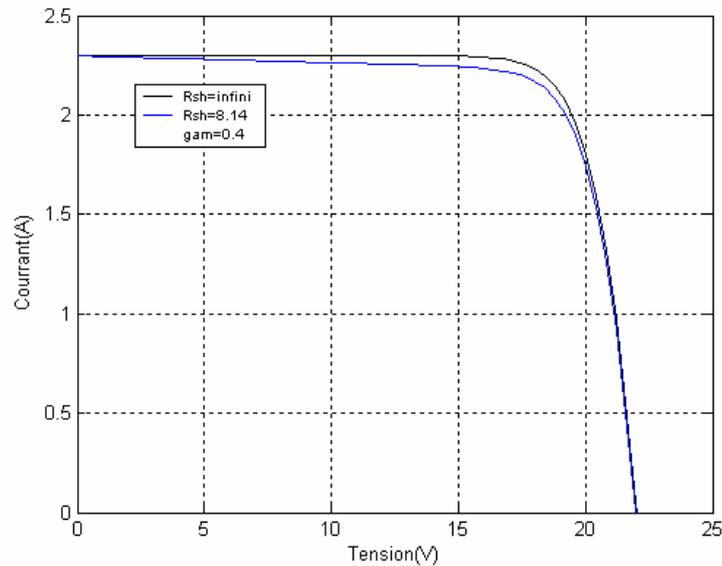
**Fig.III.9: Effet de la prise en compte de  $R_{sh}$  sur la caractéristique IV pour SM55.**

Cette figure montre que les deux caractéristiques  $I-V$  ainsi obtenues sont pratiquement confondues. Un autre cas encore plus défavorable est celui où le module *Shell 36s* comporterait une résistance shunt de faible valeur. La plus grande valeur de résistance donnant une solution réaliste (courant et résistance positifs), si on fixe  $\gamma_2$  à 0.8 est de  $362.032 \Omega/\text{cellule}$ , à comparer avec  $3.6 \cdot 10^9 \Omega/\text{cellule}$  (Tableau.III.3). Les deux caractéristiques  $I-V$  obtenues sont à nouveau pratiquement confondues, figure III.10.

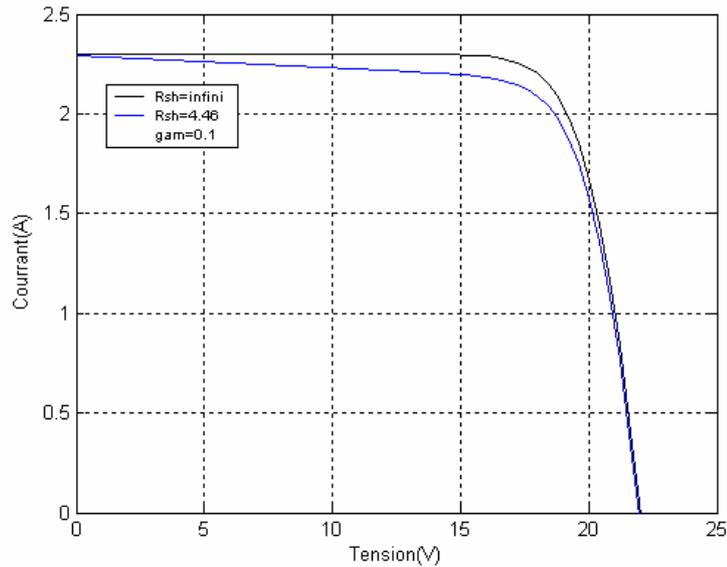


**Fig.III.10 : Effet de la prise en compte d'un Rsh de valeur minimale sur la caractéristique IV du module du SHELL 36 S,  $\gamma_2=0.8$ .**

La même opération pour  $\gamma_2=0.4$  et  $\gamma_2=0.1$ ; comme montré dans les figures III.11 et III.12 respectivement.



**Fig.III.11: Effet de la prise en compte d'une Rsh de valeur minimale sur la caractéristique I-V du SHELL 36 S,  $\gamma_2=0.4$ .**



**Fig.III.12: Effet de la prise en compte d'une  $R_{sh}$  de valeur minimale sur la caractéristique  $I-V$  du SHELL 36 S,  $\gamma_2=0.1$ .**

### III.8-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de cellule solaire à cinq paramètres pour un modèle à une seule exponentielle et un autre à double exponentielle, à partir de la connaissance des trois points de fonctionnement, en court-circuit, en circuit ouvert, et à puissance maximale (données de fabricant).

On remarque qu'il est possible de simuler ce modèle de cellule solaire à cinq paramètres, mais la solution trouvée n'est pas unique.

**Chapitre IV :**

***Poursuite du Point de Puissance Maximale  
(MPPT)***

### IV.1- Introduction

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque (PV), (ensemble de cellules photovoltaïques) de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (*température et irradiation*) et quelle que soit la tension de la charge (charge résistive ou batterie), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ). Pour cela, plusieurs systèmes ont été publiés dans la littérature.

### IV.2- Point de puissance maximale

L'installation la plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un champ photovoltaïque, formé d'un ou plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, et une charge (charge résistive ou batterie) qui utilise directement l'énergie produite, figure IV.1. Cette installation ne fournit un effet utile que pendant les périodes ensoleillées et pour des températures bien définies. Le courant fourni à la charge dépend fortement de l'intensité de l'éclairage pour une température donnée et de la nature de la charge.

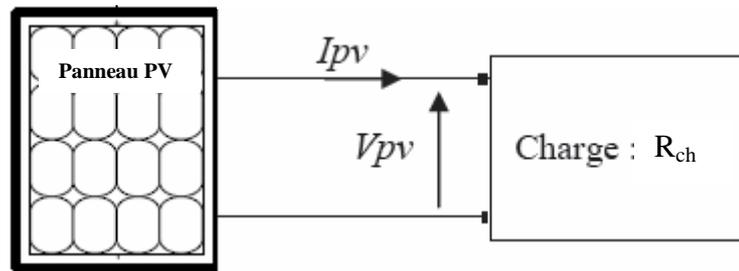


Fig.IV.1: Installation photovoltaïque au fil du soleil.

Pour un éclairement et température donnés, les caractéristiques  $I-V$  et  $P-V$  du générateur photovoltaïque connecté à la charge résistive  $R_{ch}$ . Il apparaît que :

Le générateur PV fonctionne à sa puissance maximale ( $P_{max}$ ) lorsque :

$$V_{pv} = V_{opt} \quad , \quad I_{pv} = I_{opt} \tag{IV.1}$$

$$R_{ch} = R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} \tag{IV.2}$$

$$P_{pv} = V_{pv} * I_{pv} = P_{max} = V_{opt} * I_{opt} \tag{IV.3}$$

Pour un éclairement donné, la condition optimale de fonctionnement des générateurs photovoltaïques est alors caractérisée par une tension  $V_{opt}$  et un courant  $I_{opt}$ . Le produit  $V_{opt}$  par  $I_{opt}$  constitue ainsi le maximum de puissance qu'on peut extraire du module photovoltaïque. Ce point est appelé point de puissance maximale (PPM) du module photovoltaïque pour une température et un éclairement donnés. Il est caractérisé par une résistance interne optimale  $R_{opt}$  du générateur photovoltaïque.

- les points P1, P2 et PPM, figure IV.2 sont les points de fonctionnement du système figure IV.1 dans les conditions suivantes :  $R_{ch} < R_{opt}$ ,  $R_{ch} = R_{opt}$ ,  $R_{ch} > R_{opt}$ .
- Lorsque la valeur de la charge est supérieure ou inférieure à celle correspondant aux conditions optimales ( $R_{opt}$ ) la puissance fournie par le générateur est inférieure à celle optimale ( $P_{max}$ ).

Donc, dans le cas d'une charge purement résistive, le point PPM correspond à une résistance optimale  $R_{opt}$  qu'il faut connecter au module, pour un éclairement bien déterminé.

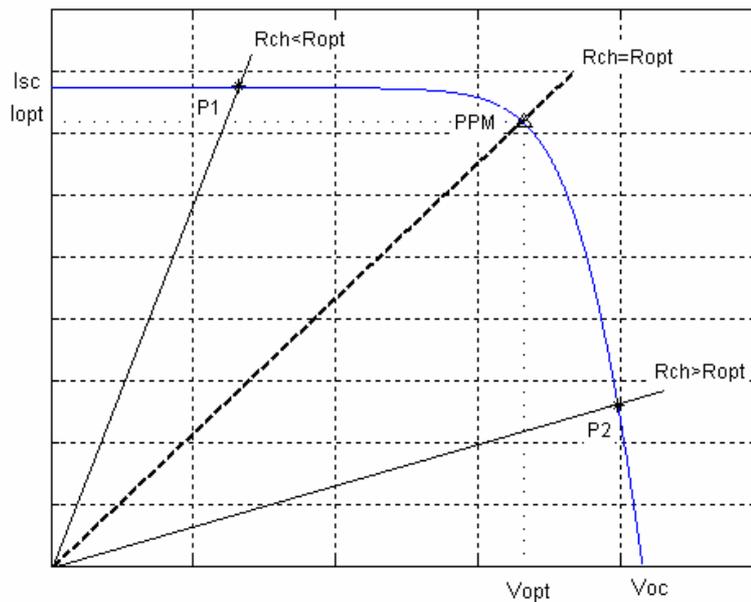


Fig.IV.2 : Caractéristique du système PV pour les trois cas

$$R_{ch} < R_{opt}, R_{ch} = R_{opt}, R_{ch} > R_{opt}$$

### IV.3- Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale

Pour obtenir la puissance maximum à la sortie, le module PV devrait être actionné au point de puissance maximum à toute heure. Un contrôleur capable de suivre le point de puissance maximum doit donc être mis en application.

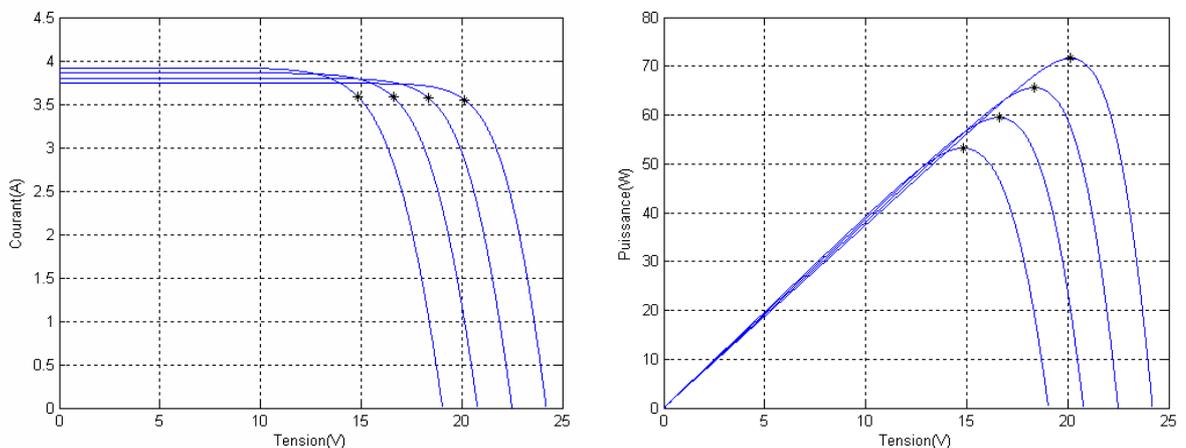
L'endroit du PPM dans le plan  $I-V$  n'est pas connu à l'avance et change toujours dynamiquement selon l'éclairement et la température. Par exemple, la figure IV.3 montre un ensemble de caractéristiques photovoltaïques  $I-V$  et  $P-V$  en fonction de l'augmentation de la température à un éclairement constant ( $1000\text{W/m}^2$ ), et la figure IV.4 montre les courbes  $I-V$  et  $P-V$  en fonction de l'éclairement à la température ambiante ( $25^\circ\text{C}$ ). On observe des décalages dans la position du PPM.

Par conséquent, le PPM doit être localisé par algorithme de poursuite, ce qui représente la philosophie du contrôleur de MPPT [37].

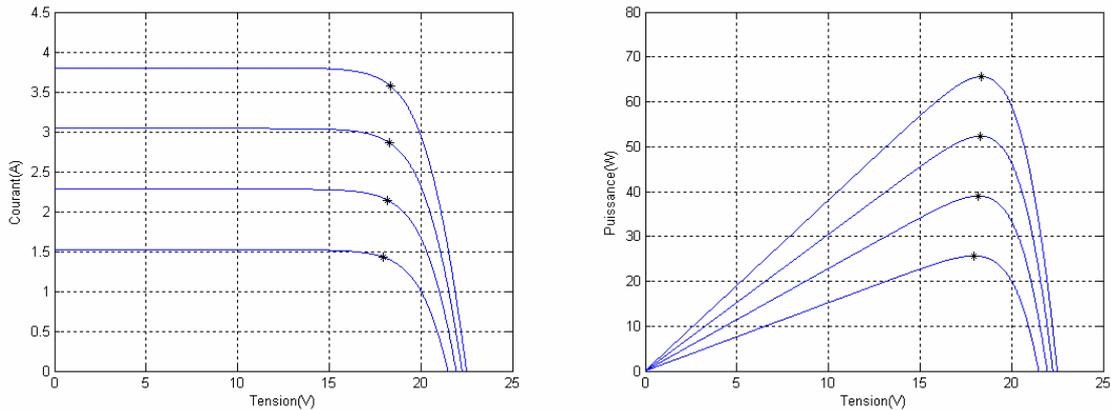
Il existe plusieurs techniques de poursuite du PPM. Toutes ces méthodes exigent l'apport d'un algorithme dans l'incrémentement de la tension pour la recherche de l'endroit du point de fonctionnement en position optimale [38].

On peut voir sur les figures IV.3 et IV.4, ci-dessous, l'allure générale des caractéristiques de la puissance et du courant en fonction de la tension pour différents éclairements et pour différentes températures.

Sur chaque courbe, le point noir représente le point de puissance maximale que peut fournir le panneau photovoltaïque. On voit bien que pour un éclairement et une température donnés, il existe une valeur de la tension qui maximise la puissance produite par le générateur.



**Fig.IV.3: PPM à température croissante et éclairement constant ( $1000\text{W/m}^2$ ).**



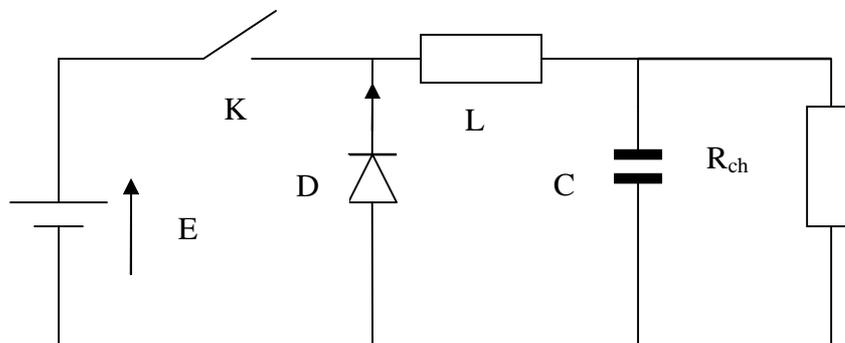
**Fig.IV.4: PPM à éclaircissement croissant et température constante (25 °C).**

#### IV.4- Types de régulateurs pour alimentations

Dans la littérature [39] [40] il existe différents types de régulateurs de conversions d'énergie électriques appelés convertisseurs: buck, boost, buck-boost, flyback, etc. Nous allons représenter ici les principales caractéristiques de quelques types de régulateurs.

##### IV.4.1- Convertisseur buck

Le convertisseur de type Buck, sous sa forme de base, est montré sur la figure IV.5. Les composantes clés sont l'inductance,  $L$ , l'interrupteur (switch),  $K$ , la diode  $D$  et la capacité  $C$ . On peut voir sur le timing la largeur du temps ON et OFF en fonction du rapport cyclique  $\alpha$  (duty cycle).



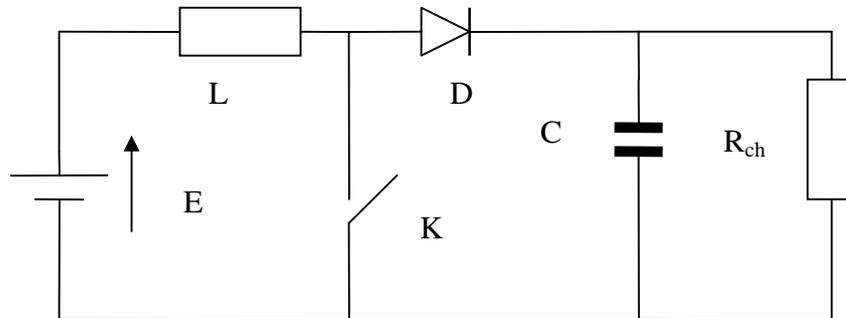
**Fig.IV.5:Circuit de base du convertisseur Buck.**

##### IV.4.2- Convertisseur boost

Le convertisseur de type buck est un dévolteur, il réduit la tension. Cependant, une topologie de circuit qui augmente la tension est le convertisseur de type boost comme montré sur la figure IV.6.

Le convertisseur boost dans la conduction continue dessine une source de courant continu, mais le courant de charge sera discontinu. Cette source de courant continu peut être avantageux pour des applications photovoltaïques, car il réduit le filtrage exigé entre le module photovoltaïque et le convertisseur.

Le convertisseur peut aussi fonctionner en mode discontinu quand la tension de charge dépend dans les deux cas du rapport cyclique. Avec le convertisseur boost (ou buck-boost), la tension peut monter à une valeur très élevée s'il n'y a aucun courant de charge.

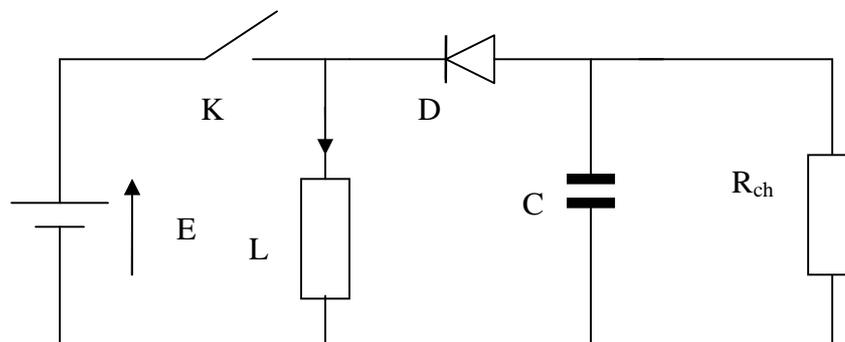


**Fig.IV.6: Circuit de base du convertisseur de type boost.**

#### IV.4.3- Convertisseur buck-boost

La troisième topologie de base est montrée sur la figure IV.7, c'est le convertisseur buck-boost. Ce convertisseur est utilisé quand on a besoin d'augmenter et de diminuer la tension.

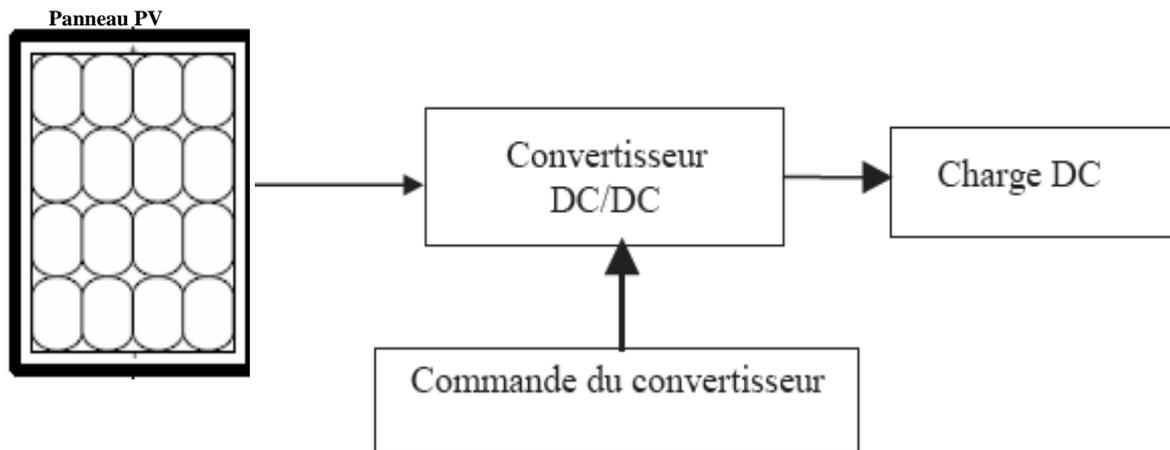
Quand l'interrupteur K est fermé, on charge toujours la self et lorsque cet interrupteur s'ouvre, la tension à travers l'inducteur est renversé et la self tire le courant à travers la diode D.



**Fig.IV.7: Circuit de base du convertisseur buck-boost.**

#### IV.5- Adaptation du générateur photovoltaïque au système global

Le raccordement d'un générateur photovoltaïque à une charge quelconque nécessite l'adaptation de ce générateur PV pour qu'il fonctionne, à une température et un éclairement donnés, à sa puissance maximale et par conséquent à un rendement élevé. Ceci est réalisé en intercalant entre le générateur PV et la charge un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC (hacheur) pour des applications en régime continu. L'adaptation a lieu en variant le rapport cyclique de la commande de l'interrupteur du convertisseur.



**Fig.IV.8: Système photovoltaïque avec contrôleur de commande MPPT.**

#### IV.6- Différents types de MPPT

Plusieurs algorithmes pour la poursuite du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking) ont été proposés par les chercheurs et différentes méthodes et stratégies de tracking existent dans la littérature [41-45].

Les algorithmes de recherche les plus couramment utilisées sont:

- Perturber et observer (P&O : Perturb-and-Observe)
- Tension constante (CV : Constant Voltage)
- Accroissement de la conductibilité (INC : INcremental Conductance)
- Capacité parasite (PC : Parasitic Capacitance)

##### IV.6. 1- Méthode de perturbation et d'observation (P&O) [43-46]

La méthode P&O est une approche largement répandue dans les MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement la mesure de  $V_{PV}$  et  $I_{PV}$ . Cette méthode peut dépister le point de puissance maximum tout à fait exactement malgré les variations d'éclairement et de température. Comme son nom l'indique, la méthode P&O utilise la perturbation de la tension  $V_{PV}$  et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance de sortie du module photovoltaïque. La figure IV.9 est un organigramme de l'algorithme P&O. À chaque cycle,  $V_{PV}$  et  $I_{PV}$  sont mesurés pour calculer  $P_{PV}(k)$ . Cette valeur de  $P_{PV}(k)$  est comparée à la valeur  $P_{PV}(k-1)$  calculée au cycle précédent. Si la puissance obtenue a augmenté,  $V_{PV}$  est ajusté plus loin dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance obtenue a diminué,  $V_{PV}$  est ajustée dans la direction opposée comme dans le cycle précédent.  $V_{PV}$  est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT. Quand le point de puissance maximum est atteint,  $V_{PV}$  oscille autour de la valeur optimale  $V_{PV,mppt}$ . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec la taille du pas de la

perturbation. Si ce pas est grand, l'algorithme de MPPT répond rapidement aux changements soudains de la condition de fonctionnement. D'autre part, si le pas est petit les pertes de puissance diminuent selon les conditions climatiques changeantes. le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'irradiance.

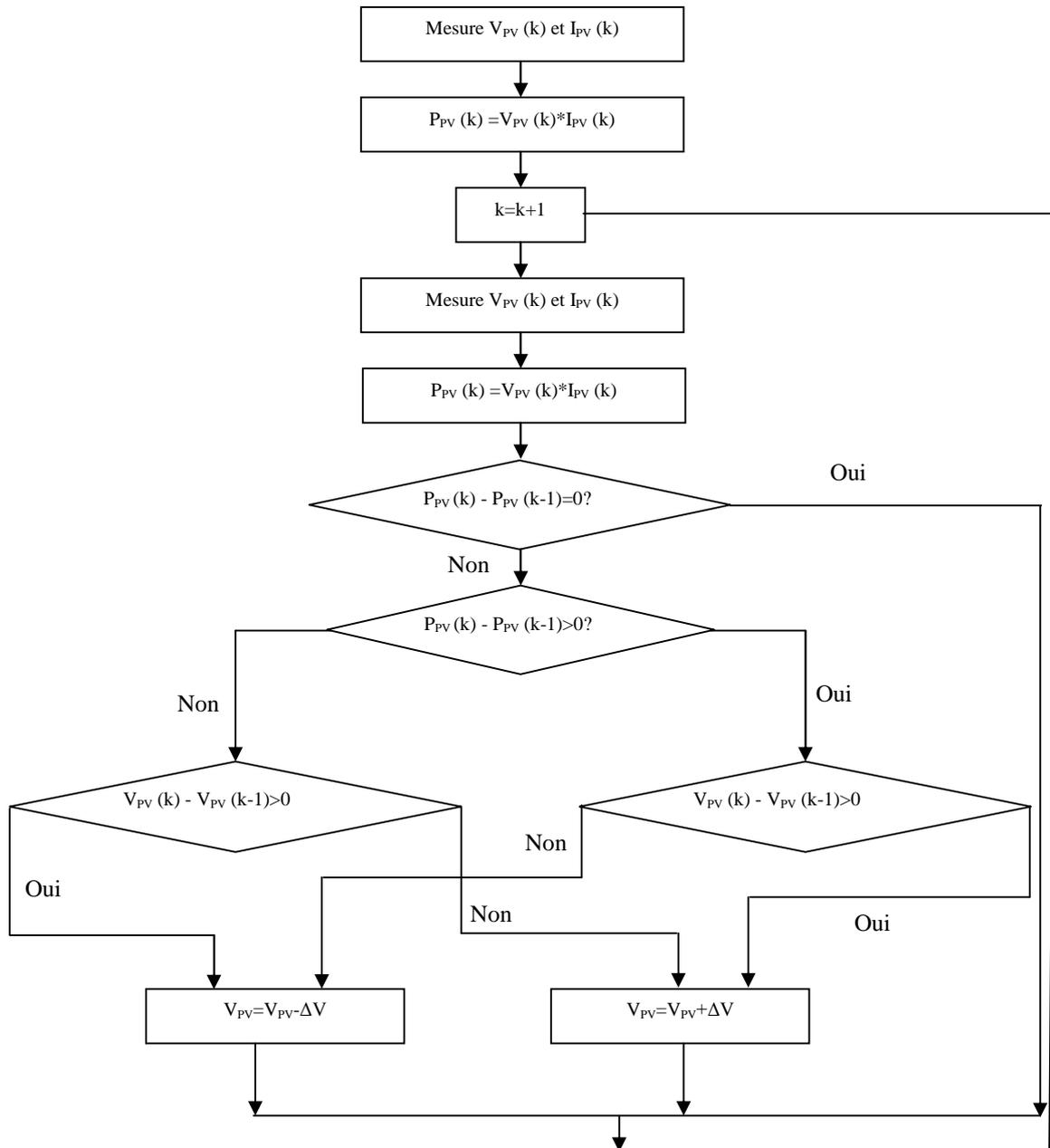


Fig.IV.9 : Organigramme de la méthode «Perturbation et Observation».

L'inconvénient de la technique P&O est lors du changement rapide des conditions atmosphériques, cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans une fausse direction comme représenté sur la figure IV.10. Au commencement, la tension de fonctionnement du convertisseur est au point 1 (point de puissance maximum ou PPM). Supposons qu'une perturbation déplace le point de fonctionnement vers le point 2. Pendant cette période de perturbation, l'éclairement a augmenté de  $E_1$  à  $E_2$ . Ceci mène à une augmentation de puissance du système de  $P_{pv1}$  à  $P_{pv2}$ . Comme le PPM à cet éclairement est au point 4, qui correspond à une puissance maximum ( $P_{pv,max} E_2$ ). Durant la perturbation suivante, l'algorithme P&O incrémentera la tension de fonctionnement du convertisseur plus loin pour la diriger vers le point 3, là il y aura une augmentation de la puissance du convertisseur qui sera mesurée si l'éclairement augmente de  $E_2$  à  $E_3$  avec le nouveau PPM au point 5. De cette façon, l'algorithme de P&O continuera à déplacer le point de fonctionnement du convertisseur plus loin du point de puissance maximum réel, cela entraîne de plus en plus de perte de puissance. Cet ajustement incorrect continuera jusqu'à ce que le changement d'éclairement ralentisse ou s'arrête.

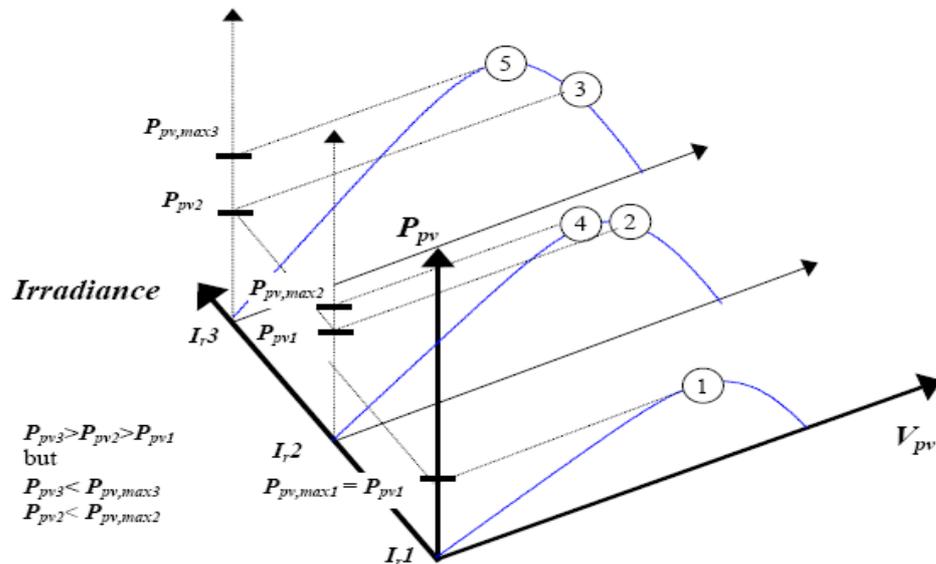


Fig.IV.10: Déviation de la méthode P&O lors du MPP.

La première solution à ce problème est d'augmenter la vitesse d'exécution en employant un microcontrôleur plus rapide. La deuxième solution est de vérifier n'importe quel changement rapide d'éclairement en vérifiant la valeur de  $dI_{pv}/dt$  et neutraliser l'ajustement de tension si le changement de  $dI_{pv}/dt$  dépasse une certaine limite.

**IV.6.2- Méthode de l'Accroissement de la conductibilité (Incremental Conductance Method)**

La méthode d'incrémentation de la conductance a été proposée pour éviter les inconvénients de la méthode P&O. Elle est basée sur le fait que la dérivée de la puissance de sortie  $P_{PV}$  par rapport à la tension  $V_{PV}$  du panneau est égale à zéro au PPM. Ceci mène à l'ensemble des équations suivantes.

$$\frac{\partial p_{PV}}{\partial V_{PV}} = \frac{\partial(I_{PV} V_{PV})}{\partial V_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{\partial I_{PV}}{\partial V_{PV}} = 0 \quad \text{au PPM} \quad (IV.4)$$

$$\frac{\partial p_{PV}}{\partial V_{PV}} = \frac{\partial(I_{PV} V_{PV})}{\partial V_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0 \quad \text{à gauche du PPM} \quad (IV.5)$$

$$\frac{\partial p_{PV}}{\partial V_{PV}} = \frac{\partial(I_{PV} V_{PV})}{\partial V_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{\partial I_{PV}}{\partial V_{PV}} < 0 \quad \text{à droite du PPM} \quad (IV.6)$$

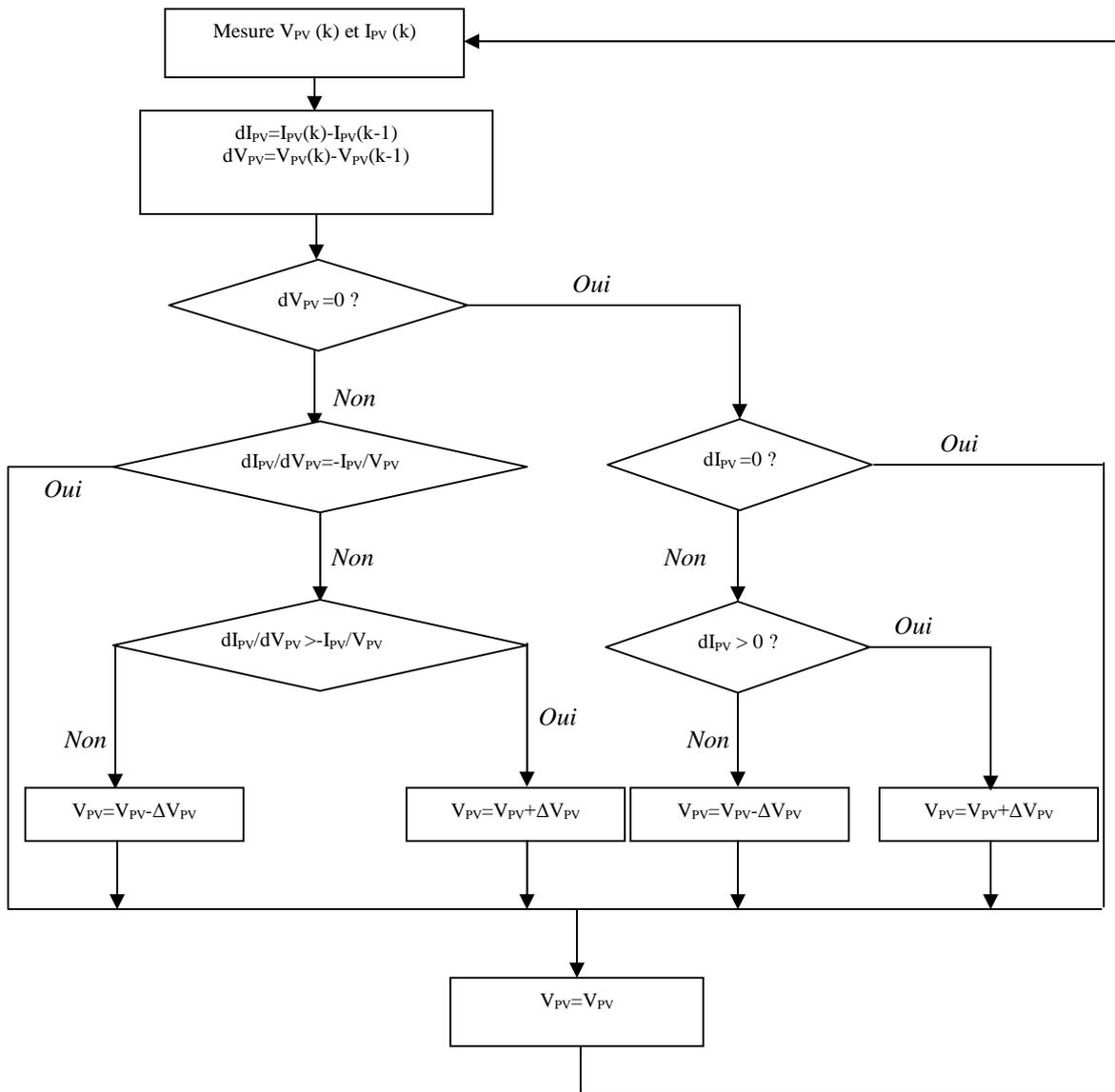
Ces équations peuvent être écrites comme :

$$\frac{\partial I_{PV}}{\partial V_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad \text{au PPM} \quad (IV.7)$$

$$\frac{\partial I_{PV}}{\partial V_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad \text{à gauche du PPM} \quad (IV.8)$$

$$\frac{\partial I_{PV}}{\partial V_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad \text{à droite du PPM} \quad (IV.9)$$

Les équations ci-dessus peuvent être utilisées comme algorithme de commande pour le point de fonctionnement du convertisseur en mesurant l'accroissement de la conductance et la conductance instantanée du convertisseur  $dI_{PV}/dV_{PV}$  et  $I_{PV}/V_{PV}$  respectivement.



**Fig.IV.11: Algorithme de la Méthode d'incrémentation de conductance. [38]**

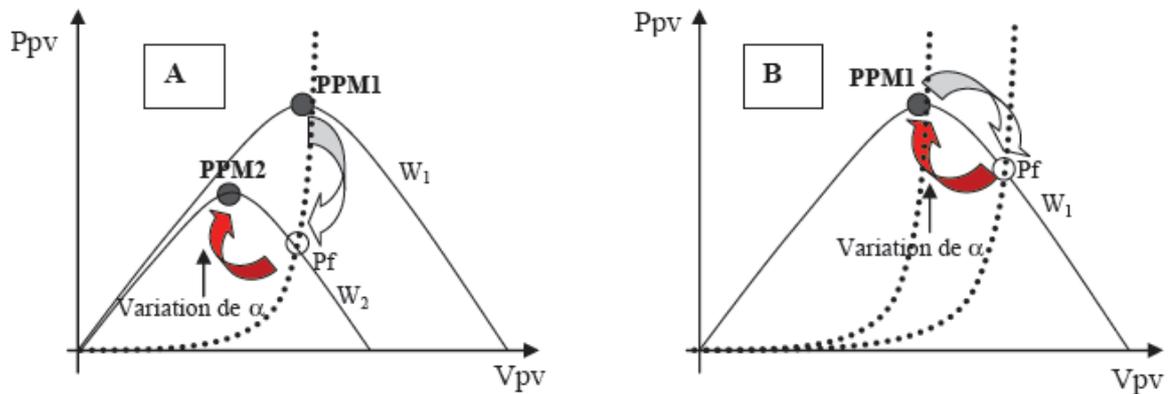
L'organigramme de l'algorithme de commande est montré sur la figure IV.11. Il peut être plus difficile de mettre en application cette méthode que les méthodes précédentes parce qu'elle implique des divisions dans lesquelles les dénominateurs peuvent être égaux à zéro.

### IV.7- Commandes MPPT

#### IV.7.1- Généralités

Pour une puissance incidente  $W_1$ , la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini  $\alpha_{1opt}$  (point PPM1) sur la figure IV.12-a. Si la puissance change ( $W_2$ ) alors ce point de puissance maximale est le point PPM2 et le point de fonctionnement du générateur PV est le point Pf. Pour converger vers le nouveau point PPM2, il faut ajuster le rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur  $\alpha_{2opt}$ . Il en sera de même lorsque la charge  $R_L$  change

figure IV.12-b, le point de puissance maximale dévie de sa position optimale PPM1, pour converger vers ce PPM1, il faut agir sur le rapport cyclique  $\alpha$ . Donc, dans un système photovoltaïque indépendant et autonome, cette régulation doit être réalisée automatiquement afin de poursuivre le point de fonctionnement optimal.



**Fig.IV.12: Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement et la charge  $R_L$   
a: Variation de l'éclairement et b: Variation de la charge. [47]**

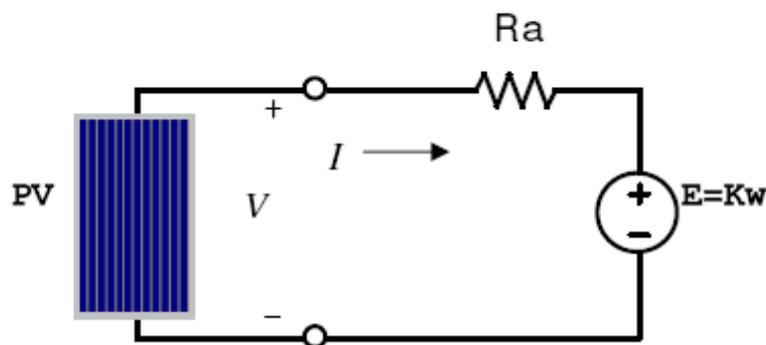
#### IV.7.2- Couplage à travers un convertisseur

Dans la pratique, beaucoup de systèmes de pompage photovoltaïque utilisent des moteurs à courant continu au lieu des moteurs à courant alternatif pour être directement couplés au générateur photovoltaïque (le pompage au fil du soleil).

Pour le circuit équivalent de la figure IV.13, l'équation de la tension DC est:

$$V = I.R_a + K.\omega \tag{IV.10}$$

Avec  $R_a$  ( $\Omega$ ) la résistance d'armature,  $K$  une constante et  $\omega$  (rad/sec) est la vitesse angulaire du rotor.



**Fig. IV.13 : Modèle électrique du moteur à courant continu à aimant permanent.**

La figure IV.14 montre un modèle électrique d'une motopompe directement couplée à un module photovoltaïque, le point de fonctionnement du groupe motopompe est  $(V_1, I_1)$ . En intercalant entre le générateur et la charge, un convertisseur DC-DC qui consiste en un traqueur de puissance maximale (MPPT) plus un régulateur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui va pister le point de fonctionnement maximal du générateur photovoltaïque, on optimisera le fonctionnement de notre générateur et le couple moteur commence à augmenter de manière significative même à des niveaux bas de rayonnements.

La valeur du courant est déterminée pour chaque valeur du couple résistant et la valeur de la tension pour chaque valeur de la vitesse. Il est donc possible de faire correspondre à chaque valeur de la vitesse de rotation  $w$  de l'ensemble moteur-charge.

Cela se traduit par un glissement du point de fonctionnement  $(V_1, I_1)$  vers le point de fonctionnement  $(V_2, I_2)$  où la tension et le courant sont plus grands.

En effet, si le moteur ne tourne pas, il n'existe alors aucune force contreélectromotrice (f.c.e.m), et le générateur photovoltaïque est fermé sur une impédance très faible qui a la valeur de la résistance d'induit (droite OAB) et donc le courant monte lentement avec l'augmentation de la tension (pente  $=1/R_a$ ).

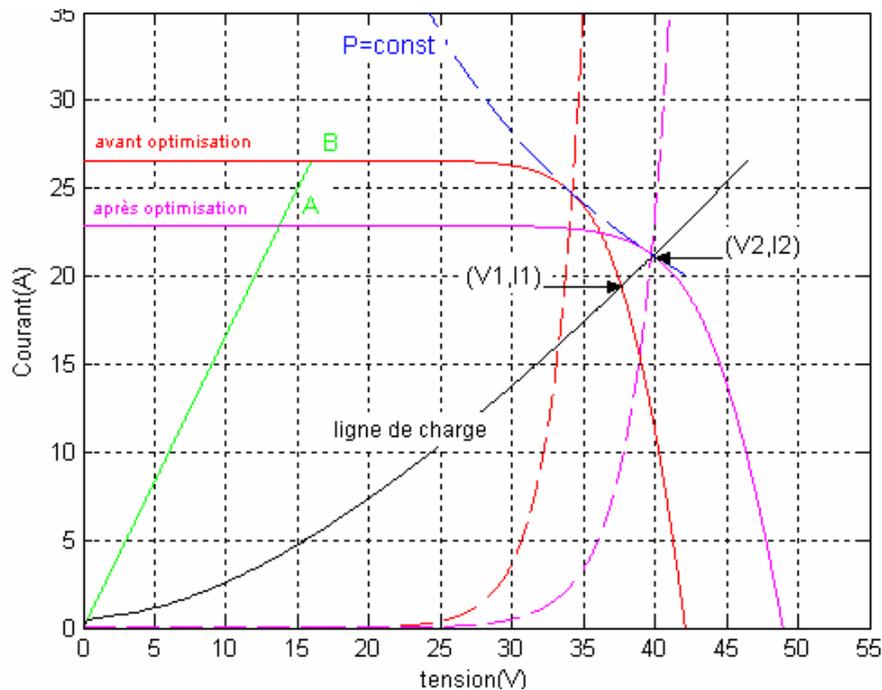


Fig. IV.14 : Caractéristiques I-V et de charge avant et après optimisation.

#### IV.8- Simulation du fonctionnement électrique du système photovoltaïque

Dans la figure (IV.15), on montre la variation du courant issu du module PV en fonction du changement d'éclairement et de la température du panneau. Le contrôleur de P&O amène le système vers le point maximum de puissance (MPP) ; après quelques oscillations, l'état d'équilibre est alors atteint. Dans l'état d'équilibre, on montre que le courant moyen du PV est très près de sa valeur optimale de 3,5 A. A  $t = 0,3$  s, l'éclairement change de niveau d'insolation, il passe de  $1000 \text{ W/m}^2$  à  $300 \text{ W/m}^2$  et, après un régime transitoire court, le courant de panneau est ajusté à sa nouvelle valeur optimale, égale à 1,7 A. Lorsque le niveau d'insolation augmente à nouveau à  $500 \text{ W/m}^2$ , le courant est ajusté à sa nouvelle valeur 2,5 A, après un régime transitoire de 0,08 s.

La variation de la tension du PV est montrée dans figure (IV.16). De la même manière que pour le courant, la tension change également pendant l'accord du contrôleur de P&O. Les valeurs moyennes d'état d'équilibre sont proches des valeurs optimales de tension qui sont de 18 V pour  $1000 \text{ W/m}^2$ , 15 V pour  $300 \text{ W/m}^2$  et 17 V pour  $500 \text{ W/m}^2$ .

La variation de la puissance instantanée du PV est montrée dans figure (IV.17). Les valeurs moyennes de cette forme d'onde sont proches de 60 W pour  $1000 \text{ W/m}^2$ , 17 W pour  $300 \text{ W/m}^2$  et 30 W pour  $500 \text{ W/m}^2$ .

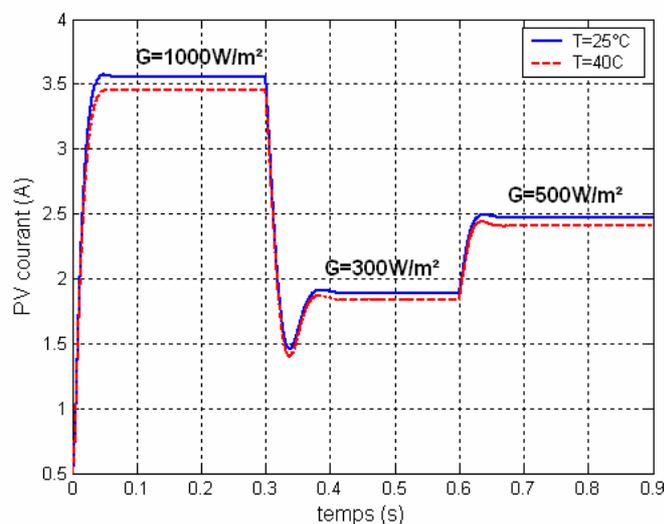


Fig.IV.15 : Variation du courant en fonction de l'éclairement.

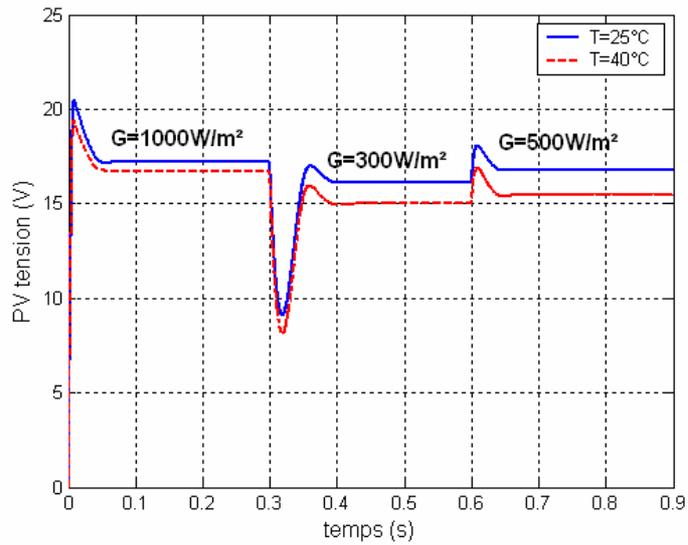


Fig.IV.16: Variation de la tension en fonction de l'éclairement.

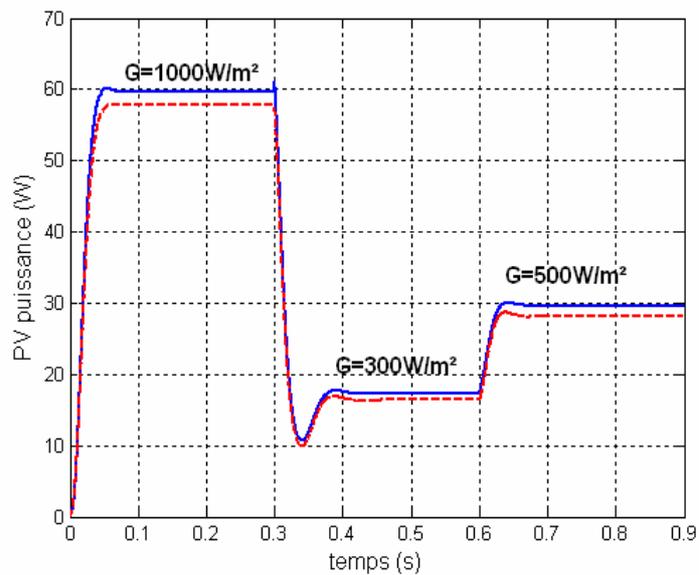


Fig.IV.17 : Variation de la puissance instantanée en fonction de l'éclairement.

#### IV.9-Conclusion

La poursuite du point de puissance maximum (MPPT), et quelques types des méthodes (P&O, INC,...etc) ont été exposé et étudié. Le principe de régulation de recherche du point optimal de fonctionnement, lors des changements brusques de conditions climatiques a été étudié et testé sur un modèle simplifié qui convient bien à une réalisation pratique.

## CONCLUSION GENERALE :

Dans cette thèse, nous avons présenté quelques modèles photovoltaïques existants dans la littérature et montré comment retrouver leurs caractéristiques électriques à base des valeurs nominales (les valeurs données par le fabricant).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet en général. Nous avons exposé un petit historique et avons fourni une explication sur le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Puis nous avons expliqué la variation de l'énergie de bande gap par rapport à la température et les différents types des cellules solaires et aussi l'influence du rayonnement et de la température.

Les caractéristiques des cellules photovoltaïques ( $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $\gamma$ , les associations série, parallèle et mixte des cellules) sur la courbe  $I-V$  et  $P-V$  ont été abordées. Ainsi, nous avons expliqué les caractéristiques principales des cellules photovoltaïques ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût.

Dans le second chapitre, nous avons déterminé les paramètres électriques inconnus ( $I_{ph}$ ,  $I_o$ ,  $R_s$ ,  $\gamma$ ) du modèle à quatre paramètres par la méthode itérative de *bisection* en utilisant seulement les données du fabricant. Mais ces valeurs ne nous donnent pas un bon résultat par rapport à résultat expérimental. Pour cela nous avons été contraints d'utiliser le comportement thermique pour trouver une nouvelle valeur du facteur de qualité  $\gamma$  dans les deux cas du comportement de la résistance série  $R_s$  par rapport à la température (constante et variable).

L'utilisation du comportement thermique donne un résultat presque identique à l'expérimental dans le cas des quelques modèles étudiés.

L'application de la méthode de *bisection* au module photovoltaïque, à savoir le *Cenergy C 167P*, a donné une résistance série négative qui est physiquement inacceptable. Une possibilité serait peut-être de considérer un modèle à cinq paramètres, qui nous avons montré dans le troisième chapitre.

La troisième chapitre explique les étapes pour résoudre le problème de la négativité de la résistance série par l'utilisation du modèle à cinq paramètre avec une et deux exponentielles.

Avec le modèle à une diode à cinq paramètre, nous supposons que la résistance shunt  $R_{sh}$  est finie et nous avons varié le facteur d'idéalité  $\gamma$  de 0.1 jusqu'à 10. Pour obtenir les cinq paramètres inconnus ( $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{ph}$  et  $I_o$ ) pour chaque valeur de  $\gamma$ , nous utilisons seulement les valeurs nominales.

Pour le modèle à deux exponentielles, nous avons supposé la résistance shunt  $R_{sh}$  infini et la valeur du facteur de qualité de la deuxième diode  $\gamma_1$  égale à l'unité. Nous avons varié le

facteur d'idéalité  $\gamma_2$  de 0.1 jusqu'à 10 pour obtenir les cinq paramètres inconnus ( $I_{ph}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $R_s$ ), nous utilisons seulement les valeurs nominales. La méthode itérative utilisée de cette étude est de la méthode de *Newton-Raphson*.

Nous remarquons qu'il est possible de simuler ce modèle de cellule solaire à cinq paramètres, mais la solution trouvée n'est pas unique.

Toutefois et d'après nos calculs, les données du fabricant ne sont pas toujours suffisantes pour mieux cerner le problème de la modélisation des cellules photovoltaïques et les valeurs calculées sont souvent éloignées de celles espérées et expérimentales. Pour cela il est utile de rappeler que d'autres paramètres, souvent empiriques, sont souhaités pour simuler d'une façon idéale les différents modèles de la cellule photovoltaïque.

L'instabilité des éclairagements pendant une même journée nous oblige à réfléchir au suiveur automatique du soleil (à base de photo-résistances par exemple), pour optimiser l'éclairage et stabiliser le point de fonctionnement maximal de puissance.

Dans le quatrième chapitre, la poursuite du point de puissance maximum (MPPT), et quelques types des méthodes (P&O, INC,...etc) ont été exposé et étudié. Le principe de régulation de recherche du point optimal de fonctionnement, lors des changements brusques de conditions climatiques a été étudié et testé sur un modèle simplifié qui convient bien à une réalisation pratique.

**Méthode de Newton-Raphson :**

Supposons qu'on veut résoudre un système d'équations non linéaire :

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Sous forme vectorielle, le système (A.1) s'écrit :

$$F(x) = 0 \quad (\text{A.2})$$

Où :

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad F(X) = \begin{pmatrix} f_1(X) \\ f_2(X) \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n(X) \end{pmatrix}$$

La méthode de *Newton-Raphson* consiste à créer une suite de vecteurs  $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(k)}$ , tels que :

$$X^{(k)} = X^{(k-1)} - J^{-1}(X^{(k-1)})F(X^{(k-1)}) \quad (\text{A.3})$$

Où  $J^{-1}(X^{(k-1)})$  est la matrice inverse de la matrice jacobienne :

$$J^{-1}(X^{(k-1)}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(X^{(k-1)})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(X^{(k-1)})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(X^{(k-1)})}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(X^{(k-1)})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(X^{(k-1)})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(X^{(k-1)})}{\partial x_n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial f_n(X^{(k-1)})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(X^{(k-1)})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(X^{(k-1)})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Cette suite, si elle converge, tend vers un vecteur solution du système (A.1).

Les coefficients  $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(X^{(k-1)})$  de la matrice  $J$  peuvent être calculés numériquement par l'introduction d'une petite perturbation  $\varepsilon$  (choisie) de la variable suivant la dérivée partielle considérée. La dérivée partielle de la fonction  $f_i(X^{(k-1)})$  suivant la variable  $x_j$  sera donc :

$$\Delta F_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(X^{(k-1)})$$

Pour  $\varepsilon$  petit. La matrice jacobienne  $J(X^{(k-1)})$  est ainsi remplacée par une matrice  $\Delta F(X^{(k-1)})$  dont les coefficients sont les  $\Delta F_{ij}$ .

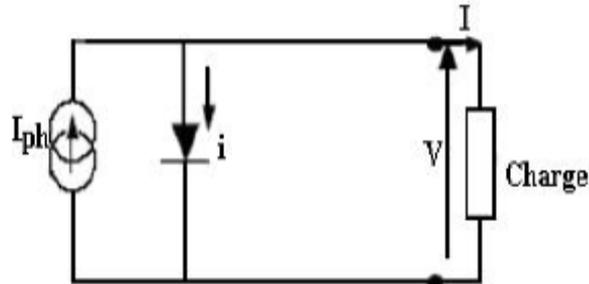
Posons  $\Delta X^{(k)} = X^{(k)} - X^{(k-1)}$ . Alors l'équation (A.3) devient

$$J(X^{(k-1)}) \Delta X^{(k)} = -F(X^{(k-1)}) \quad (\text{A.5})$$

Le système d'équations algébriques (A.5) est linéaire, se résout par les méthodes classiques.

### La cellule photovoltaïque idéale :

Le modèle le plus simple d'une cellule photovoltaïque est montré comme équivalent au circuit ci-dessous qui se compose d'une source de courant idéale en parallèle à une diode idéale, figure A.1.



**Fig.A.1. Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque idéale.**

Après l'application de la loi de *Kirchoff* sur le circuit équivalent représenté sur la figure (A.1) ; l'équation de I-V décrivant ce circuit est :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (\text{A.6})$$

$I_{ph}$  : Le courant photonique.

$I_0$  : Le courant de saturation.

$q$  : La charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ),

$k$  : Constant de *Boltzmann* ( $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/k}$ ).

$T$  : La température de jonction.

Nous avons utilisé les données fournies par le fabricant aux conditions standard, pour déterminer la valeur du courant de saturation  $I_0$ .

➤ Pour la tension de circuit ouvert :  $I = 0, V = V_{oc}$

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{A.7})$$

➤ Pour le courant de court circuit :  $I = I_{sc}, V = 0$

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (\text{A.8})$$

Dans l'équation (A.8), nous remarquons que le courant de court circuit égale le courant photonique. Alors l'équation (A.6) devient

$$0 = I_{sc} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{A.9})$$

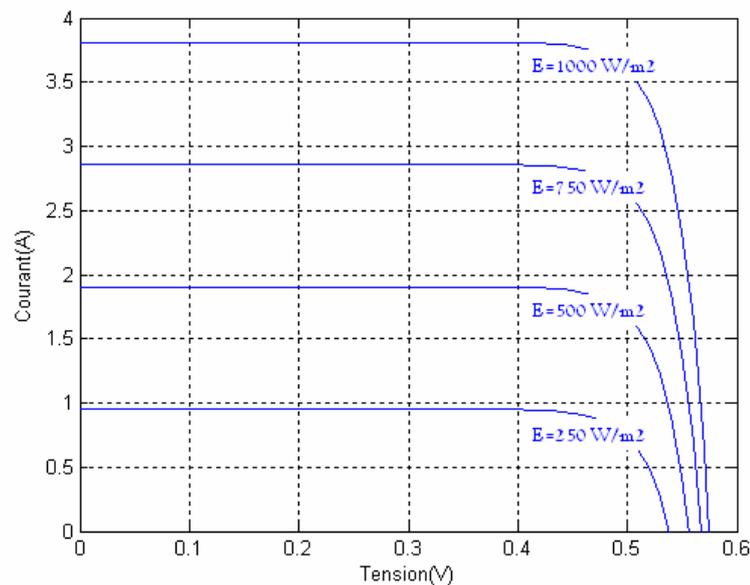
Qui donne

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left(e^{qV_{oc}/kT} - 1\right)} \quad (\text{A.10})$$

Ainsi, si la valeur du courant de court circuit  $I_{sc}$ , est connue (donnée par le fabricant), dans les conditions standard, ( $E=1000\text{W/m}^2$ , AM 1.5,  $T=25^\circ\text{C}$ ), alors le courant photonique à n'importe quel autre rayonnement ( $E_0 [\text{W/m}^2]$ ), est donné par :

$$I_{sc}|_E = \left(\frac{E}{E_0}\right) I_{sc}|_{E_0} \quad (\text{A.11})$$

La figure A.2 montre la courbe  $I$ - $V$  de la cellule photovoltaïque (Solarex MSX60) pour différents rayonnements et à température constante ( $T=25^\circ\text{C}$ ).



**Fig.A.2. Courbe  $I$ - $V$  de la cellule photovoltaïque pour différents rayonnements ( $T=25^\circ\text{C}$ ).**

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [01] Fatima Abdo, "Croissance de couche minces de silicium par épitaxie en phase liquide".  
Thèse de Doctorat, N° d'ordre -ISAL-0015. Université de Lyon France, 2007.
- [02] Messaoud Makhoulf." Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque, application au pompage". Thèse magistère, université mentouri de Constantine, Algérie, 2006.
- [03] Christophe Ménézo et al. "Projet de recherche intègre 6.2, Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques- thermiques au bâti". Rapport final, France, 2004.
- [04] Corinne Alonso." Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie".  
Thèse de HDR; Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2003.
- [05] Jean-Pierre Charles, Ahmed Haddi, Alain Maouad, Hazri Bakhtiar, Abdellatif Zerga, Alain Hoffmann, Pierre Mialhe." La Jonction, du Solaire à la Microélectronique". Revue des Energies Renouvelables, Vol.3 , 2000.
- [06] Kwan Chi Kao." Dielectric phenomena in solids, With Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes". Elsevier, 2004.
- [07] S.M. SZE, Kwok K. Ng, Physics of Semiconductor Devices, Third Edition, WILEY international edition, 2006.
- [08] Y. P.Varshni. "Temperature dependence of the energy gap in semiconductors". Physica, vol. 34, pp. 149–154, 1967.
- [09] Tom markvart and Luis castafier. "Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications". elsevier advanced technology, 2003.
- [10] Nichiporuk Oleksiy." Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités". Thèse de Doctorat, N° d'ordre ISAL0028. Université de Lyon, France, 2005.
- [11] Malika Madani." Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces". Thèse de magister, Université de Tlemcen, Algérie, 2006.
- [12] Mimoun Oukachmih." Les Cellules Photovoltaïques A Base De Matériaux Organiques Discotiques". Thèse de Doctorat, Université Paul SABATIER, Toulouse, 2003.
- [13] Maouedj Rachid." Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de tlemcen et de bouzareah". Thèse de Magister. Université de Tlemcen, Algérie, 2005.
- [14] Townsend, Timothy U. "A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems". M. S. Thesis – Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.

- [15] Eckstein, Jurgen Helmut. "Detailed Modeling of Photovoltaic Components". M. S. Thesis—Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1990.
- [16] Fry, Bryan. "Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems". M.S. Thesis, Mechanical Engineering, U. of Wisconsin-Madison, 1998.
- [17] Ibrahim A Al-Busaidi. "Economics of Photovoltaic Water Pumping System in Sultanate of Oman". Bachelor of Engineering (Instrumentation & Control). University of Southern Queensland, 2005.
- [18] Achour Betka. "Perspectives for the sake of photovoltaic pumping development in the south". Thèse de Doctorat, Electrical Engineering. University of Batna, Algeria, 2005.
- [19] Walker, Geoff R. "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model" Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC '00, Brisbane, 2000.
- [20] Matagne E., Chenni R, El Bachtiri R. "A photovoltaic cell model based on nominal data Only". Proceedings of the international conference on power Engineering Energy and Electrical Drives-Powereng , Setubal, Portugal, 12-14 April, ISBN: 1-4244-0895-4, pp. 562-565, 2007.
- [21] M. Wolf, G.T. Noel and R.J. Stirn. "Investigation of the Double Exponential in the Current-Voltage Characteristics of Silicon Solar Cells". IEEE Transactions on electron Devices, 1977.
- [22] Duffie, John A. and William A. Beckman. "Solar Engineering of Thermal Processes". New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [23] R. Chenni, M. Makhoulf, T. kerbache, A. Bouzid. "A detailed modelling method for photovoltaic cells". Solar Energy; 32: 1724-1730. 2007.
- [24] <http://www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/INDEX.HTM>.
- [25] De Soto, W. "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance". M.S. Thesis, Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 2004.
- [26] S. Rachedi, K. Ghaffour. "Analyse des caractéristiques I-V des jonctions PN à base de SiC". Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC, 2005.
- [27] Mustapha Belarbi. "Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque". Thèse de Magister. Université D'Oran, Algérie, 2006.
- [28] De Soto W, Klein SA, Beckman WA. "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance". Solar Energy;80:78–88, 2006.
- [29] A. Moussi, A. Torki. "An improved efficiency permanent magnet brushless DC motor PV pumping system". LARHYSS Journal, N°.01, 2002.

- [30] W.C. Benmoussa, S. Amara, A. Zerga.'' Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin''. Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 301 – 306, Tlemcen, 2007.
- [31] J. A. Gow, C. D. Manning.'' Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies''. IEE proceedings on Electric Power Applications, vol. 146, n°2, pp. 193-200, 1999.
- [32] P. H. Nguyen, C. Michel, J. Bottin.'' Etude de la conversion photovoltaïque : effets des résistances parasites des photopiles''. Revue de physique Appliquée 18 :775-779, 1983.
- [33] Q. Caprasse, E. Matagne. '' Un Modèle de Cellule Photovoltaïque à Double Exponentielle Etabli sur Base des Valeurs Nominales''. Fifth International Conference on Electrical Engineering CEE'08, Batna, Algeria. p. 528-532, 2008.
- [34] M. Rekinge. E. Matagne. R. El Bachtiri & R. Chenni.'' un modèle de cellule photovoltaïque avec effet thermique établi sur base des valeurs nominales.'' Conférence EF 2007, Toulouse, 2007.
- [35] André Mermoud.'' Conception et Dimensionnement de Systèmes Photovoltaïques : Introduction des Modules PV en couches minces dans le logiciel PVsyst'', université de Genève, 2005.
- [36] M. Salhi, R. El Bachtiri, E. Matagne.'' Etude comparative entre deux commandes pour la poursuite du point à puissance maximale d'un système photovoltaïque alimentant une batterie''. In : Journées de l'Electrotechnique du futur – EF'2007, Toulouse, France, 2007.
- [37] Akihiro Oi.'' Design and simulation of photovoltaic water pumping system''. Master of Science in Electrical Engineering. California Polytechnic State University, 2005.
- [38] Yun Tiam Tan.''impact on the power system with a large penetration of photovoltaic generation''. PhD Thesis submitted to The University of Manchester Institute of Science and Technology, 2004.
- [39] Geoffrey R. Walker, Paul C. Sernia.'' Cascaded DC–DC Converter Connection of Photovoltaic Modules''. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, N° 4, 2004.
- [40] Ying-Tung Hsiao, China-Hong Chen.'' Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power System''. 37th IAS Annual Meeting. Vol 2; p1035 – 1040, 2002.
- [41] V. Salas, et al.'' New algorithm using only one variable measurement applied to a maximum power point tracker''. Solar Energy Materials & Solar Cells 87, p. 675–684, 2005.
- [42] A.D. Karlis, et al. ''A novel maximum power point tracking method for PV systems using fuzzy cognitive networks (FCN)''. Electric Power Systems Research 77; p. 315–327, 2007.

- [43] Xuejun Liu, et al. "An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Arrays". 35<sup>th</sup> Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Germany, 2004.
- [44] T.Tafticht, K.Agbossou." Développement d'une méthode MPPT pour les systèmes photovoltaïques"Electric and Computer Engineering, Vol 2; P1123-1126, Canada, 2004.
- [45] K.H. Hussein, et al." Maximum photovoltaic power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions". IEE, Proc-Gener. Transm. Distrib, Vol 142, N°1, 1995.
- [46] Tyson DenHerder." Design and simulation of photovoltaic super system using simulink". Senior Project, California Polytechnic State University, 2006.
- [47] Abdelhak Aziz." Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire". Thèse Doctorat, Université Toulouse III, 2006.

## Résumé

Nous montrons dans ce travail comment obtenir un modèle de cellule solaire comportant quatre et cinq paramètres, en utilisant comme données, les valeurs nominales fournies par le fabricant : tension à vide, courant de court circuit, tension et courant correspondants au point à puissance nominale, ainsi que les coefficients de température de tension à vide, de courant de court circuit et de la puissance maximale. La résolution de systèmes d'équations non linéaire est obtenue par les méthodes itératives (*bisection* et *Newton\_Raphson*). Après l'étude du modèle à quatre paramètres, nous avons obtenu une résistance série négative pour quelques modules photovoltaïques étudiés, cela enlève toute signification physique au modèle.

Après l'étude du modèle à cinq paramètres, nous remarquons qu'il est possible de simuler ce modèle, mais la solution trouvée n'est pas unique.

Enfin, La poursuite du point de puissance maximum (MPPT), et quelques types des méthodes (P&O, INC,... etc) ont été exposés et étudiés.

## Mots clés

Cellule solaire, modèle, module photovoltaïque, modèle à quatre paramètres, point de puissance maximale. MPPT.

## **Abstract**

We show in this work how to obtain a four and five parameters model of solar cell using as data only nominal values supplied by the manufacturer: open circuit voltage, short circuit current, voltage and current corresponding to the peak power. As well as the temperature coefficients of open circuit voltage, short circuit current and maximum power. The resolution of systems of nonlinear equations is to obtain by the iterative methods (*bisection* and *Newton\_Raphson*). After the study of the model with four parameters, we obtained a resistance negative series for some studied modules photovoltaic that removes any physical significance with the model.

After the study of model to five parameters, one notice that it is possible to simulate this model, but the solution that found is not single.

Lastly, the maximum power point tracker (MPPT), and some types of methods (P&O, Inc... etc) were exposed and studied.

## **Key Words**

Solar cell, model, photovoltaic module, four parameters model, maximum power point, MPPT

## ملخص:

في هذا العمل أظهرنا كيف نتحصل على نموذج لخلية شمسية يحتوي على أربعة و خمسة عناصر، استخدمنا فقط المعطيات المقدمة من طرف المصنع: فرق الكمون للدائرة المفتوحة، تيار الدائرة القصيرة، التيار و فرق الكمون الموافقان للاستطاعة القصوى، كذلك معامل الحرارة لفرق كمون الدائرة المفتوحة، لتيار الدائرة القصيرة و الاستطاعة القصوى. حل مجموعة المعادلات الغير خطية يتم بالطرق التكرارية (طريقة المقاطع و طريقة نيوتن-رافسن). بعد دراسة النموذج ذي الأربع عناصر، تحصلنا على مقاومة على التسلسل سالبة لبعض الألواح الفوتوفلطائية المدروسة مما يزيل كل مفهوم فيزيائي للنموذج. بعد دراسة النموذج ذي الخمسة عناصر، نلاحظ انه من الممكن محاكاة هذا النموذج، لكن الحل المتحصل عليه ليس وحيدا.

أخيرا، تقنية متابعة نقاط الاستطاعات الاعظمية (MPPT)، و بعض الطرق (P&O، Inc...الخ) تم عرضها و دراستها.

## كلمات مفتاحية:

خلية شمسية, نموذج, لوح, نقطة الاستطاعات الاعظمية MPPT