

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique  
*Ecole Nationale Polytechnique*



وزارة التعليم العالي  
و البحث العلمي  
المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات

**Département *Électronique***  
***Mémoire de Master en Électronique***

*Présenté par :*

***BOUZOUINA Sid-Ahmed Yacine***

***Intitulé***

***Modélisation de cellules solaires***

**Proposé et dirigé par :**

**Pr. : M. HADDADI (ENP)**

**M : M.KHERCHI (CDER)**

***Promotion : 2014***

***Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach***

***16200 Alger. Algérie***

***Tel : 213 21 52 53 01/03 – Fax : 213 21 59 7973***

\_\_\_\_\_:

بعد توضيح المبادئ الأساسية المتعلقة بالتحويلات الكهروضوئية قمنا بوضع المعادلات الرياضية لمختلف أنواع المحولات الكهروضوئية  
الكلمات المفتاحية : الخلايا الشمسية

### Résumé

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

**Mots clés :** cellules solaires

### Abstract:

After a brief description of the basic principles related to photovoltaic (PV) conversion, we present different models of photovoltaic generator existing in literature. These models are studied in standard illumination and temperature conditions ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ).

**Key words :** solar cell

# *Remerciements*

*Au terme de ce travail*

*J'adresse mes remerciements à Monsieur Mourad HADDADI Professeur à l'École Nationale Polytechnique et Monsieur. Mohamed KHERCHI, Attaché de Recherche Division Énergie solaire Photovoltaïque - CDER, et Monsieur Cherif LARBES Professeur à l'École Nationale Polytechnique pour l'appui scientifique et pour leur disponibilité durant la préparation de mon projet de fin d'études ainsi que pour tout le savoir qu'on m'a transmis.*

*Je tiens également à remercier Monsieur A. BELOUHRANI professeur à l'École Nationale Polytechnique, de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

*Je tiens à remercier Mr A.Elhamid LOUKRIZ doctorant à l'École Nationale Polytechnique pour son aide pendant notre réalisation ainsi que Mr Ahmed BENYAHIA ingénieur de Labo d'Electronique et tous les enseignants de l'École Nationale Polytechnique spécialement ceux du département d'Électronique, pour leur encadrement tout au long de notre formation.*

# *Dédicaces*

*Au terme de ce travail*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents à qui je dois mon parcours jusqu'à présent ; ce travail n'est que l'aboutissement de leurs efforts et leur contribution.*

*A mes chers frères et sœurs et leurs petites familles à qui je souhaite beaucoup plus de succès, sans oublier mes très chers amis.*

*Et à toute la promotion des électroniciens 2014*

# Tables des figures

---

Figure 1.1 : Le système terre-soleil.....	5
Figure 1.2 : Trajectoire apparente du soleil.....	5
Figure 1.3 : Potentiel des sources d'énergies renouvelables.....	6
Figure 1.4 : Types de rayonnement solaire.....	6
Figure 1.5 : Rayonnement solaire sur notre planète.....	7
Figure 1.6 : Gisement solaire en Algérie.....	7
Figure 1.7 : Technologie des cellules Photovoltaïque.....	8
Figure 1.8 : Processus de fabrication des cellules Photovoltaïques <i>au silicium</i> .....	9
Figure 1.9 : Composition d'un module photovoltaïque.....	10
Figure 2.1: Circuit équivalent selon le modèle à deux paramètres.....	13
Figure 2.2: Circuit équivalent selon modèle analytique à cinq paramètres.....	17
Figure 2.3: Circuit équivalent du modèle à deux exponentielles.....	23

# Modélisation de cellules solaires

## Table des matières

<b>Chapitre 1 L'électricité photovoltaïque</b> .....	2
1. L'électricité photovoltaïque : le point de la situation.....	4
1.1 Introduction .....	4
1.2 Gisement solaire .....	5
1.2.1 Le système terre-soleil.....	5
1.2.2 Trajectoire apparente du soleil.....	5
1.2.3 Energie renouvelable : .....	6
1.2.4 Rayonnement solaire sur notre planète .....	6
1.2.5 Evaluation du potentiel énergétique solaire en Algérie .....	7
1.3.3 Technologie des cellules Photovoltaïque .....	7
1.3.4 Comparaison entre les Différente Technologie des Module PV.....	.8
1.3.6 Le Module Photovoltaïque.....	8
<b>CHAPITRE 2 Présentation des différents modèles du générateur photovoltaïque</b> .....	<b>11</b>
2.1 Introduction .....	12
2.2 Différents modèles .....	12
2.2.1 Modèle explicite.....	12
2.2.2 Modèle à deux paramètres .....	13
2.2.3 Modèle à cinq paramètres.....	17
2.2.4 Modèle d'Appelbaum.....	19
2.2.5 Modèle simplifié.....	20
2.2.6 Modèle d'Akbaba.....	21
2.2.7 Modèle à deux exponentielles .....	23
2.2.8 Modèle à quatre paramètres.....	26
Conclusion.....	27
Référence bibliographique	28

# Chapitre 1 :

## L'électricité photovoltaïque

## Modélisation de cellules solaires

### INTRODUCTION :

En Algérie et partout dans le monde la consommation en énergie électrique est en très forte croissance. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés.

On parle périodiquement de diverses solutions techniques permettant de garder ce rythme de vie ; ça d'une part, d'autre part l'épuisement des ressources fossiles plus ou moins à long terme, la flambée des prix du brut, et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...).

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante : La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque. Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution. En effet, on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme : Villages, maisons isolées (un tiers de la population mondiale n'a pas accès à l'énergie électrique).

- \_ Relais de communication,
- \_ Pompage de l'eau
- \_ Refuges,
- \_ ...

## Modélisation de cellules solaires

Le Soleil envoie chaque année à la surface de la Terre à peu près 10 000 fois plus d'énergie que la planète en consomme. Il est donc légitime d'essayer d'en tirer profit.

L'Algérie est un pays continent qui dispose de sources potentielles importantes en matière d'énergies renouvelables, même si leur contribution ne représente, pour le moment, pas plus de 2% de l'ensemble de la production électrique nationale. Désormais, le soleil est une nouvelle priorité énergétique. Il ne devrait plus se coucher, puisque notre gouvernement entend s'investir pleinement dans les énergies renouvelables. Ainsi une nouvelle ligne stratégique du secteur, dont la boussole est

résolument tournée, cette fois-ci, vers le soleil. Un nouveau programme de développement sur ce secteur, se résumant à une soixantaine de projets (en grande majorité solaire), avec comme objectif,

à l'horizon 2020, la production d'électricité de l'ordre de 3.000MW et une couverture de 40% des besoins d'électricité du pays en 2030[1].

### 1. L'électricité photovoltaïque : le point de la situation

#### 1.1 Introduction

Les besoins d'énergie électrique en Algérie connaissent une tendance haussière, qui est due à l'augmentation de l'activité économique et à la croissance de la population. Ces besoins énergétiques, qui sont essentiellement satisfaits par la combustion du gaz naturel et du fuel, imposent l'augmentation significative de l'offre d'hydrocarbures, afin d'assurer l'approvisionnement national tout en maintenant les parts à l'exportation, qui constitue la principale source en devises du pays.

Cependant, il faut noter qu'à long terme, une augmentation significative de la production de l'énergie fossile non renouvelable en Algérie est caractérisée par l'incertitude « Parce que les perspectives ne sont pas bonnes, et que les recherches de nouveaux gisements de ces précieux éléments nécessitent des investissements colossaux, parfois sans résultats probants », et que la poursuite des tendances de consommation actuelle est incompatible avec un développement durable. Afin d'assurer un tel développement, l'Algérie se doit de regarder d'autres solutions lui permettant de préserver ses énergies fossiles.

La génération photoélectrique est un axe important pour la préservation de nos ressources fossiles et la création de la valeur ajoutée.

# Modélisation de cellules solaires

## 1.2 Gisement solaire

### 1.2.1 Le système terre-soleil

Le soleil est une sphère de matière gazeuse, composée principalement d'hydrogène et d'hélium, dont le diamètre atteint environ 1.4million de km. La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Sa distance moyenne est de 149.6 millions de km, avec une variation de  $\pm 1.7\%$ . La terre traverse le grand axe de l'ellipse le 2 janvier (position la plus proche) et le 2 juillet (la plus éloignée du soleil) [1]

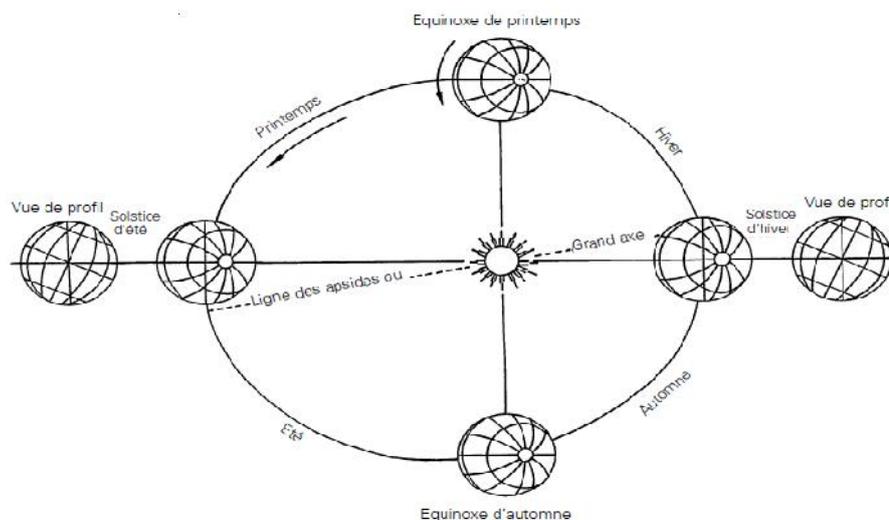


Figure 1.1 : Le système terre-soleil.

### 1.2.2 Trajectoire apparente du soleil

Toute application solaire nécessite la connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre, caractérisé par sa latitude et sa longitude.

La position du soleil est définie par deux angles : sa hauteur angulaire et son azimut. [2]

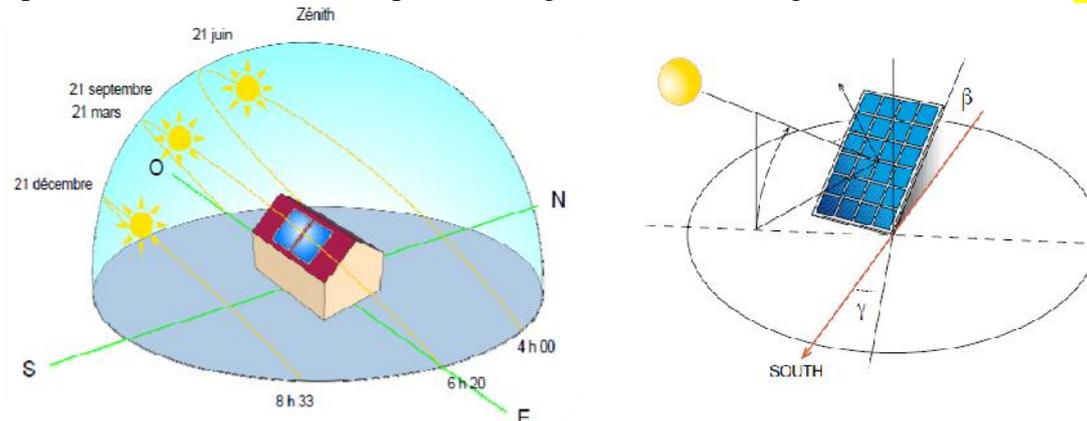


Figure 1.2 : Trajectoire apparente du soleil

## Modélisation de cellules solaires

### 1.2.3 Energie renouvelable :

L'énergie du soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaire : Les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (2 protons + 2 neutrons). Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil. Cette énergie lumineuse a été évaluée par la NASA et vaut ( $1367 \text{ W/m}^2$  hors atmosphère terrestre).

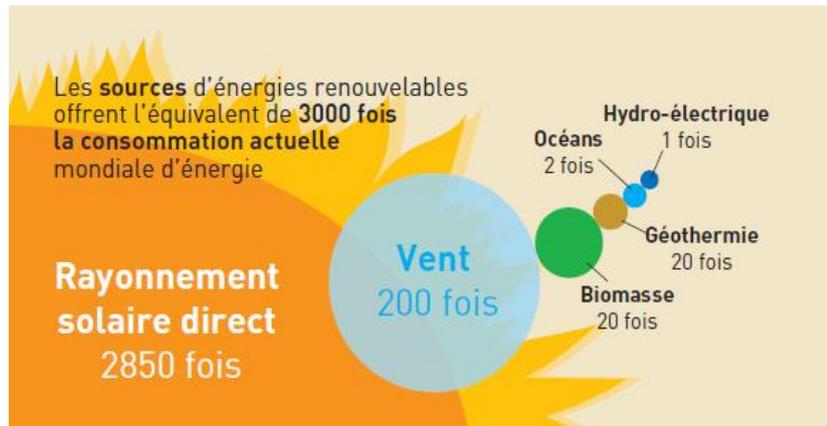


Figure 1.3 : Potentiel des sources d'énergies renouvelables

### 1.2.4 Rayonnement solaire sur notre planète

Le flux lumineux reçu au niveau du sol à un instant donné dépend d'un grand nombre de paramètres tel que : [2]

- Les caractéristiques physicochimiques des gaz présent dans l'atmosphère, la présence des nuages, la valeur de l'albédo, la température ambiante, la vitesse et la direction des vents et l'humidité relative.

Par ailleurs ces paramètres varient en fonction du site géographique, de la saison, de l'heure de la journée, des conditions météorologiques instantanées ...

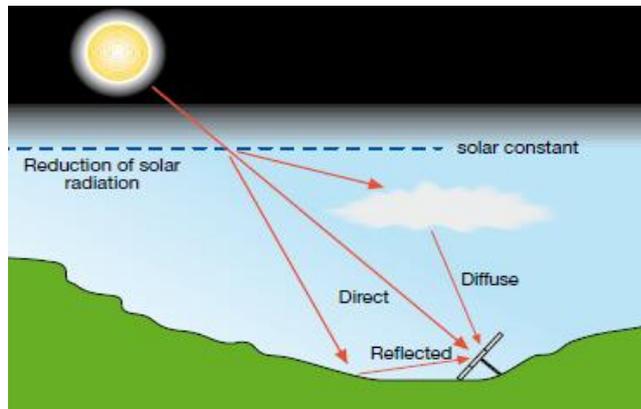


Figure 1.4 : Types de rayonnement solaire

Les scientifiques, en particulier les climatologues, élaborent des modèles mathématiques, cependant le moyen le plus sûr pour disposer de données fiables est

## Modélisation de cellules solaires

encore de recourir à des statistiques accumulées sur les années antérieures grâce à des instruments de mesure.

Des cartes météorologiques existent, nous renseignent sur l'irradiation moyenne horaire, journalière, mensuelle et annuelle pour différents lieux géographique.

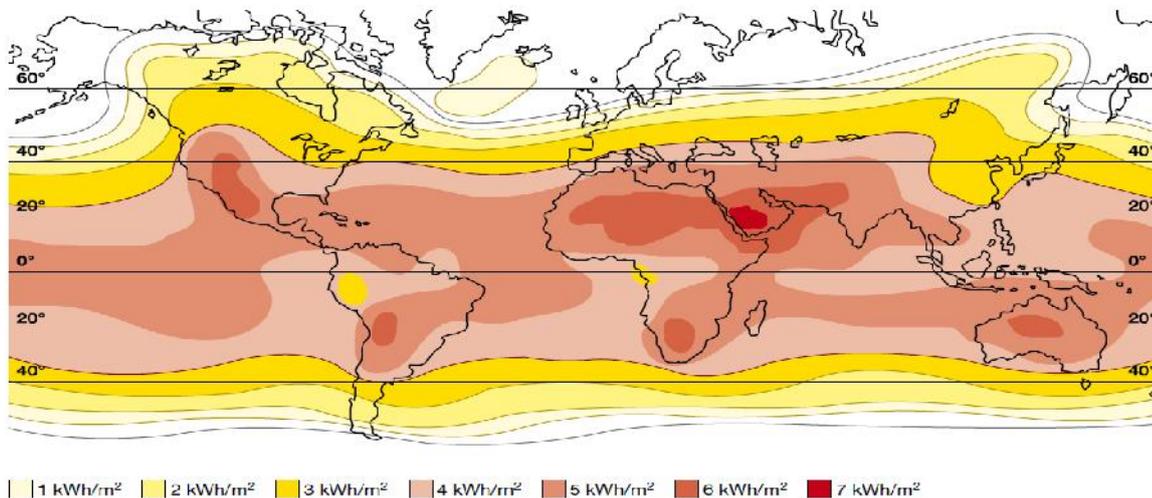


Figure 1.5 : Rayonnement solaire sur notre planète

### 1.2.5 Evaluation du potentiel énergétique solaire en Algérie

L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important du bassin méditerranéen.

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh / an. [3]

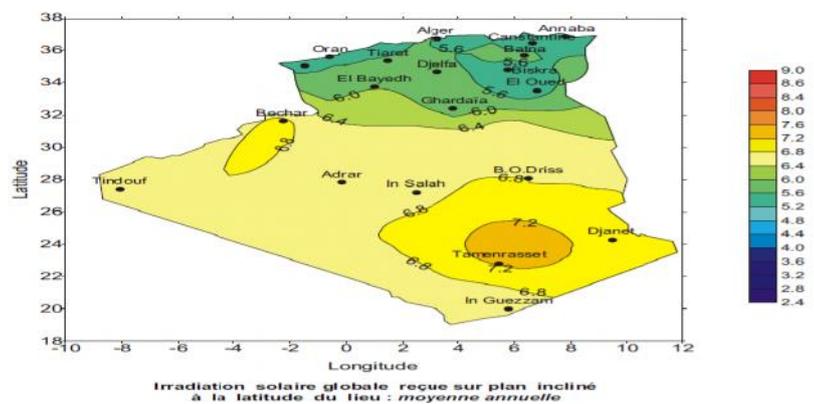


Figure 1.6 : Gisement solaire en Algérie

### 1.3.3 Technologie des cellules Photovoltaïque

Il existe un grand nombre de technologies industrialisées mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et de développement.

Les principales technologies disponibles sur le marché sont :

## Modélisation de cellules solaires

- Le Silicium Cristallin (*Crystalline silicon*)
- Les Couches minces (*Thin film*).

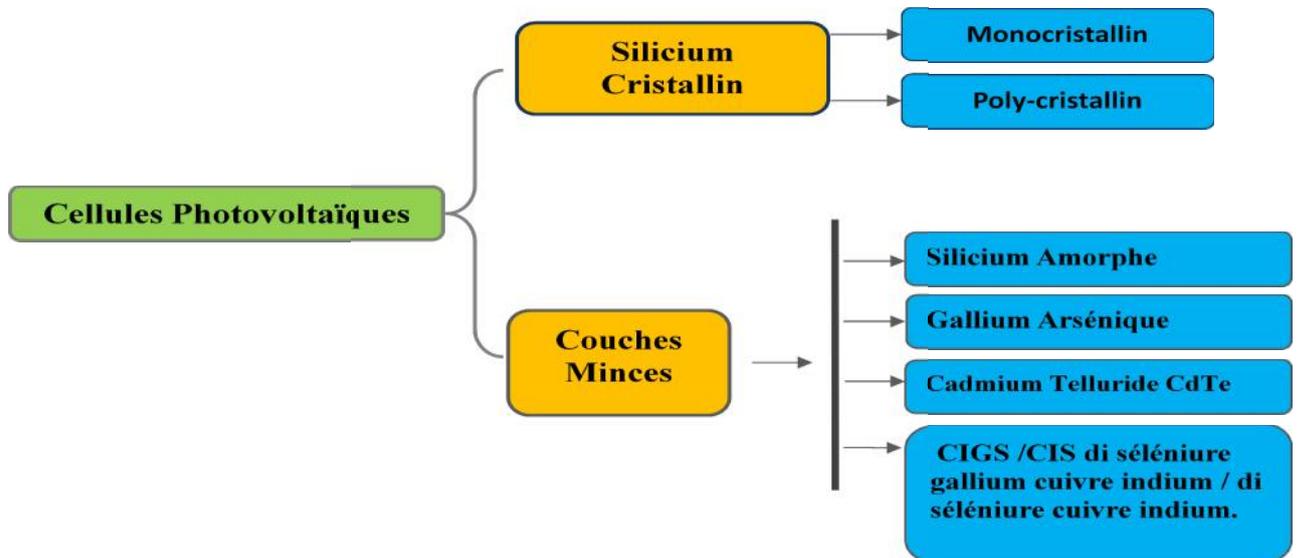


Figure 1.7 : Technologie des cellules Photovoltaïque

### 1.3.4 Comparaison entre les Différente Technologie des Module PV

Chaque technologie possède ses avantages et ses inconvénients: rendements, coûts de production, disponibilité des matières premières, difficultés d'industrialisation, durée de vie. La technologie à base de silicium cristallin domine actuellement le marché avec plus de 90% des ventes, il est impossible de prévoir lesquelles de ces technologies s'imposeront dans le futur.

### 1.3.5 Processus de fabrication des cellules Photovoltaïques *au silicium*

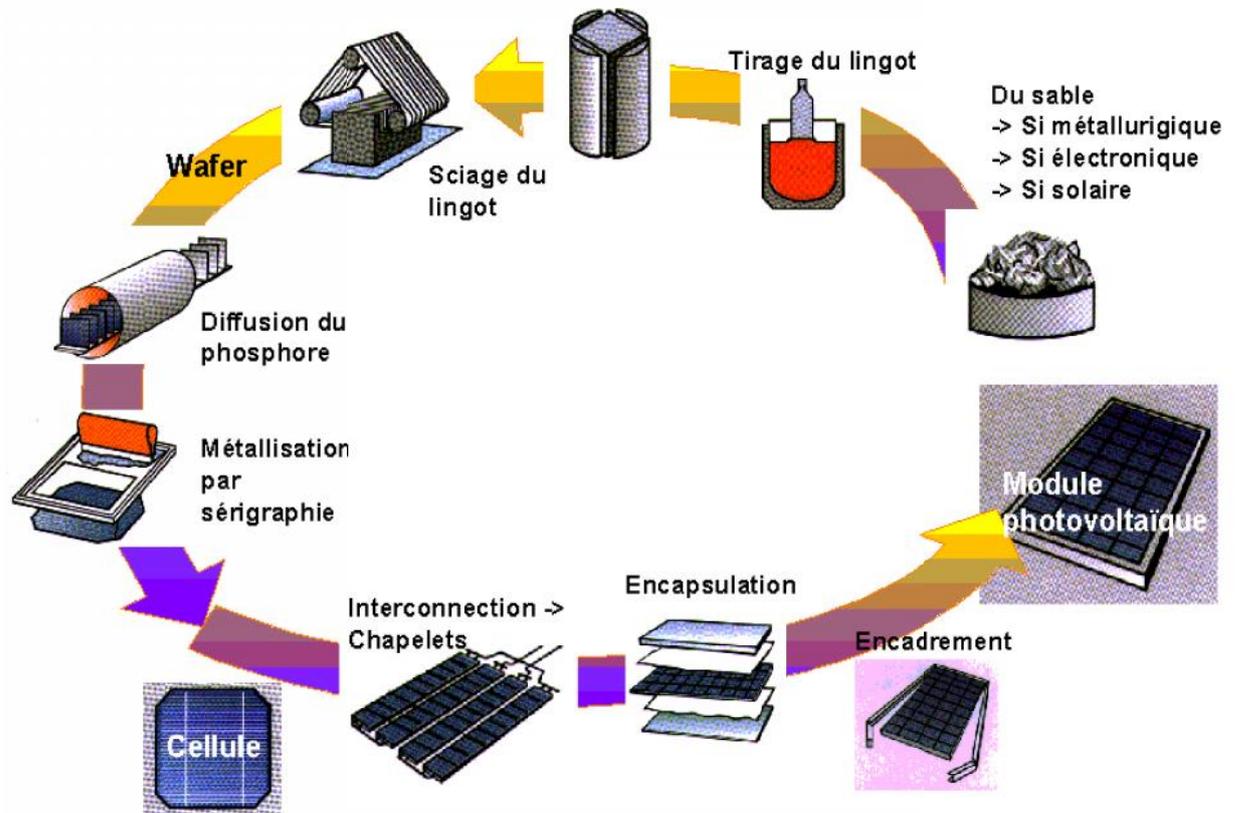


Figure 1.8 : Processus de fabrication des cellules Photovoltaïques *au silicium*

### 1.3.6 Le Module Photovoltaïque

Le « Module » photovoltaïque (*Module PV*) est par définition un ensemble de cellules PV associé en série et/ou en parallèle. Pour générer un courant électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. Les cellules photovoltaïques se trouvent sur la face avant du module, tandis que la face arrière est munie d'une boîte de raccordement pour recevoir les liaisons de sortie.

Le niveau de protection des boîtes de raccordement est généralement un IP55.

L'encapsulation est l'un des facteurs influant l'espérance de vie d'un module PV.

## Modélisation de cellules solaires

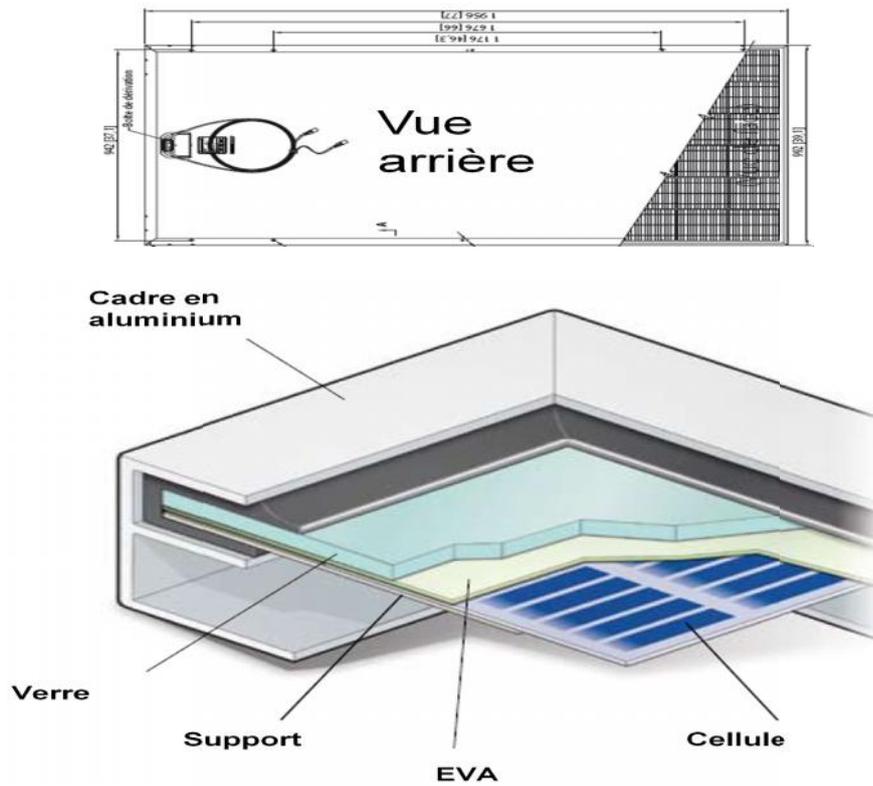


Figure 1.9 : Composition d'un module photovoltaïque

# CHAPITRE 2

## Présentation des différents modèles du générateur photovoltaïque

## Modélisation de cellules solaires

### 2.1 Introduction

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Dans ce chapitre, nous présenterons les principaux modèles du générateur photovoltaïque, existants.

### 2.2 Différents modèles

#### 2.2.1 Modèle explicite

Ce modèle nécessite les données de quatre paramètres à savoir le courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ), la tension à circuit ouvert ( $V_{OC}$ ), le courant maximal ( $I_m$ ) et la tension maximale ( $V_m$ ) [4]. La relation entre le courant  $I$  et la tension  $V$  est donnée par :

$$I = I_{SC} \left[ 1 - C_1 \left( \exp \left( \frac{V}{C_2 V_{OC}} \right) - 1 \right) \right] \quad (2.1)$$

avec :

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{SC}} \right) \exp \left( \frac{-V_m}{C_2 V_{OC}} \right) \quad (2.2)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{OC}} - 1}{\ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{SC}} \right)} \quad (2.3)$$

Les constantes  $C_1$  et  $C_2$  sont évalués au début de l'itération, tandis que l'équation (2.1) est évaluée à chaque pas d'itération.

## Modélisation de cellules solaires

### 2.2 2 Modèle à deux paramètres

Ce modèle suppose que la résistance shunt est très grande. Le circuit équivalent est le suivant [5,6] :

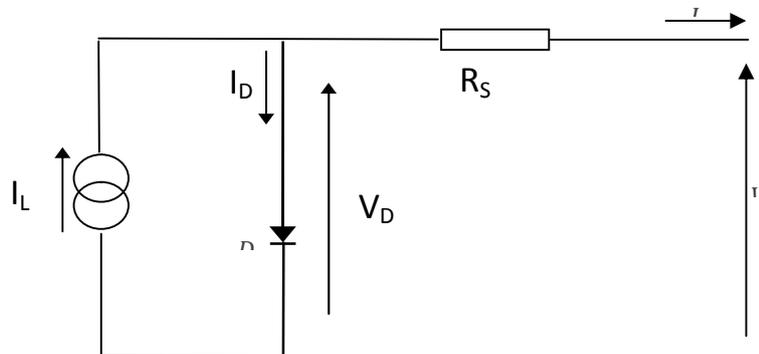


Figure 2.1: Circuit équivalent selon le modèle à deux paramètres

$I$  et  $V$  sont respectivement le courant et la tension aux bornes du générateur photovoltaïque.

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_L = I_D + I \quad (2.4)$$

Le courant de diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

On remplace l'expression de  $I_D$  dans (2.4):

## Modélisation de cellules solaires

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

avec :

$I_L$  : Courant photogénéré par le générateur sous éclairage (A)

$I_0$  : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A)

$R_S$  : Résistance série du générateur ( )

$m$  : Facteur d'idéalité

$k$  : Constante de Boltzmann ( $1,3810^{-23}$  J/°K)

$T$  : Température absolue (°K)

L'équation (2.6) est implicite avec plusieurs inconnues ( $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_S$ ,  $m$ ).

Les deux paramètres de ce modèle sont le courant maximal ( $I_m$ ) et la résistance série ( $R_S$ ). Ils sont déterminés à partir du courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ), de la tension à circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) et de la puissance maximale ( $P_m$ ).

Ce modèle se base sur les simplifications suivantes :

$$\exp\frac{qV}{mkT} \gg 1 ; \quad I_L = I_{SC}$$

$$\text{Si on pose. } \alpha = \frac{mkT}{q}.$$

L'expression de I-V devient :

## Modélisation de cellules solaires

$$I = I_{SC} \left[ 1 - \left( \frac{I_0}{I_{SC}} \right) \exp \left( \frac{(V + R_S I)}{\langle} \right) \right] \quad (2.7)$$

Comme  $I_0$  et  $R_S$  sont inconnues, deux conditions doivent être remplies pour résoudre cette équation.

a) pour  $I = 0$  :  $V = V_{OC}$

b) la courbe  $P = IV$  est tangente à la caractéristique  $I-V$  au point de fonctionnement maximal.

- La condition (a) donne :

$$V_{OC} = V_{I=0} = \langle \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_0} \right) \quad (2.8)$$

Il a été montré que la valeur type du rapport  $I_{SC}/I_0$  pour les cellules au silicium aux conditions standards ( $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $25^\circ\text{C}$ ) varie dans la gamme de  $[10^{-8} - 10^{-10}]$ . Cette variation n'affecte que légèrement la précision du modèle. Ainsi pour réduire le nombre de paramètres on pose  $I_0/I_{SC}=10^{-9}$ , l'équation devient alors :

$$I = I_{SC} \left[ 1 - 10^{-9} \exp \frac{20,7}{V_{OC}} (V + R_S I) \right] \quad (2.9)$$

et l'équation (2.9) donne :

## Modélisation de cellules solaires

$$V = V_{OC} \left[ 1 + \frac{1}{20,7} \ln \left( \frac{I_{SC} - I}{I_{SC}} \right) \right] - R_S I \quad (2.10)$$

- La condition (b) peut être exprimée par :

$$V \Big|_{I=I_m} = \frac{P_m}{I_m} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial V}{\partial I} \Big|_{I=I_m} = \frac{\partial}{\partial I} \left( \frac{P_m}{I} \right) \Big|_{I=I_m} = - \frac{P_m}{I_m^2} \quad (2.12)$$

Le courant  $I_m$  est inconnu. En remplaçant l'équation (2.11) dans (2.10) on trouve :

$$\frac{P_m}{I_m} = V_{OC} \left[ 1 + \frac{1}{20,7} \ln \left( \frac{I_{SC} - I_m}{I_{SC}} \right) \right] - R_S I_m \quad (2.13)$$

Si on dérive l'équation (2.10) selon l'équation (2.12) on trouve :

$$\frac{P_m}{I_m^2} = \frac{1}{20,7} \left( \frac{1}{I_{SC} - I_m} \right) + R_S \quad (2.14)$$

La combinaison de (2.13) et (2.14) conduit à :

## Modélisation de cellules solaires

$$I_m \left[ 1 + \frac{1}{20,7} \left( \frac{I_m}{I_{SC} - I_m} + \ln \frac{I_{SC} - I_m}{I_{SC}} \right) \right] - \frac{2P_m}{V_{OC}} = 0 \quad (2.15)$$

A partir de l'équation (2.15) on tire le courant maximal ( $I_m$ ) par une méthode numérique. La résistance série ( $R_S$ ) est calculée en utilisant l'équation (2.14). Cette valeur est substituée dans l'équation (2.9) pour avoir la caractéristique I-V.

### 2.2.3 Modèle à cinq paramètres

Dans ce modèle l'effet de la résistance shunt ( $R_{Sh}$ ) n'est pas négligeable, contrairement au modèle à deux paramètres [7]. Son circuit équivalent est donné par la figure 2.2.

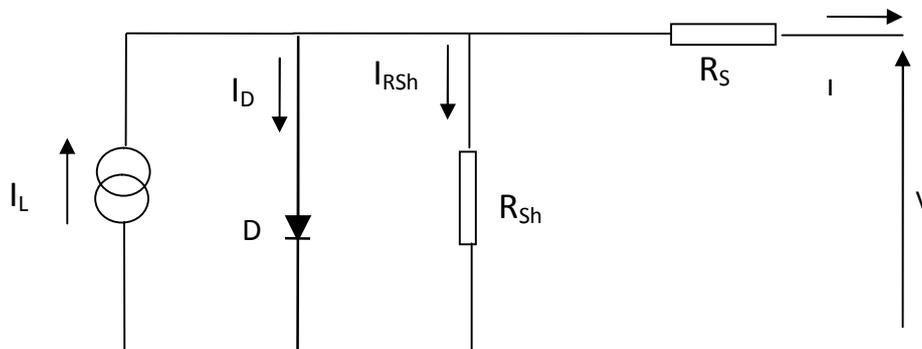


Figure 2.2: Circuit équivalent selon modèle analytique à cinq paramètres

Le courant qui passe dans la résistance  $R_{Sh}$  est donné par :

$$I_{Rsh} = \frac{V + IR_S}{R_{Sh}} \quad (2.16)$$

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

## Modélisation de cellules solaires

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{mkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{Sh}} \quad (2.17)$$

Pour un éclairement et une température donnés, les cinq paramètres  $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_S$ ,  $R_{Sh}$  et  $m$  peuvent être déterminés à partir des données suivantes qui sont la tension à circuit ouvert ( $V_{OC}$ ), le courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ), la tension et le courant au point de maximum de puissance ( $V_m$  et  $I_m$ ) et les pentes au voisinage de  $V_{OC}$  et de  $I_{SC}$  (voir annexe A1).

En appelant :

$$\left(\frac{dV}{dI}\right)\Big|_{V=V_{OC}} = -R_{S0} \quad (2.18)$$

$$\left(\frac{dV}{dI}\right)\Big|_{I=I_{SC}} = -R_{Sh0} \quad (2.19)$$

Les équations obtenues sont :

$$m = \frac{V_m + I_m R_{S0} - V_{OC}}{V_t \left[ \ln\left(I_{SC} - \frac{V_m}{R_{Sh}} - I_m\right) - \ln\left(I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{Sh}}\right) + \left(\frac{I_m}{I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{Sh0}}}\right) \right]} \quad (2.20)$$

$$I_0 = \left(I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{Sh}}\right) \exp\left(-\frac{V_{OC}}{mV_t}\right) \quad (2.21)$$

## Modélisation de cellules solaires

$$R_S = R_{S0} - \frac{mV_t}{I_0} \exp\left(-\frac{V_{OC}}{mV_t}\right) \quad (2.22)$$

$$I_L = I_{SC} \left(1 + \frac{R_S}{R_{Sh}}\right) + I_0 \left(\exp\frac{I_{SC}R_S}{mV_t} - 1\right) \quad (2.23)$$

$$R_{Sh} = R_{Sho} \quad (2.24)$$

### 2.2.4 Modèle d'Appelbaum

Ce modèle utilise la même équation (2.6), mais il propose d'exprimer la caractéristique I-V de manière explicite ( $V=f(I)$ ) [8].

Cette expression est déduite du même circuit équivalent donnée par la figure 2.1 :

$$V = mV_t \ln\left(1 + \frac{I_L - I}{I_0}\right) - R_S I \quad (2.25)$$

les trois paramètres inconnus qui sont  $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_S$ . sont obtenus en faisant les suppositions suivantes :

- Le courant photo généré,  $I_L$ , et le courant de court-circuit,  $I_{SC}$  sont égaux.
- La résistance  $R_S$  est obtenue en dérivant l'équation (2.30) à  $V = V_{OC}$  on trouve :

$$R_S = -\frac{dV}{dI}\Big|_{V_{OC}} - mV_t / I_{SC} \quad (2.26)$$

- La condition de circuit ouvert donne :

$$I_0 = \frac{I_L}{\left(\exp\left(-\frac{V_{OC}}{mV_t}\right) - 1\right)} \quad (2.27)$$

## Modélisation de cellules solaires

avec :

$$V_t = \frac{kT}{q}$$

m : Facteur d'idéalité (m=1)

k : Constante de Boltzmann

q : Charge d'électron

$I_L$  : Courant photogénéré par le générateur sous éclairage

$R_S$  : Résistance série

T : Température absolue

### 2.2.5 Modèle simplifié

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

- La résistance  $R_{Sh}$  est très grande :  $V_{OC} / R_{Sh} \ll I_{SC}$
- Le courant photogénéré,  $I_L$ , et le courant de court-circuit,  $I_{SC}$ , sont égaux
- $\exp\left(\frac{V + IR_S}{mV_t}\right) \gg 1$
- $m = 1$
- Condition de circuit ouvert :

$$I_0 = I_{SC} \exp\left(-\frac{V_{OC}}{mV_t}\right) \quad (2.28)$$

Le schéma équivalent est le même que celui de la figure 2.1. On obtient :

## Modélisation de cellules solaires

$$I = I_{SC} \left[ 1 - \exp \left( \frac{V - V_{OC} + IR_S}{mV_t} \right) \right] \quad (2.29)$$

avec:

$$FF_0 = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0,72)}{v_{OC} + 1} \quad (2.30)$$

$$FF = \frac{ImVm}{I_{SC}V_{OC}} = FF_0(1 - r_S) \quad (2.31)$$

étant:

$$r_S = R_S \left( \frac{I_{SC}}{V_{OC}} \right) \quad \text{et} \quad v_{OC} = \frac{V_{OC}}{m \cdot V_t}$$

La valeur empirique 0,72 de l'équation (2.30) est valable uniquement pour des modules de silicium cristallin.

### 2.2.6 Modèle d'Akbaba

L'expression analytique de ce modèle est donnée par l'équation suivante :

$$I = \frac{V_{OC} - V}{A + BV^2 - CV} \quad (2.32)$$

A, B, et C sont des paramètres de ce modèle [9], ils sont déterminés de la manière suivante :

$$A = V_{OC}/I_{SC} \quad (2.33)$$

## Modélisation de cellules solaires

$V_{OC}$  et  $I_{SC}$  représentent respectivement la tension à circuit ouvert et le courant de court-circuit. Les coefficients B et C sont obtenus par le choix des deux points, a et b, sur la caractéristique (I-V), Ces deux points sont définis par ses courants et ses tensions ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $V_a$ ,  $V_b$ ) tel que :

$$I_a = 0,94I_{SC} \quad (2.34)$$

$$I_b = 0,68I_{SC} \quad (2.35)$$

$$V_a = -I_a R_S + mV_t \ln \left( \frac{I_L - I_a + I_0}{I_0} \right) \quad (2.36)$$

$$V_b = -I_b R_S + m.V_t \ln \left( \frac{I_L - I_b + I_0}{I_0} \right) \quad (2.37)$$

La substitution des tensions et des courants de ces deux points dans l'équation de base de ce modèle (2.32) permet d'obtenir les valeurs B et C.

$$B = (K_1 - K_2) / K_3 \quad (2.38)$$

$$C = (K_1 V_a - K_2 V_b) / K_3 \quad (2.39)$$

Avec :

$$K_1 = V_a I_a (V_{OC} - V_b - A I_a) ; \quad K_2 = V_b I_b (V_{OC} - V_a - A I_a) ; \quad K_3 = V_a V_b I_a I_b (V_b - V_a)$$

## Modélisation de cellules solaires

Avec :

$I_L$  : Courant photo généré

$I_0$  : Courant de saturation

$V_t$  : Tension thermique

$R_S$  : Résistance série du générateur

$T$  : Température de la cellule

### 2.2.7 Modèle à deux exponentielles

L'expression analytique de ce modèle est déduite du schéma électrique de la figure 2.3 [10] :

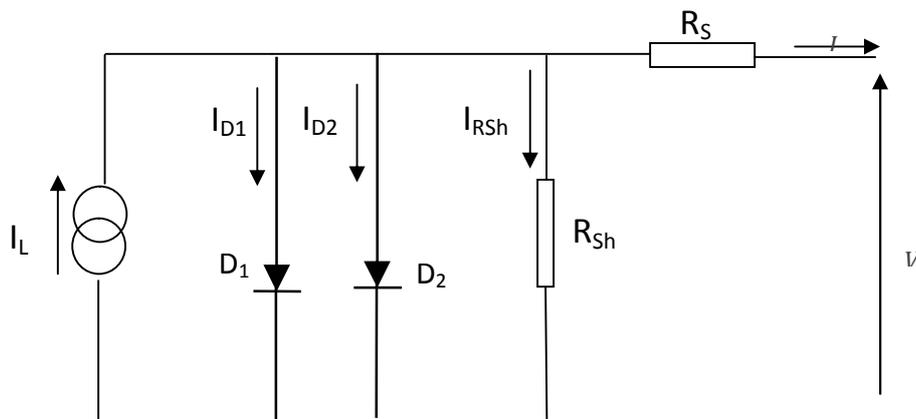


Figure 2.3: Circuit équivalent du modèle à deux exponentielles

$$I = I_L - I_{01} \left[ \exp \left( \frac{V + IR_S}{m_1 V_t} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp \left( \frac{V + IR_S}{m_2 V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{Sh}} \quad (2.40)$$

La détermination des différents paramètres du modèle ( $I_L$ ,  $m$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $R_S$ ,  $R_{Sh}$ ) se fait en se basant sur les approximations suivantes :

## Modélisation de cellules solaires

- Le facteur d'idéalité  $m$  est supposé constant :

$$m = m_1 = m_2 = 2$$

-  $I_L$  est approximé à  $I_{SC}$  tel que :

$$I_L = I_{SC}$$

- Les deux courants de saturation sont déterminés par les équations:

$$I_{01} = \frac{1}{2} \frac{I_L}{\left( \exp\left(\frac{eV_{OC}}{kT}\right) - 1 \right)} \quad (2.41)$$

$$I_{02} = \frac{1}{2} \frac{I_L}{\left( \exp\left(\frac{eV_{OC}}{2kT}\right) - 1 \right)} \quad (2.42)$$

- Le calcul de  $R_S$  est obtenu par la dérivation de l'équation (2.40) à  $V=V_{OC}$  :

$$R_S = - \left[ \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{OC}} + \frac{1}{\left( X_{1v} + X_{2v} + \frac{1}{R_{Sh}} \right)} \right] \quad (2.43)$$

tel que

$$X_{1v} = \frac{eI_{01}}{kT} \exp\left(\frac{eV_{OC}}{kT}\right) \quad (2.44)$$

## Modélisation de cellules solaires

$$X_{2v} = \frac{eI_{02}}{mkT} \exp\left(\frac{eV_{OC}}{mkT}\right) \quad (2.45)$$

le terme  $\frac{1}{R_{Sh}}$  est négligeable par rapport à  $(X_{1v}+X_{2v})$  d'où l'expression finale :

$$R_S = -\left[ \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{OC}} + \frac{1}{(X_{1v} + X_{2v})} \right] \quad (2.46)$$

La résistance  $R_{Sh}$  est déterminée à partir de l'équation 2.43 pour  $I=I_{SC}$  ; ce qui donne :

$$R_{Sh} = -\frac{1}{\left( \frac{1}{\left( \frac{dV}{dI} \Big|_{I_{SC}} + R_S \right)} + X_{1i} + X_{2i} \right)} \quad (2.47)$$

tel que

$$X_{1i} = \frac{I_{01}}{V_t} \exp\left(\frac{I_{SC} R_S}{V_t}\right) \quad (2.48)$$

$$X_{2i} = \frac{I_{02}}{mV_t} \exp\left(\frac{I_{SC} R_S}{mV_t}\right) \quad (2.49)$$

Une autre approche pour le calcul de  $R_{Sh}$  consiste à évaluer l'équation (2.40) au point de fonctionnement maximal et en utilisant la valeur de  $R_S$  (2.46); ce qui donne :

$$R_{Sh} = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_S}{I_{mpp} - I_{L0} + I_{01} \left[ \exp\left(\frac{e(V_{mpp} + I_{mpp} R_S)}{kT}\right) - 1 \right] + I_{02} \left[ \exp\left(\frac{e(V_{mpp} + I_{mpp} R_S)}{mkT}\right) - 1 \right]} \quad (2.50)$$

Une autre méthode de calcul de  $R_S$  et  $R_{Sh}$  est donnée en Annexe A2.

## Modélisation de cellules solaires

### 2.2.8 Modèle à quatre paramètres

Ce modèle ne tient pas compte de la résistance shunt, son circuit équivalent est donné par la figure 2.2. L'expression analytique de ce modèle est donnée par l'équation (2.6).

La différence avec ce modèle réside dans la détermination des quatre paramètres ( $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_S$ , et  $V_t$ ), [11] :

$$I_L = I_{SC} \quad (2.51)$$

$$I_0 = \frac{I_L}{\exp\left(\frac{V_{OC}}{V_t}\right) - 1} \quad (2.52)$$

$$R_S = \frac{m \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_L}\right) - V_m + V_{OC}}{I_m} \quad (2.53)$$

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (2.54)$$

Avec :

- $I_L$  : Photocourant (A)
- $I_{SC}$  : Courant de court circuit (A)
- $V_{OC}$  : Tension à circuit ouvert (A)
- $V_t$  : Tension thermique (V)
- $R_S$  : Résistance série ( )
- $I_m$  : Courant au point de puissance maximale (A)

### Conclusion :

Dans ce travail nous avons décrit différents modèles de la caractéristique courant-tension du générateur photovoltaïque. Il y a des modèles explicites et des modèles

## Modélisation de cellules solaires

implicites. La majorité des modèles sont à une exponentielle, et diffèrent entre eux par le nombre de paramètres pris en compte et leur méthode de calculs.

### *Référence bibliographique*

---

- [1] Wind and solar Power Systems  
R.P. Mukund,,Ph.D,P.e U.S merchant Marine ;;Academy,Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [2] Technical Application Papers No.10: Photovoltaic plants  
[www.ABB.com](http://www.ABB.com) 21.05.2013
- [3] Evaluation du potentiel énergétique solaire  
Bulletin des énergies renouvelables - N° 2 Décembre 2002/ CDER Bouzareah – Algérie-  
A.Mefti Chargé de Recherche  
M.Y. Bouroubi, Attaché de Recherche  
H. Mimouni , Attachée de recherche
- [4] G. W. HART. Residentiel photovoltaic system simulation electrical aspect,  
IEEE pp: 281-288 (1982).
- [5] S. SINGER, B. ROZENSHTEIN and S. SAURAZI. Caracterisation of PV array output using a small number of measured parameters. Solar Energy, Vol.32, N°5, pp : 603-607 (1984).
- [6] M. HADDADI. Conception et optimisation de générateur à conversion photovoltaïque. Thèse de doctorat d'état en électronique Ecole Nationale Polytechnique (1994).
- [7] D. S. H. CHAN, J. R. PHILIPS and J. C. H. PHANG. A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters. Solid State Electronics, Vol.29, N° 3, pp :329-337 (1986).
- [8] J. APPELBAUM. Starting and steady-state characteristics of Dc motors powered by solar cell generators. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol EC-1, N°01 (1986).
- [9] M. AKBABA and M. A. A. ALATTAWI. A new model for I-V characteristic of solar cell generators and its applications. Solar Energy Mater Solar Cells 37, pp :123-132. (1995).
- [11] J. A. GOW, C. D.MANNING. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. IEE Proc.-Electr.Power Appl., Vol 146 N°2 pp : 193-200 (1999).

