

# SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Bibliographie des modèles mathématiques d'un système PV

I.1 Introduction.....	10
I.2 Modélisation du gisement solaire .....	10
I.2.1 Reconstitution des irradiances directes sur plan incliné.....	10
I.2.2 Reconstitution des irradiances diffuses sur plan incliné.....	11
I.3 Les modèles mathématiques .....	12
I.3.1 Modèle 1.....	12
I.3.2 Modèle 2.....	14
I.3.3 Modèle 3.....	16
I.3.3.1 Modélisation de modules PV .....	16
I.3.3.2 Le modèle de température.....	16
I.3.4 Modèle 4.....	17
I.3.4.1 Modèle d'une cellule solaire .....	17
I.3.4.2 caractéristique I-V d'une cellule solaire .....	18
I.3.5 Modèle 5.....	19
I.3.5.1 Modèle à une diode .....	19
I.3.5.2 Modèle deux diodes .....	21
I.3.5.3 Modèle polynomial .....	23
I.4 Conclusion .....	24

## Chapitre II : Modélisation d'un système photovoltaïque

II.1 Introduction .....	27
II.2 Introduction .....	27
II.2.2 Paramètre des équations.....	28
II.2.2 L'état de panneau solaire.....	29
II. 3 Résultats de simulation sur le logiciel MATLAB .....	31
II.3.1 Introduction.....	31
II.3.2 Simulation d'une cellule photovoltaïque .....	31
II.3.2.1 Flux lumineux .....	32
II.3.2.2 Température .....	32
II.3.2.3 Résistance shunt.....	34
II.3.3 Simulation d'un panneau photovoltaïque .....	34
II.3.3.1 Flux lumineux .....	35
II.3.3.2 La Température.....	35
II.3.3. 3 La résistance shunt.....	36
II.4 Conclusion .....	37
Conclusion générale .....	38
Références bibliographiques .....	40
Annexes .....	42

# Introduction Générale

---

La production d'énergie est un défi de grande importance actuellement. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Pour diminuer le degré de pollution, on fait appel à l'utilisation des énergies renouvelables, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans cette mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro-turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques.

Nous nous intéressons dans le cas de la Mauritanie, avec les découvertes récentes et vue l'augmentation de prix de pétrole certains stratégies ont été développées parmi eux, la Stratégie nationale énergie et réduction de la pauvreté mentionne que « de façon générale, l'amélioration des conditions de vie et de travail des populations restent très liées à la qualité et à l'efficacité des services énergétiques dont elles disposent ». Enfin, cette stratégie préconise « la promotion et la généralisation de l'accès à l'électricité, aux énergies nouvelles et renouvelables », en cohérence avec le Plan d'Action pour l'Environnement (PANE) et la Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD) en Mauritanie.

Le but poursuivi dans le cadre de ce mémoire est de chercher des modèles mathématiques les plus précis afin d'obtenir un dimensionnement optimal du système PV.

Le présent mémoire organisé en deux chapitres :

- Dans le premier chapitre on trouve une présentation d'une certains modèles mathématiques d'une cellule photovoltaïque qui sont présentés dans littératures [20, 21, 19, 22, 23, 25, 24 et 27].
- Dans le second chapitre est très important pour nous, car nous présentons la modélisation du système PV sur la base de modèle appliqué par Daniel Guasch Murillo [28].

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.



# **Chapitre I : Bibliographie des modèles mathématiques d'un système photovoltaïque**

---

I.1 Introduction.....	10
I .2 Modélisation du gisement solaire.....	10
I.2.1Reconstitution des irradiances directes sur un plan incliné .....	10
I.2.2 Reconstitution des irradiances diffusées un plan incliné.....	11
I.3 Les modèles mathématiques.....	12
I.3.1 Modèle 1.....	12
I. 3.2 Modèle 2 .....	14
I.3.3 Modèle 3 .....	16
I.3.3.1 Modélisation de modules PV .....	16
I.3. 3.2 Le modèle de température .....	16
I.3. 4 Modèle 4 .....	17
I.3.4.1 Modèle d'une cellule solaire .....	17
I.3.4.2 caractéristique I-V d'une cellule solaire.....	18
I.3.5 Modèle 5 .....	19
I.3.5.1 Modèle à une diode .....	19
I.3.5.2 Modèle deux diodes .....	21
I.3.5.3 Modèle polynomial .....	22
I.4 Conclusion .....	24

## I.1 Introduction

La modélisation proposée dans la littérature est constituée par un ensemble d'équations caractérisant les éléments du système étudié dans des cas spécifiques. Les auteurs proposent des modèles fonctionnant dans des laboratoires loin des conditions réelles.

Les modèles mathématiques proposés sont tirés de nombreux articles qui sont publiés dans la littérature scientifique. En particulier nous proposons les publications d'auteurs connus dans ce domaine comme : D.KOUSS, M.HADDADI [20] ; Issakha YOUM, Ahmed Med Yahya et Abdel Kader M [19]; Francisco M. González-Longatt [22] ;A. Benatallah, R.Mostefaoui, M.Boubekri et N.Boubekri [23] et Olivier GIRGAUD[24] .

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord le modèle de rayonnement solaire sur un plan horizontal, et sur un plan incliné puis les modèles mathématiques du système.

## I.2 Modélisation du gisement solaire

Les auteurs ont présenté dans littératures la modélisation du gisement solaire qui tient compte de la quantité d'énergie produite par un système photovoltaïque ; qui dépend fortement, des caractéristiques électromécaniques de chacun des éléments du système, de la surface du champ capteur, de la quantité d'énergie solaire incidente sur la surface de la partie captation de ce système, de la température ambiante qui influe aussi sur la réponse de ce type de système.

Les modèles sont [20] :

- Modèle de reconstitution des irradiances horaires sur un plan incliné

L'irradiation globale sur un plan incliné est calculée par la relation suivante

$$G_{inc} = B_{in} + D_i + R_i \quad (1.1)$$

avec

$B_{in}$  : irradiation directe sur un plan incliné.

$D_i$  : irradiation diffuse sur un plan incliné.

$R_i$  : irradiation réfléchis sur un plan incliné.

### I.2.1 Reconstitution des irradiances directes sur un plan incliné

Dans le cas de la disponibilité de l'éclairement dû au rayonnement direct, il suffit de multiplier l'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan normal par le cosinus de l'angle d'incidence sur plan considéré. Pour cela la relation proposée est donnée comme suit [20] :

$$B_{in} = BN . \cos \theta_i \quad (1.2)$$

Dans le cas où il n'est disponible que l'éclairement global et diffus cette composante sera calculer comme suit :

$$B_{in} = Rb . (GH - DH) \quad (1.3)$$

avec  $BN$  : l'éclairement du au rayonnement direct sur un plan normal.

$B_{in}$  : l'éclairement du au rayonnement direct sur un plan incliné.

$GH$  : l'éclairement du au rayonnement global sur un plan horizontal.

$DH$  : l'éclairement du au rayonnement diffus sur un plan horizontal.

$R_b$  : le facteur de forme.

Ce dernier est donné par la relation suivante:

$$R_b = \frac{\cos(\theta_i)}{\sin(h)} \quad (1.4)$$

avec :

$\theta_i$  : est l'angle d'incidence.

$h$  : est la hauteur du soleil donnée comme suit :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\sigma) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\sigma) \cdot \cos(\omega) \quad (1.5)$$

$h$ ,  $\varphi$ ,  $\sigma$  et  $\omega$  sont respectivement la hauteur du soleil, la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire.

## I.2.2 Reconstitution des irradiances diffuses un plan incliné

Par définition l'éclairement du au rayonnement diffus est l'éclairement qui nous provient de toute la voûte céleste à l'exception de celui qui nous provient du disque solaire. La distribution complexe et la variété de cette composante qui est bien sûre due à la diffusion par les différents constituants de l'atmosphère, une hypothèse commune a été prise par les différents scientifiques pour pouvoir quantifier cette composante. On suppose alors que la distribution de cette dernière est une distribution isotrope. Sous cette hypothèse, Liu et Jordan [13] ont donné une expression permettant de reporter la composante diffuse disponible pour une surface horizontale, sur un plan ayant une inclinaison  $\beta$ . Cette relation est donnée par :

$$D_{in} = D_h \cdot \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.6)$$

avec  $\beta$  angle d'inclinaison de la surface de captation ;  $D_h$  : irradiation diffuseur un plan horizontal.

Par ailleurs, il a été montré que la distribution du rayonnement solaire dans la voûte céleste est anisotrope et l'hypothèse qui considère la distribution anisotrope du rayonnement diffus conduit à des erreurs considérables dans la reconstitution de la composante diffuse sur un plan incliné.

Temps et Coulson [13] ont développé un nouveau modèle dans lequel ils considèrent que la distribution de l'éclairement du au rayonnement diffus suit une distribution anisotrope. Dans leur relation, une simple correction a été apportée pour tenir compte de ce phénomène. Ils proposèrent alors la relation suivante :

$$D(\beta, \gamma) = D_h \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \left( 1 + \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right) [1 + \cos^2(\theta_i) \cdot \sin(90 - h)] \quad (1.7)$$

Dans leur formulation Temps et Coulson ont supposé que la distribution diffuse dans l'atmosphère est composée de trois parties, une partie isotrope caractérisée par le premier facteur de forme, le second facteur de forme représente l'effet de l'horizon durant la période où l'état du ciel

est clair et le troisième facteur caractérise la quantité de l'éclairement du au rayonnement diffus provenant de la zone circum solaire. Ainsi la quantité d'énergie collectée par n'importe quel capteur plan qu'il soit de conversion photovoltaïque ou thermodynamique de l'énergie solaire. Ainsi la quantité d'énergie collectée par n'importe quel capteur plan qu'il soit de conversion photovoltaïque ou thermodynamique de l'énergie solaire dépend d'une part des caractéristiques thermo- mécaniques ou électromécaniques et d'autre part, de leurs configurations géométriques. Parmi ces configurations géométriques, nous avons l'inclinaison et l'orientation du capteur considéré.

➤ Reconstitution des irradiances réfléchies à l'échelle de l'heure sur un plan incliné

En supposant que l'irradiation réfléchie par le sol et incident sur un plan incliné est isotrope, Liu et Jordan ont proposé l'équation suivante :

$$R_{in} = GH \cdot \rho \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.8)$$

avec :  $\rho$  albédo du sol.

GH : irradiation global sur un plan horizontal.

## I.3 Les modèles mathématiques

### I.3.1 Modèle 1

Ce modèle est basé sur un schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque constitué d'une diode, deux résistances et un générateur de courant. Ainsi il est représenté par la figure ci-dessous [20].

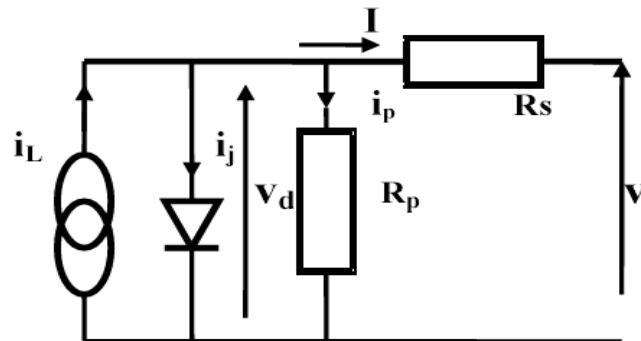


Fig.1.1. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

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

$$I_L = I_j + I_p + I \quad (1.9)$$

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

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (1.10)$$

Le courant de la jonction est donné par :

$$I_j = I_0 \left[ \exp \left[ \frac{e \cdot (V + R_s \cdot I)}{A k T} \right] - 1 \right] + I_L \quad (1.11)$$

On suppose que  $\exp(e/AkT)^{TM} - 1 \approx \exp(e/AkT)^{TM}$  ;  $I_j = I_p$  et on pose  $\lambda = e/(AkT)$  d'où



$$I_L = I_{sc} \left[ 1 - \left( \frac{I_0}{I_{sc}} \right) \exp \lambda (V + R_s \cdot I) \right] \quad (1.12)$$

La tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (1.13)$$

Avec  $I_{sc} / I_0 = 10^{-8} \text{ à } 10^{-10}$  pour un  $T=298 \text{ °K}$  et  $G=1000 \text{ W/m}^2$ .

Généralement on prend  $I_{sc} / I_0 = 10^{-9}$  d'où

$$I = I_{sc} \left[ 1 - 10^{-9} \cdot \exp \left( \frac{20.7}{V_{oc}} \cdot (V + R_s \cdot I) \right) \right] \quad (1.14)$$

$$V = V_{oc} \left[ 1 + \frac{1}{20.7} \ln \left( \frac{I_{sc} - I}{I_{sc}} \right) \right] - R_s \cdot I_s \quad (1.15)$$

Au point de puissance maximale la tension peut s'exprimer par :

$$V = \frac{P_m}{I_m} | I = I_m \quad (1.16)$$

$$\frac{\partial V}{\partial I} \Big|_{I=I_m} = \frac{\partial}{\partial I} \left( \frac{P_m}{I} \right) \Big|_{I=I_m} = \frac{P_m}{I_m^2} \quad (1.17)$$

En remplaçant ces deux valeurs respectivement dans l'équation (2.17) nous aurons les équations suivantes :

$$\frac{P_m}{I_m} = V_{oc} \left[ 1 + \frac{1}{20.7} \ln \left( \frac{I_{sc} - I_m}{I_{sc}} \right) \right] - R_s \cdot I_m \quad (1.18)$$

$$\frac{P_m}{I_m} = \left[ \frac{V_{oc}}{20.7} \left( \frac{1}{I_{sc} - I_m} \right) \right] + R_s \quad (1.19)$$

$$I_m = \left[ 1 + \frac{1}{20.7} \left( \frac{I_m}{I_{sc} - I_m} + \ln \left( \frac{I_{sc} - I_m}{I_{sc}} \right) \right) \right] - \frac{2 \cdot P_m}{V_{oc}} \quad (1.20)$$

Alors la nouvelle valeur du courant de court circuit  $I_{sc}$  et de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  sous les conditions considérées ( $G$ ,  $T$ ) seront [20] :

$$I_{sc}(G, T) = I_{sc}^{st} G (1 + \alpha \Delta T) \quad (1.21)$$

$$I_{sc}(G, T) = I_{sc}^{st} G (1 + \alpha \Delta T) \quad (1.22)$$

$$P_m = P^{st} \frac{I_{sc}(G, T) \cdot V_{oc}(G, T)}{I_{sc}^{st} \cdot V_{oc}^{st}} \quad (1.23)$$

où :

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ).

$e$  : Charge élémentaire ( $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

$A$  : Facteur d'idéalité de la jonction.

$I$  : Courant fourni par le groupe de panneaux (A).

V : Tension aux bornes du groupe de panneaux (V).

T : Température de jonction de la cellule photovoltaïque.

$I_p$  : Courant photo généré dû à la génération de porteurs par l'illumination.

$I_0$  : Le courant de saturation.

$R_s$  : Résistance série.

$R_p$  : Résistance shunt.

### I. 3.2 Modèle 2

La caractéristique  $I-V$  du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent de la figure (1.2). Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances séries  $R_s$  et parallèle  $R_{sh}$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [19].

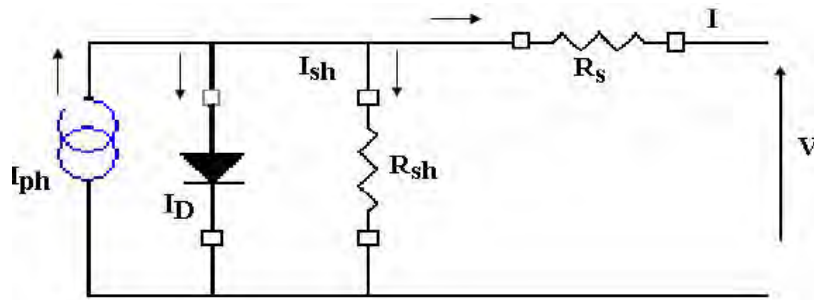


Figure.1.2 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules.

L'équation reliant le courant délivré par un module PV constitué par la mise en série de  $N_s$  cellules et la tension à ses bornes est donnée par [19] :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left( \exp \frac{V + I R_s}{V_T} \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (1.24)$$

Où :  $I_{ph}$ ,  $I_0$  et  $V_T = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T}{q}$  désignent respectivement le photo-courant, le courant de saturation inverse de la diode et la tension thermique.

Avec :

$n$  : le facteur d'idéalité de la diode.

$q$  : la charge de l'électron.

$k$  : la constante de Boltzmann.

$T$  : la température de la cellule qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante, selon la relation linéaire :

$$T - T_a = \left( \frac{T_{fn} - 20}{800} \right) \cdot \Psi \quad (1.25)$$

Avec :

$T_{fn}$  est la température de fonctionnement normale des cellules PV ( $^{\circ}\text{C}$ ) dans les conditions suivantes: un ensoleillement de  $800 \text{ W/m}^2$ , une température ambiante de  $20^{\circ}\text{C}$  et une masse d'air optique AM égale à 1,5. La valeur de  $T_{fn}$  est généralement donnée par le constructeur.

$T_a$ : est la température ambiante.

$\Psi$  est l'irradiation solaire globale du lieu considéré et reçue par le module PV.

A partir de cette équation, une méthodologie simple a été développée pour la détermination des caractéristiques d'une cellule ou d'un panneau photovoltaïque. On introduit les deux paramètres externes de la cellule (facilement mesurables), tels que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , pour en déduire l'expression mathématique implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque, ainsi que sa caractéristique  $I - V$ .

Le courant de court-circuit est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur est nulle. Son expression approchée est donnée par :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + R_s/R_{sh}} \quad (1.26)$$

A des niveaux d'éclairement usuels, le photo-courant est proportionnel à l'irradiation solaire ou au flux lumineux  $\Psi$  ( $\text{W/m}^2$ ). Dans le cas idéal, il correspond au courant de court circuit qui peut alors simplement s'écrire :

$$I_{cc} \cong I_{cc0} \cdot \left( \frac{\Psi}{1000} \right) \quad (1.27)$$

Où :

$I_{cc0}$  : est le courant de court-circuit pour une irradiation solaire standard de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

La tension de circuit ouvert est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nul, c'est la tension maximale de la cellule. Dans le cas idéal, elle est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \cdot \left( \frac{I_{ph}}{I_0 + 1} \right) \quad (1.28)$$

En utilisant les équations (2.36) à (2.38), l'équation (2.35) devient :

$$I = I_{cc} \cdot \left[ \alpha - \beta \cdot \left( \exp^{y \cdot (V - V_{co} + R_s I)} \right) \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (1.29)$$

Avec :

$$\alpha = \Psi/1000, \quad \beta = 1 + (R_s/R_{sh}), \quad y = 1/V_T.$$

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules photovoltaïques, on peut l'intégrer dans l'équation (1.29) :

$$I = I_{cc} \cdot \left[ \alpha - \beta \cdot \left( \exp^{y \cdot (V - V_{co} + R_s I)} \right) \right] + \lambda (T - T_{ref}) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (1.30)$$

Où  $\lambda$  est un coefficient caractérisant la variation de puissance en fonction de la température et  $T_{ref}$  est la température du module dans les conditions standards.

L'équation de la caractéristique relative à un champ de modules formé par la mise en série de  $M_s$  modules et de  $M_p$  modules est extrapolée de celle d'un module, et elle est donnée par [19] :

$$I_G = I_{cc} \cdot M_p \cdot \left[ \alpha - \beta \cdot \left( \exp^{\frac{q}{M_p} \left( M_s(V - V_{cc}) + \frac{M_s R_s I}{M_p} \right)} \right) \right] - \left( \frac{M_s V + \frac{M_s R_s I}{M_p}}{\frac{R_{sh} \cdot M_s}{M_p}} \right) \quad (1.31)$$

Cette relation n'est valable que si tous les modules, constituant le générateur PV, sont identiques et reçoivent la même irradiation (ayant la même caractéristique I-V).

### I.3.3 Modèle 3

#### I.3.3.1 Modélisation de modules PV

La relation entre le courant et la tension est exprimée par la relation suivant [23, 25]:

$$\frac{I}{M_p} = I_{cc} - I_0 \cdot \exp \left( \frac{q}{n} \left( \frac{V}{M_s} + \frac{R_s I}{M_p} \right) \right) - 1 \quad (2.32)$$

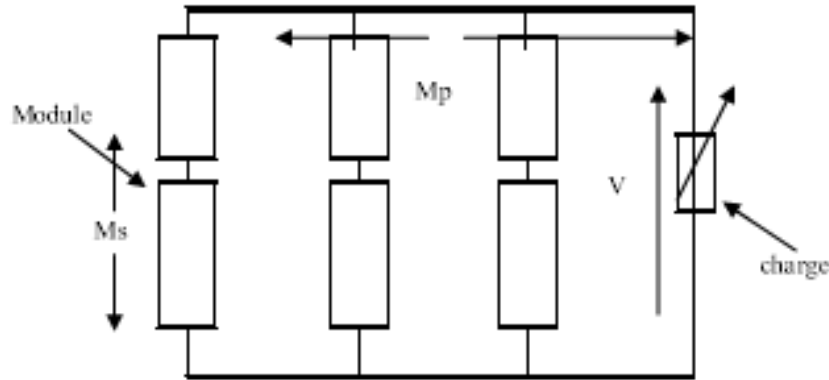


Figure (1.3) : Association des modules

où :

$I$  : le courant généré ;  $I_{cc}$  : le courant de court circuit par module;  $I_0$  : le courant de saturation de la diode par module;  $R_s$  : résistance série de la diode par module (Ohm);

$n$  : numéro de modules dans chaque série;  $M_s$  : le nombre de modules en série;

$M_p$  : le nombre de modules en parallèle.

Cette relation est vrai seulement si les cellules de panneau sont identiques et ayant la même caractéristique  $I = f(V)$ .

#### I.3.3.2 Le modèle de température

La température de la cellule ( $T_c$ ) varie selon l'irradiation solaire globale ( $G_b$ ) et la température ambiante ( $T_a$ ) selon l'équation suivante [23, 25] :

$$T_c = T_a + \left( \frac{N_{oc} - 20}{800} \right) \cdot G_b \quad (1.33)$$

$N_{oct}$  : la température normale de la cellule fournie par le fabricant;  $T_a$  : la température Ambiante; la  $G_b$  : l'irradiation solaire globale.

### I.3. 4 Modèle 4

#### I.3.4.1 Modèle d'une cellule solaire

Ce circuit équivalent le plus simple d'une cellule solaire est une source de courant en parallèle avec une diode. La production de la source est directement proportionnelle à l'éclairement incident sur la cellule (le photo-courant  $I_{ph}$ ). Pendant l'obscurité, la cellule solaire n'est pas un dispositif actif; il fonctionne comme une diode, c'est-à-dire une jonction P-N. Il ne produit ni courant, ni tension. Cependant, s'il est connecté à une provision externe (la grande tension) il produit un courant  $I_D$ , La diode détermine les caractéristiques I-V de la cellule [22], voir figure (1.1).

La sophistication croissante, l'exactitude et la complexité peuvent être présentés au modèle en ajoutant à son tour :

- le courant de saturation de diode  $I_0$  est dépendant de la température.
  - la photo courant  $I_L$  en fonction de la température.
  - la résistance Série  $R_s$ , qui donne une forme plus précise entre la prise de courant maximale et la tension de circuit ouverte. Cela représente les pertes internes en raison du flux lumineux.
  - la résistance shunt  $R_{sh}$ , en parallèle avec la diode, cela correspond au courant de fuite, il est généralement négligé.
  - dans une cellule idéale  $R_s = R_{sh} = 0$ , qui est une supposition relativement commune.
- Pour cette étude, un modèle de complexité modérée a été utilisé. Le courant de la cellule est la différence du photo-courant  $I_L$  et le courant de saturation de la diode  $I_0$  est donné par :

$$I = I_L - I_0 \left( q \cdot \left( \frac{V + R_s \cdot I}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) \quad (1.34)$$

Le modèle a inclus la dépendance de température du photo-courant  $I_L$  et le courant de saturation de la diode  $I_0$  [22].

$$I_L = I_L(T_1) + K_0 \cdot (T_1 - T) \quad (1.35)$$

$$I_L(T_1) = I_{sc}(T_{1,nom}) \frac{G}{G_{(nom)}} \quad (1.36)$$

$$K_0 = \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (1.37)$$

$$I_0 = I_0(T_1) \cdot \left(\frac{T}{T_1}\right)^3 \cdot \exp^{\frac{q \cdot V_0(T_2)}{n \cdot k \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}} \quad (1.38)$$

$$I_0(T_1) = \frac{I_{sc}(T_1)}{\left(\exp^{\frac{q \cdot V_{oc}(T_2)}{n \cdot k \cdot T_1}} - 1\right)} \quad (1.39)$$

La résistance série  $R_s$  représente la résistance à l'intérieur de chaque cellule et la connexion entre des cellules.

$$R_s = -\frac{dV}{dV_{oc}} - \frac{1}{X_V} \quad (1.40)$$

$$X_V = I_0(T_1) \frac{q}{n \cdot k \cdot T_1} \exp^{\frac{q \cdot V_{oc}(T_2)}{n \cdot k \cdot T_1}} - \frac{1}{X_V} \quad (1.41)$$

La résistance shunt  $R_{sh}$  est négligée.

### I.3.4.2 caractéristique I-V d'une cellule solaire

On montre une caractéristique I-V typique de la cellule solaire pour une certaine irradiation ambiante  $G$  et une certaine température cellulaire fixe  $T$ , Pour une charge résistive, la caractéristique de la charge est une ligne droite avec la portée  $I/V=1/R$ . Il devrait être indiqué que la puissance livrée à la charge dépend de la valeur de la résistance seulement [22].

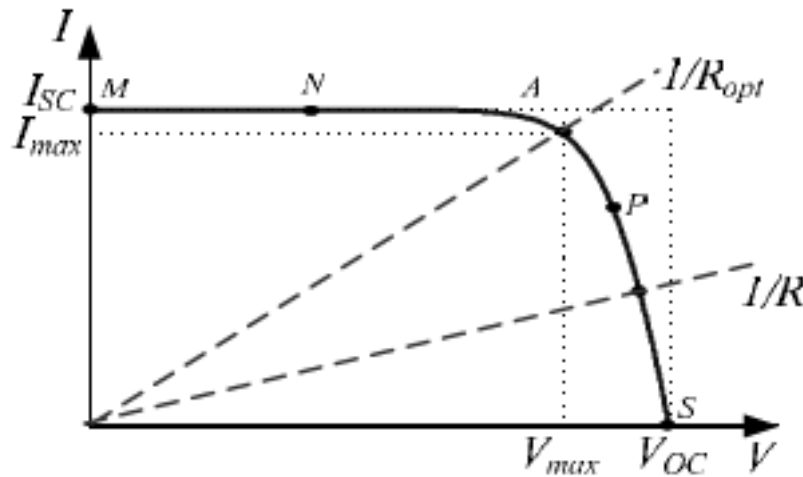


Figure (1.4): caractéristique I-V d'une cellule PV

Si la charge  $R$  est petite, la cellule fonctionne dans la région M-N présentée à la Figure (1.4), où la cellule se comporte comme une source de courant constante, presque égale au courant de court-circuit. D'autre part, si la charge  $R$  est grande, la cellule fonctionne sur les régions P-S de la courbe, la cellule se comporte plus comme une source de tension constante, presque égale à la tension de circuit ouvert.

Une cellule solaire réelle peut être caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants :

- le courant de Court-circuit :  $I_{sc} = I_{ph}$ . C'est la valeur la plus grande du courant produit par une cellule, lorsque la tension aux bornes de la cellule est nul ( $V=0$ ).
- la tension de circuit ouverte transmet à la chute de tension à travers la diode (la jonction p-n), cette tension est obtenue quand le courant produit est  $I = 0$ .

Il reflète la tension de la cellule pendant la nuit et il peut être mathématiquement exprimé comme :

$$V_{oc} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} \right) = V_T \ln \left( \frac{I_L}{I_0} \right) \quad (1.42)$$

avec :

$V_T = (n \cdot k \cdot T)/q$  C'est la tension thermique et  $T$  la température absolue de la cellule.

Le point de puissance maximale : est le point de fonctionnement  $A (V_{max}, I_{max})$  dans la Figure (1.4), à laquelle la puissance dissipée dans la charge résistive est :  $P_{max} = V_{max} I_{max}$ .

Le rendement maximum : est la proportion entre la puissance maximale et la puissance de lumière incidente donnée par [22] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{A \cdot G_a} \quad (1.43)$$

Où :

$G_a$  : est l'irradiation ambiante.

$A$  : est la surface de la cellulaire.

Le facteur de forme : est la proportion de la puissance maximale qui peut être livrée à la charge et le produit de courant de court-circuit  $I_{sc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ , est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.44)$$

Le facteur de forme est une mesure de la caractéristique I-V réelle. Il est estimé supérieur de 0.7 pour de bonnes cellules, il diminue lorsque la température de la cellule augmente.

## I.3.5 Modèle 5

### I.3.5.1 Modèle à une diode

C'est le modèle le plus classique de la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. Le modèle d'une cellule est celui de la figure (1.2), [24,27].

Chaque groupe de panneaux est une association série/parallèle de  $n_s \cdot n_p$  cellules élémentaires,  $n_s$  étant le nombre de cellules en séries sur une branche et  $n_p$  le nombre de branches en parallèles. Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le générateur photovoltaïque de la figure (1.5).

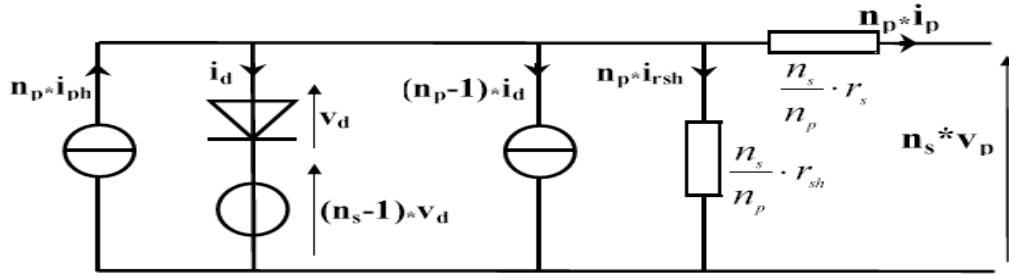


Figure 1.5 : schéma électrique équivalent d'un groupe de panneaux, modèle 1 diode

Nous utiliserons dans ce qui suit les notations suivantes :

$$\begin{cases} I_{ph} = n_p \cdot i_{ph} \\ I_G = n_p \cdot i_p \\ I_d = n_p \cdot i_d \\ I_{rsh} = n_p \cdot i_{rsh} \\ V_d = n_s \cdot v_d \\ V_G = n_s \cdot v_p \\ R_s = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_s \\ R_{sh} = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_{sh} \end{cases}$$

Les deux variables d'entrée sont :

- ❖  $E_s$  ensoleillement dans le plan de panneaux ( $W/m^2$ )
- ❖  $T_j$  température de jonction des cellules ( $^{\circ}C$ ).

Les deux variables de sorties sont :

- ❖  $I_G$  courant fourni par le groupe de panneaux (A)
- ❖  $V_G$  tension aux bornes du groupe (V)

L'équation caractéristique pour un groupe de panneaux PV déduite du schéma électrique équivalent de la figure (1.5) [24,27].

$$I_G = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (1.45)$$

Le photo-courant,  $I_{ph}$  est directement dépendant de l'ensoleillement et de la température des panneaux et peut se mettre sous la forme :

$$I_{ph} = \alpha_1 \cdot E_s \cdot [1 + \alpha_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + \alpha_3 \cdot (T_j - T_{jref})] \quad (1.46)$$

$E_{ref}$  correspond à l'ensoleillement de référence de  $1000 W/m^2$  et  $T_{jref}$  à la température des panneaux de référence de  $25^{\circ}C$ .

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  sont des paramètres constants. Le courant de polarisation de la jonction PN,  $I_d$  est donné par l'expression :

$$I_d = I_{sat} \cdot \left[ \exp \left( \frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V_G + R_s I_G) \right) - 1 \right] \quad (1.47)$$



où :

- $I_{sat}$  : courant de saturation ;
- $K$  : constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K) ;
- $q$  : charge élémentaire ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  C) ;
- $A$  : facteur d'idéalité de la jonction.

Le courant de saturation de la diode est :

$$I_{sat} = \alpha_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{k \cdot T_j}\right) \quad (1.48)$$

avec :

$E_G$  est l'énergie de gap et  $\alpha_4$  est un paramètre constant.

Le courant de shunt s'écrit sous la forme :

$$I_{sh} = \left(\frac{V_G}{R_s}\right)$$

Nous allons alors écrire l'équation finale :

$$I_G = \alpha_1 \cdot E_s \cdot [1 + \alpha_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + \alpha_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - \alpha_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{k \cdot T_j}\right) \cdot \left[ \exp\left(\frac{q}{k A n_s T_j} (V_G + R_s I_G)\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_G}{R_s}\right) \quad (1.49)$$

Nous obtenons une fonction implicite de la forme :

$$I_G = f(I_G, V_G, E_s, T_j)$$

tel qu'on a sept paramètres  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, A, R_s$  et  $R_{sh}$  à déterminer.

### I.3.5.2 Modèle deux diodes

Nous avons, cette fois deux diodes pour présenter les phénomènes de polarisation de la jonction p-n. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau [24,27]. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans ce cas celui de la figure (1. 6) :

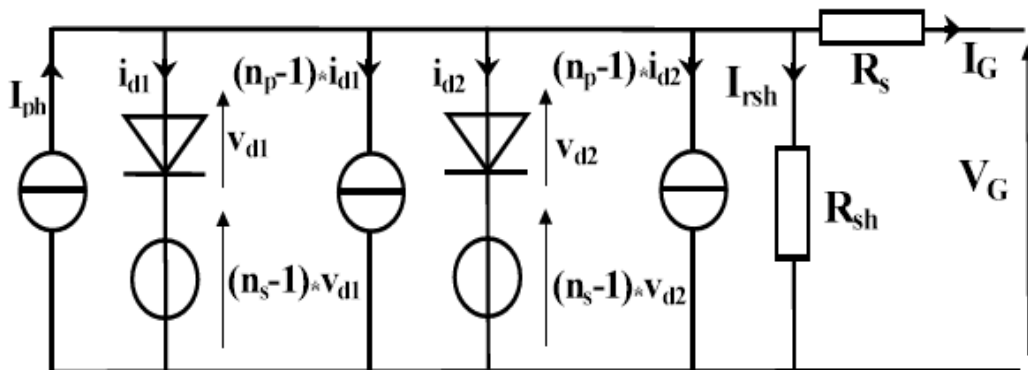


Figure 1.6 : Schéma électrique du « modèle 2 diodes » pour un groupe de panneaux.

Nous avons :

$$I_G = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{rsh} \quad (1.50)$$

Avec  $I_{ph}$  et  $I_{rsh}$  qui gardent les mêmes expressions que précédemment. Pour les courants de

recombinaisons, nous avons :

$$I_{d1} = I_{sat1} \cdot \left[ \exp \left( \frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V_G + R_s \cdot I_G) \right) - 1 \right] \quad (1.51)$$

$$I_{d2} = I_{sat2} \cdot \left[ \exp \left( \frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V_G + R_s \cdot I_G) \right) - 1 \right] \quad (1.52)$$

Les courants de saturation sont :

$$I_{sat1} = \alpha_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left( -\frac{E_G}{k \cdot T_j} \right) \quad (1.53)$$

$$I_{sat2} = \alpha_5 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left( -\frac{E_G}{2k \cdot T_j} \right) \quad (1.54)$$

Nous écrivons l'équation finale comme suit :

$$\alpha_1 \cdot E_s \cdot [1 + \alpha_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + \alpha_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - \alpha_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left( -\frac{E_G}{k \cdot T_j} \right) \cdot \left[ \exp \left( \frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V_G + R_s) \right) - \alpha_5 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left( -\frac{E_G}{2k \cdot T_j} \right) \cdot \left[ \exp \left( \frac{q}{2k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V_G + R_s \cdot I_G) \right) - 1 \right] - \left( \frac{V_G}{R_s} \right) \right] \quad (1.55)$$

Les huit paramètres  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$ ,  $\alpha_5$ , A,  $R_s$  et  $R_{sh}$  à déterminer.

### I.3.5.3 Modèle polynomial

La documentation de constructeur nous fournit [24,27], pour la puissance maximale  $P_{G-MAX}$  la caractéristique suivante :

$$P_{G-Max} = \alpha_1 \cdot E_s \cdot [1 + \alpha_2 \cdot (T_j - T_{jref})] \quad (1.56)$$

avec :

- $\alpha_1$  compris entre 0.95 et 1.05 (0.095 à 0.105 pour un panneau)  
représente la dispersion de caractéristique des panneaux.
- $\alpha_2 = -0,47\%/^{\circ}\text{C}$  est la dérive en température des panneaux.

En rajoutant un paramètre  $\alpha_3$  à la caractéristique du fabricant, on obtient des résultats bien plus satisfaisants :

$$P_{G-Max} = \alpha_1 \cdot E_s \cdot [1 + \alpha_2 \cdot (T_j - T_{jref}) \cdot (\alpha_3 + E_s)] \quad (1.57)$$

Ce modèle simplifié nous permet de déterminer la puissance maximale fournie par un groupe de panneaux pour un ensoleillement et une température de panneaux donnés.

Les paramètres sont présentés comme suit :

<b><u>Modèle à une diode</u></b>		
<i>paramètre</i>	<i>Groupe 1</i>	<i>Groupe 2</i>
$\alpha_1$	$15,59 \cdot 10^{-3}$	$15,21 \cdot 10^{-3}$
$\alpha_2$	0	$1 \cdot 10^{-4}$
$\alpha_3$	$8,70 \cdot 10^{-4}$	$2,23 \cdot 10^{-3}$
$\alpha_4$	953,82	833,47
A	1	1
$R_s$	0,203	0,271
$R_{sh}$	106,04	85,69

Tableau 1.1 : Paramètres obtenus pour le « modèle une diode » pour chaque groupe de panneaux

<b><u>Modèle deux diodes</u></b>		
<i>paramètre</i>	<i>Groupe 1</i>	<i>Groupe 2</i>
$\alpha_1$	$15,57 \cdot 10^{-3}$	$15,23 \cdot 10^{-3}$
$\alpha_2$	0	$-1 \cdot 10^{-4}$
$\alpha_3$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$2,17 \cdot 10^{-3}$
$\alpha_4$	647,69	646,97
$\alpha_5$	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$
A	1	1
$R_s$	0,256	0,289
$R_{sh}$	118,54	89,04

Tableau 1.2 : Paramètres obtenus pour le « modèle deux diode » pour chaque groupe de panneaux

<b><u>Modèle polynomial</u></b>		
<i>paramètre</i>	<i>Groupe 1</i>	<i>Groupe 2</i>
$\alpha_1$	0,98	0,99
$\alpha_2$	$-2,91 \cdot 10^{-3}$	$-4,7 \cdot 10^{-3}$
$\alpha_3$	40,83	45

Tableau 1.3 : Paramètres obtenus pour le « modèle polynomial » pour chaque groupe de panneaux

## I.4 Conclusion

Après la représentation des modèles mathématiques complexes, on peut comparer ces modèles dans cette partie. Les modèles présentent les paramètres suivants:

- la puissance maximale crête du module ;
- la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  ;
- le courant de court circuit ;
- la tension crête maximale  $V_m$  ;
- le courant maximal crête  $I_m$  ;
- la surface du module photovoltaïque  $S$  ;
- coefficient de température ( $^{\circ}C$ ) ;

L'irradiation dans ces modèles est donnée toujours avec les conditions standards  $1000W/m^2$ , la température de module  $25^{\circ}C$ .

Parmi les résultats de la comparaison nous retenons une ressemblance d'approche pour :

- Les modèles 1-3-5.

- les modèles 4-6.

Les modèles 1-3-5 se sont des modèles mathématiques qui présentent la forme exponentielle du courant et les paramètres de résistances séries et shunt.

Il est important de noter que ce type de modèles est utilisé souvent au CRAER pour son approche très précise.

Les modèles 2-4-6 montrent eux aussi les capacités à traduire les phénomènes physiques à travers la forme de polynôme de la puissance du système Photovoltaïque.

Ce dernier modèle est appliqué par l'Ecole Nationale de Cachan étudié par Olivier Girgaud. Il attire notre attention dans le cadre de ce travail pour le tester et faire ressortir ces capacités à gérer les phénomènes physiques des systèmes PV.

## **Chapitre II : Modélisation d'un système photovoltaïque**

---

II.1 Introduction.....	27
II.2 Modélisation d'une cellule Photovoltaïque .....	27
II.2.2 Paramètre des équations .....	29
II.2.2 L'état de panneau solaire .....	30
II. 3 Résultats de simulation sur le logiciel MATLAB .....	31
II.3.1 Introduction .....	31
II.3.2 Simulation d'une cellule photovoltaïque .....	31
II.3.2.1 Flux lumineux .....	32
II.3.2.2 Température .....	32
II.3.2.3 Résistance shunt.....	33
II.3.3 Simulation d'un panneau photovoltaïque .....	34
II.3.3.1 Flux lumineux .....	35
II.3.3.2 La Température .....	35
II.3.3. 3 La résistance shunt.....	36
II.4 Conclusion .....	37

## II.1 Introduction

Le panneau solaire est la principale source d'énergie de l'ensemble du système PV. Il constitue un ensemble de cellules photovoltaïques associées en séries et en parallèles avec des ports de protections supplémentaires. Pour procéder à son analyse l'idée de base sera fondée sur l'étude de la cellule photovoltaïque. Le noyau dur du convertisseur de la lumière en électricité est la présence de silicium. Nous présentons le modèle mathématique connu sous le nom de Daniel. Guasch Murillo. Qui décrit la présentation du circuit électrique. Ce modèle a été programmé avec Matlab / Simulink.

Et enfin, utilisé pour présenter une série d'exemples sous formes de courbes caractérisant le système PV du CRAER pour démontrer sa fonctionnalité.

## II.2 Modélisation d'une cellule Photovoltaïque

En effet, ce modèle présente le panneau solaire comme le résultat d'un ensemble de cellules photovoltaïques associées en parallèles et en séries. Le modèle d'une cellule photovoltaïque, à partir de laquelle le panneau solaire a été modélisé est donné dans la figure (3.1).

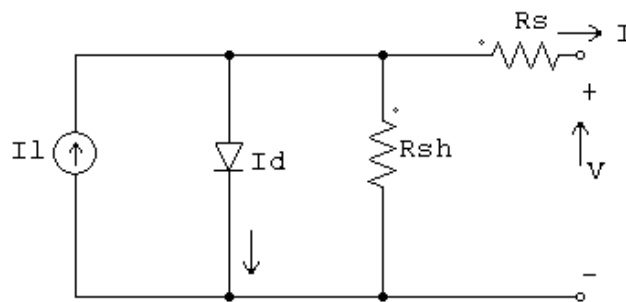


Figure 3.1 circuit équivalent d'une cellule solaire

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant avec une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances séries  $R_s$  et shunt  $R_{sh}$  comme la montre le schéma électrique équivalent de la figure (3.1).

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.

La résistance shunt (résistance de fuites) est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde).

Le modèle mathématique réel du courant  $I$  délivré par une cellule photovoltaïque tiré de la Figure (3.1) est donné suivant l'équation 3.1.

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{V + R_s I}{\eta V_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (3.1)$$

Les termes impliqués dans l'équation 3.1, sont développés dans l'équation 3.2 à 3.6 :

- le photo-courant  $I_L$ , est déterminé en fonction de la dimension de la cellule, la surface est en  $\text{cm}^2$ .
- La densité de court-circuit,  $J_{SC}$  en  $\text{A}/\text{cm}^2$ .
- la température,  $T$  en  $^{\circ}\text{C}$ .
- Le facteur température  $\alpha_{JSC}$  en  $\text{A}/^{\circ}\text{C}.\text{cm}^2$ .
- le rayonnement solaire incident,  $G$  en  $\text{W}/\text{cm}^2$ .
- le courant de saturation  $I_0$ .
- la tension thermique  $V_t$ , en volts.
- $E_g$  est l'énergie de Gap, en eV.
- $V_{oc}$ , la tension en circuit ouvert en volts.
- $T_K$  la température en kelvins.
- $K$  est la constante de Boltzmann.
- $q$  la charge de l'électron.
- $\alpha_{gap}$  et  $\beta_{gap}$  sont des coefficients de température.
- $E_{g0}$  énergie gap, à  $0^{\circ}\text{C}$ .
- $E_g'$  est la particularisation de l'expression à  $0^{\circ}\text{C}$ .

$$I_L = \left( J_{SC} \frac{G}{1000} + \alpha_{JSC}(T - 27) \right) \cdot S \quad (3.2)$$

$$I_0 = \frac{J_{SC} \cdot S \cdot T_K^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{V_t}}}{\left( e^{\frac{V_{oc}}{\eta V_t}} - 1 \right) \cdot 300^3 \cdot e^{-\frac{E_g'}{V_t}}} \quad (3.3)$$

$$V_t = \frac{K \cdot T_K}{q}, V_t' = V_t | T_K = 300 \quad (3.4)$$



$$E_g = E_{g0} - \frac{\alpha_{gap} T_k^2}{\beta_{gap} + T_k}, E_g' = E_g | T_k = 300 \quad (3.5)$$

$$T_k = T + 273 \quad (3.6)$$

**II.2.2 Paramètre des équations:** Les paramètres caractéristiques qui décrivent une cellule solaire dépendent de la technologie utilisée. Le tableau 3-1 montre l'ensemble des valeurs qui caractérisent les cellules au silicium des panneaux solaires photovoltaïques qui sont disponibles dans le laboratoire de l'installation de systèmes photovoltaïques.

$K=1.38E-23J/^{\circ}K$	$R_{SH}=10\Omega$	$\beta_{gap}=1100^{\circ}K$
$q=1.6E-19^{\circ}C$	$n=1.18$	$J_{SC}=28.16E-3A/cm^2$
$S=156.25cm^2$	$E_{go}=1.16 eV$	$\alpha_{Jsc}=30E-6^a/^{\circ}Kcm^2$
$R_s=10.5E-3 \Omega$	$\alpha_{gap}=7E-14eV/^{\circ}K$	$V_{oc}=0.57 V$

Tableau 3.1 : Les paramètres caractéristiques de la cellule

La formulation du panneau solaire est constituée d'association des cellules en série et en parallèle de n cellules photovoltaïques. Les avantages de cette association sont claires: tout en associant  $N_{pg}$  cellules série nous permettez d'avoir une tension de sortie nominale suffisante pour les besoins du système.

Le modèle offre la possibilité de concentrer plusieurs panneaux solaires sur un seul groupe ou chaque modèle séparément. Le choix d'une option ou une autre dépend de la puissance disponible et la quantité de renseignements requis par le système. Comme dans le cas de la batterie, il est recommandé de simplifier le panneau solaire est de supposer que toutes les cellules photovoltaïques qui le forment sont identiques. Ensuite, nous pouvons appliquer les simplifications décrites dans les équations (3.7) et (3.8) dans le calcul de la tension et du courant.

$$V_g = \sum_{i=1}^{N_{sg}} V_{ci} \cong N_{sg} \cdot V_c \quad (3.7)$$

$$V_g = \sum_{i=1}^{N_{sg}} V_{ci} \cong N_{sg} \cdot V_c \quad (3.8)$$

Cette simplification est également valable pour déterminer les paramètres caractéristiques d'un panneau : le courant de court-circuit et tension du circuit ouvert, comme illustré dans les équations (3.9) et (3.10).

$$V_{ocg} = \sum_{i=1}^{N_{sg}} V_{oci} \cong N_{sg} \cdot V_{oc} \quad (3.9)$$

$$I_{scg} = \sum_{i=1}^{N_{pg}} I_{sci} \cong N_{pg} \cdot I_{sc} \quad (3.10)$$

**II.2.2 L'état de panneau solaire:** L'utilisation quotidienne dans des conditions réelles de travail conduit à un vieillissement inégal et la détérioration des cellules photovoltaïques qui composent les panneaux solaires. Ceci conduit au point de fonctionnement de chaque cellule est différent, venant à la situation dans laquelle certaines cellules génèrent une quantité d'énergie moins efficace que les autres, et que ce dernier doit être dissipé. La dissipation de puissance entraîne les cellules affectées sur les zones de surface de panneau solaire avec une température plus élevée que la normale, conduisant ainsi à la destruction du panneau lui-même. Pour éviter ce problème fréquemment utilisés des diodes de dérivation qui limite la puissance dissipée par chaque cellule.

Il est perçu comme les diodes offrent une voie alternative, id, le courant dans chaque branche,  $I_g$ . Le modèle se penche sur ce problème de deux façons: d'abord, le paramètre  $N_{sg}$  pour simuler l'entrée en fonctionnement de plusieurs diodes, consolidant sa valeur en fonction du nombre de diodes actives. Deuxièmement, s'il n'est pas appliqué l'hypothèse que toutes les cellules sont identiques, on peut définir à la fois les caractéristiques physiques et l'environnement de travail pour chacun.

Pour éviter cette situation ne peut être utilisée pour définir une zone de sécurité dans le plan courant-tension du panneau solaire, ce qui assure une cellule photovoltaïque unique ne peut dissiper l'énergie produite par d'autres cellules. L'expression (3.12) hypothétique puissance maximale dissipée par une cellule solaire,  $P_{max}$ , et 3.13 rend l'expression de la zone de sécurité.

$$I_g \cdot \sum_{i=1}^{N_{sg}-1} V_i < P_{max} \quad (3.11)$$

$$V_{g > (N_{sg}-1)} \left( V_{oc} + V_t \ln \left( 1 - \frac{I_g}{N_{pg} \cdot I_{sc}} \right) \right) - \frac{P_{max}}{I_g} \cdot N_{pg} \quad (3.12)$$

Une situation similaire se produit lorsque certaines branches commencent à consommer du courant en provenance du reste du système. Cette situation due à un vieillissement inégal des panneaux. Ce vieillissement est apparait lorsque l'irradiation solaire est négligeable ou nulle,

par exemple pendant la nuit, la tension de polarisation peut conduire à des cellules se comportent comme des récepteurs plutôt que comme des générateurs.

Pour sécuriser les cellules en série, il faut que la tension en circuit ouvert du panneau soit supérieure à la tension de fonctionnement du système. Par ailleurs, toujours inclure la coupe diodes empêchant l'entrée de courant dans les branches. Cette protection est prise en compte dans le modèle à travers deux techniques. Les performances des diodes est simulé par la mise à jour des paramètres et en utilisant l'expression (3.13). La diminution des cellules connectées en parallèles ( $N_{pg}$ ) simule la perte d'un bras, tout en considérant le maximum entre 0 et le  $I_c$  se modélise l'effet d'autoriser les flux de courant dans une direction.

$$I_c = \max \left\{ 0, I_c \right\} \quad (3.13)$$

## II. 3 Résultats de simulation sur le logiciel MATLAB

### II.3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les bases qui ont permis de développer sous l'environnement MATLAB/ Programmation, les modèles de simulations pour une cellule photovoltaïque en premier temps, ensuite le cas d'un panneau photovoltaïque.

Ce modèle de simulation est appelle modèle du laboratoire, car il est base sur les données du constructeur (fabrique dans le laboratoire).

Ce modèle peut être utilisé par partie, ce qui nous permet d'adapter le modèle mathématique aux objectifs des simulations.

Cependant, notre objectif est de répondre à la question d'influence des paramètres (ensoleillement, température, résistance) dans des conditions réelles sur :

- la caractéristique d'une cellule photovoltaïque ;
- la caractéristique d'un panneau (module) photovoltaïque.

### II.3.2 Simulation d'une cellule photovoltaïque

La figure 3.2 représente une caractéristique (I, V) d'une cellule photovoltaïque. Elle donne la tension de circuit ouvert  $V_{co}=0.6$  V et le courant de court-circuit  $I_{cc}=4.4$  A lorsque la cellule est soumise à un ensoleillement constant  $G=1000$  W/cm<sup>2</sup>, à température constante  $T=35^\circ\text{C}$ . Les paramètres de simulation sont présentés au tableau 3.1.

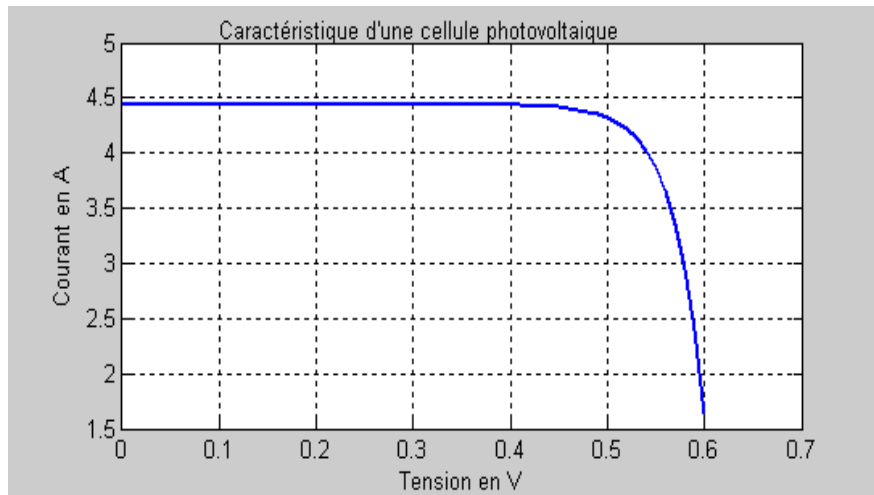


Figure 3.2 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

### II.3.2.1 Flux lumineux

La caractéristique courante tension qu'illustre la figure 3.3 montre que le courant de court circuit diminue avec l'éclairement, alors que la valeur de la tension à vide reste la même. Avec les'ensoleillements suivants  $G = 800\text{W/cm}^2$  ;  $G = 900\text{W/cm}^2$  ;  $G = 1000\text{W/cm}^2$  et la température  $T=35^\circ\text{C}$ .

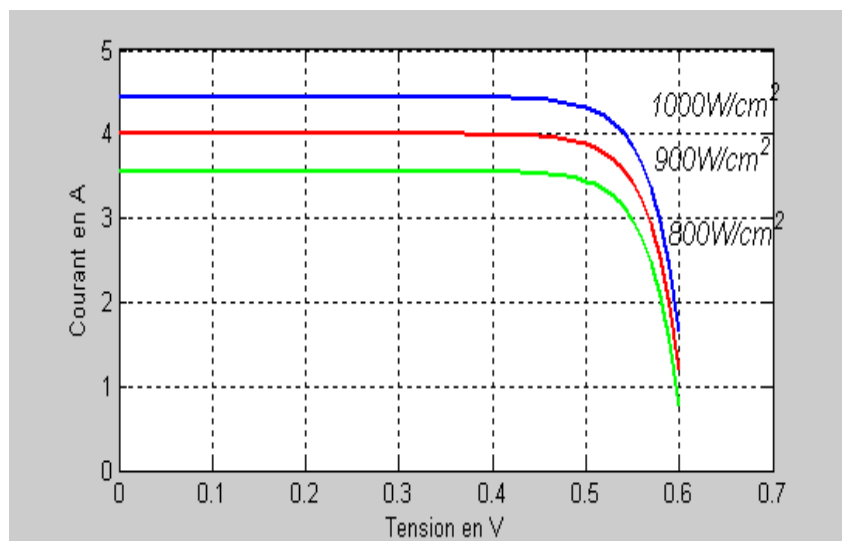


Figure 3.3 : Caractéristique I – V d'une cellule en fonction de l'irradiation.

### II.3.2.2 Température

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de  $0.03\text{mA.K}^{-1}$  par  $\text{cm}^2$  de cellule. Par contre, la figure 3.4 montre que le courant  $I$  augmente avec la température, il engendre aussi une diminution de la tension de court-circuit  $V_{co}$  de l'ordre de 2 mV. Les

paramètres de simulation sont les suivantes: un ensoleillement constante  $G=1000\text{W}/\text{cm}^2$  et les températures  $25^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$  et  $45^\circ\text{C}$ .

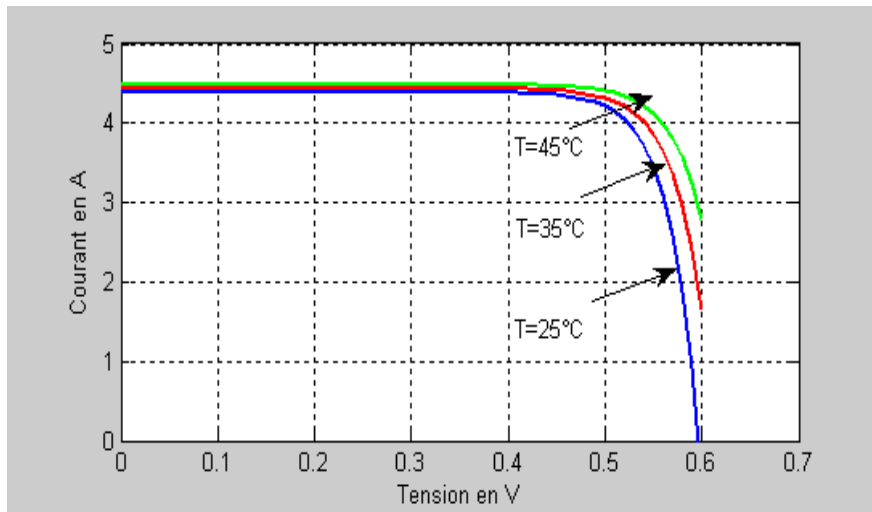


Figure 3.4 Caractéristique I - V en fonction de la température.

### II.3.2.3 Résistance shunt

La résistance shunt est liée directement au processus de fabrication et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant. La figure 3.5 montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant.

Ceci provient du fait qu'il faut soustraire de la photo courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. La caractéristique est réalisée à partir des paramètres de simulation suivant : Ensoleillement  $G=1000\text{W}/\text{cm}^2$ , la température  $T=35^\circ\text{C}$  et la variation de résistance shunt  $R_{sh}=0.5\text{ ohm}$  ;  $10\text{ ohms}$  et  $10000\text{ ohms}$ .

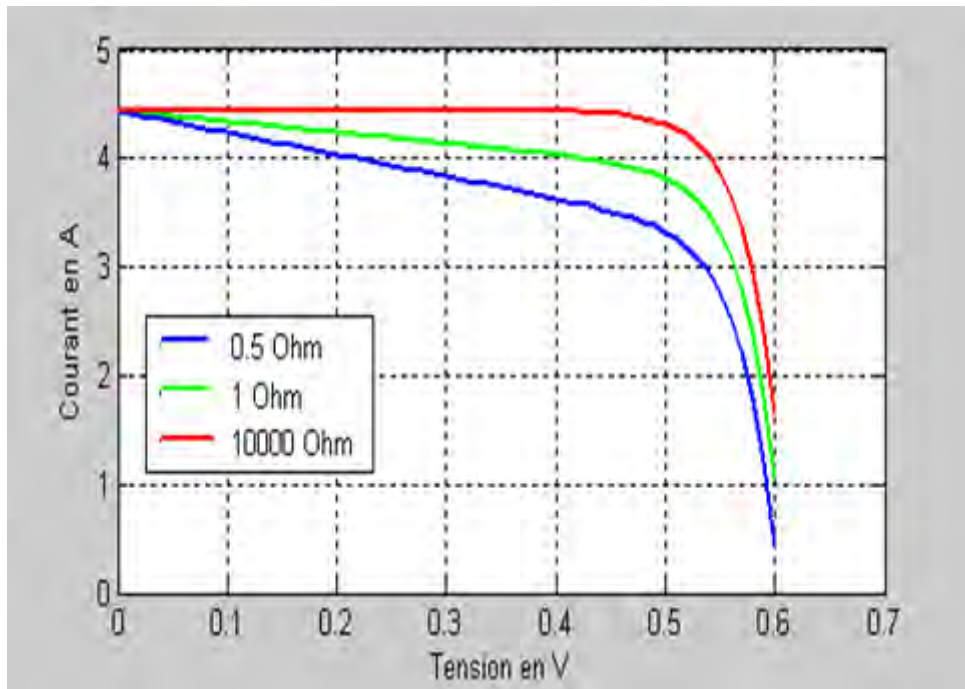


Figure 3.5 Caractéristique I - V en fonction de la résistance shunt.

### II.3.3 Simulation d'un panneau photovoltaïque

La caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque qui composé de 36 cellules photovoltaïques en série est donc analogue à celui d'une cellule photovoltaïque avec un changement sur les deux axes voir les figures 3.6 à 3.9.

Ainsi tout ce qui a été dit pour une cellule photovoltaïque, concernant son comportement en fonction du flux lumineux et de la température où l'influence de résistance shunt, ou concernant son interaction avec la charge est directement transposable au cas d'un panneau photovoltaïque.

La figure 3.6 est obtenue avec les paramètres des simulations suivantes :

- la température  $T=43^{\circ}\text{C}$
- l'ensoleillement  $G=1000 \text{ W/cm}^2$
- la résistance shunt  $R_{sh}=1000 \text{ Ohm}$
- le facteur d'idéalité  $A=0.7902$

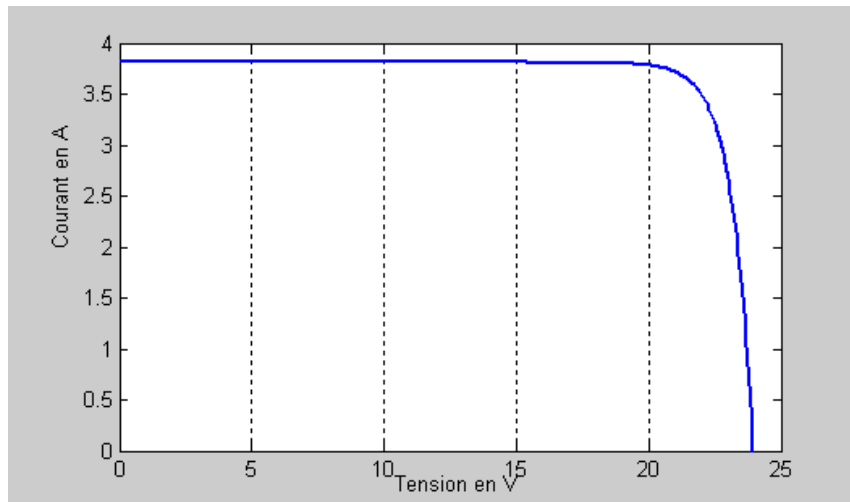


Figure 3.6 Caractéristique I - V d'un panneau photovoltaïque

### II.3.3.1 Flux lumineux

La figure 3.7 est obtenue avec les données des simulations suivantes :

- La température  $T=43^{\circ}\text{C}$
- L'ensoleillement  $G=800\text{ W/cm}^2$ ,  $G=900\text{ W/cm}^2$ ,  $G=1000\text{ W/cm}^2$ ,
- La résistance shunt  $R_{sh}=1000\text{ Ohm}$
- Le facteur d'idéalité  $A=0.7902$

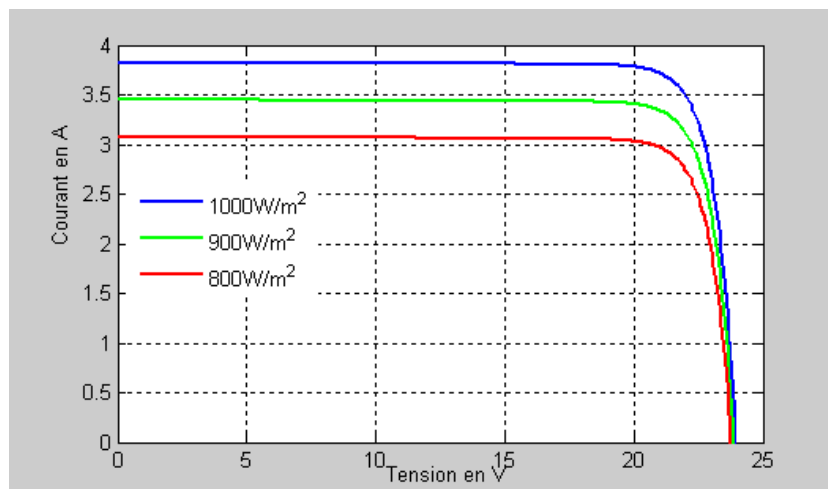


Figure 3.7 Caractéristique I - V en fonction de l'ensoleillement.

### II.3.3.2 La Température

La figure 3.8 est obtenue avec les données des simulations suivantes :

- la température  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $T=35^{\circ}\text{C}$ ,  $T=43^{\circ}\text{C}$ .
- l'ensoleillement  $G=1000\text{ W/cm}^2$ .
- la résistance shunt  $R_{sh}=1000\text{ Ohm}$ .
- le facteur d'idéalité  $A=0.7902$ .

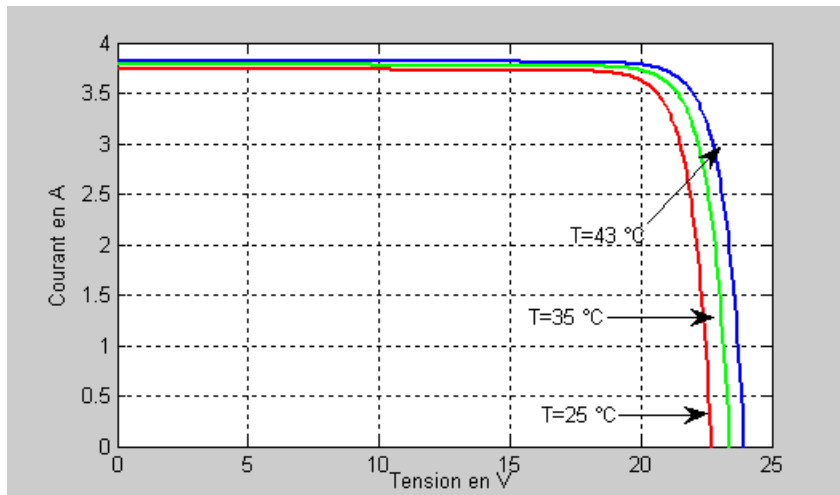


Figure 3.8 Caractéristique I - V en fonction de la température.

### II.3.3. 3 La résistance shunt

La figure 3.9 est obtenue avec les données des simulations suivantes :

- la température  $T=43^{\circ}\text{C}$ .
- l'ensoleillement  $G=1000 \text{ W/cm}^2$ .
- la résistance shunt  $R_{sh}=1000 \text{ Ohm}$ ,  $R_{sh}=50 \text{ Ohms}$ ,  $R_{sh}=100 \text{ Ohms}$ .
- Le facteur d'idéalité  $A=0.7902$ .

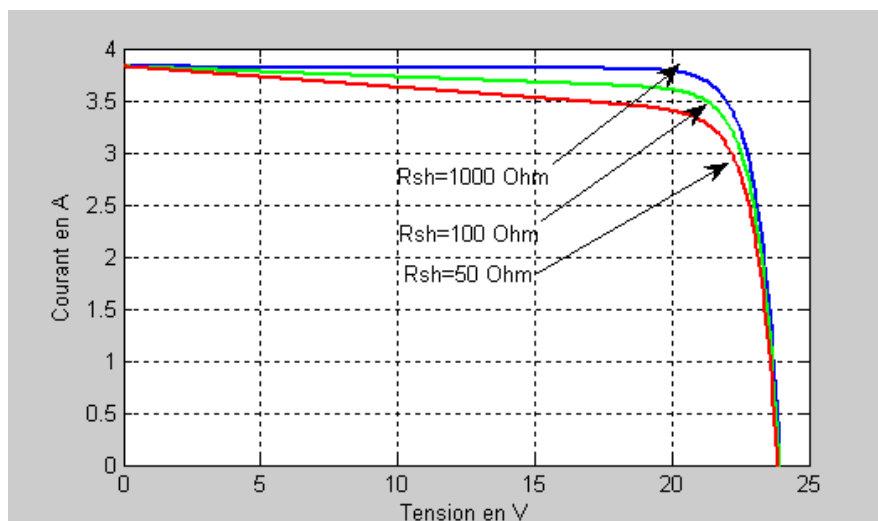


Figure 3.9 Caractéristique I - V en fonction de la température.



## II.4 Conclusion

Nous avons réalisé des simulations (I-V, en fonction de l'ensoleillement, la température, la résistance shunt) pour une cellule photovoltaïque, pour un panneau photovoltaïque. Ces simulations ont montré la similitude entre le comportement d'une cellule et d'un panneau pour les différents paramètres des simulations.

Donc, tout ce qui a été dit pour une cellule photovoltaïque, concernant son comportement en fonction du flux lumineux et de la température où l'influence de résistance shunt, ou concernant son interaction avec la charge est directement transposable en terme physique au cas d'un panneau photovoltaïque ou d'un générateur photovoltaïque. Ainsi, Le modèle utilisé permet de reconstituer correctement la caractéristique d'un générateur photovoltaïque.

## Conclusion générale

---

Les travaux présentés dans cette étude concernent, d'une façon générale, la modélisation d'un générateur photovoltaïque, à partir d'un modèle d'une cellule photovoltaïque.

Le modèle photovoltaïque est tiré du modèle G. Daniel (modèle constructeur) qui décrit le fonctionnement des panneaux en fonction des paramètres à déterminer expérimentalement dans le laboratoire. Ici, il s'agit de modules au silicium polycristallins, les plus communément utilisés.

En premier chapitre, nous avons présenté les différents modèles mathématiques pour le générateur photovoltaïque rencontré dans les références bibliographies.

Dans le chapitre de la modélisation et de la simulation du générateur photovoltaïque, nous avons réalisé dans un premier temps la simulation pour une cellule photovoltaïque avec l'influence des paramètres sur la caractéristique courant-tension.

Dans un deuxième temps, on a comparé la caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque avec celle d'une cellule.

Cette comparaison montre les points suivants :

- la caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque, elle est la même pour celle d'un panneau photovoltaïque ou d'un générateur photovoltaïque bien sûr avec un changement sur les deux axes ;
- tout ce qui a été dit pour une cellule photovoltaïque, concernant son comportement en fonction du flux lumineux et de la température où l'influence de la résistance shunt, ou concernant son interaction avec la charge est directement transposable au cas d'un panneau photovoltaïque ou d'un générateur photovoltaïque.

## **Références bibliographiques**

---

- [1] **Belhadj Mohammed** « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » Mémoire de magister, Institut des Sciences Exactes De Bechar 2008.
- [2] **Nouhou Boubacar** « Conception technico-économique d'un système de pompage autonome photovoltaïque-aérogénérateur » Mémoire en sciences appliquées, Université de MONTERAL 1999.
- [3] **Alain Daruiche Ismail** « Les perspectives des énergies renouvelables les conséquences sur l'environnement étude et application au Liban » Thèse doctorat, l'Université Paul Cézanne (Marseille III) 2004.
- [4] **Iudovic Protin et Stéphan Astier** « Convertisseurs Photovoltaïques »
- [5] **M. Stéphane** « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse doctorat de l'Université de TOULOUSE 2009.
- [6] **Bernard Equer** « Dossier photovoltaïque » Dossier de la société Française de physique, 2007.
- [7] **J.Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy** « Le pompage photovoltaïque » pages 15 à 25, 1998.
- [8] **Nichiporuk Oleksiy** « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités » Thèse doctorat présenté en 2005 à l'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.
- [9] **C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi** « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger » 2006
- [10] **N. Achaibou, A Malek , N Bacha** « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66, 2000.
- [11] **Julien Labbe** « L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés » Thèse doctorat à l'école des mines de Paris, 21 décembre 2006.
- [12] **Rémi Saisset** « Contribution à l'étude systèmes de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques » Thèse de doctorat à l'institut national de polytechnique de Toulouse 2004.
- [13] **Thomas M. Klucher** « Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces », mars 1978.
- [14] **Roshanak Radbeh** « Réalisation et caractérisation de cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones » Thèse de doctorat à l'université de Limoges en 2008.
- [15] **Alain Ricaud** « Modules et systèmes photovoltaïques » 2008.
- [16] **Ahmed Ould Mohamed Yahya** « Fonctionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation de différentes charges » Mémoire de DEA, soutenu le 22 juillet 2005 à l'UCAD de Dakar.

- [17] **Yann Pankow** « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque » thèse doctorat de l'école Nationale supérieure d'arts et métiers, 10 décembre 2004.
- [18] **D.Thévenard, and M.Ross** « Validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.
- [19] **A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm** «Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque», Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483.
- [20] **D.Saheb- Koussa et M. Haddadi** « Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans l'environnement ( Matlab ) » 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP 2007.
- [21] **W.Durisch and J.C.Mayor,**” Application of a generalized current voltage model for module solar cells to outdoor measurements on a Siemens SM110”, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 11-18, 2003 Osaka, Japan.
- [22] **Francisco M.Gonzalez-Longatt** « Model of photovoltaic module in Matlab™» 2 DO Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingenieria Electrica, Electronica y Computacion (II CIBELEC 2005).
- [23] **A. Benatiallah, R. Mostefaoui, M. Boubekri et N. Boubekri** « A simulation model for sizing PV installations » Science Direct 2007, 97-101.
- [24] **Olivier Gergaud** « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » Thèse doctorat soutenu à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan en 2002.
- [25] **A. Benatiallah et R. Mostefaoui** « logiciel de simulation PV » Revue de Energies Renouvelables, Zones Arides (2002) 55-61.
- [26] **Y. Sukamongol, S, Chungpaibulpana et W. Ongsakul** « Performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads » Renewable Energy 27 (2002), 237-258.
- [27] **O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed** « Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models », 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.
- [28] **Daniel Guasch Murillo** « Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos», thèse de doctorat soutenu à l'université polytechnique de Catalunya, Barcelone April 2003.

# Annexes

## Annexe I : Système photovoltaïque

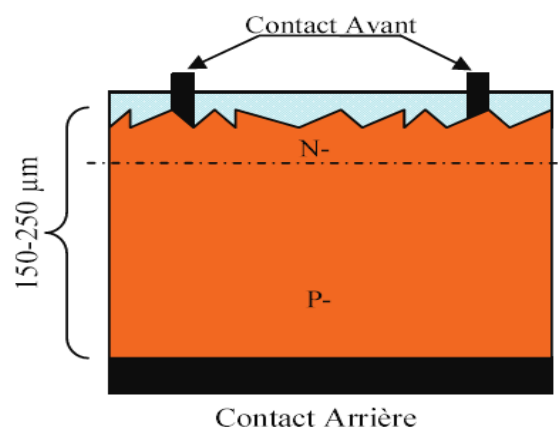
### 1. La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », découvert par E. Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs utilisés en tranches fines ou en dépôt sur un substrat. Les matériaux les plus connus sont :

- le silicium (Si)
- le sulfure de cadmium (CdS)
- l'arséniure de gallium (AsGa)
- le tellure de cadmium (Cd Te)
- le germanium (Ge)
- le phosphore d'indium (InP)
- le séléniure (CGIS)

#### a) La filière à base de Silicium cristallin

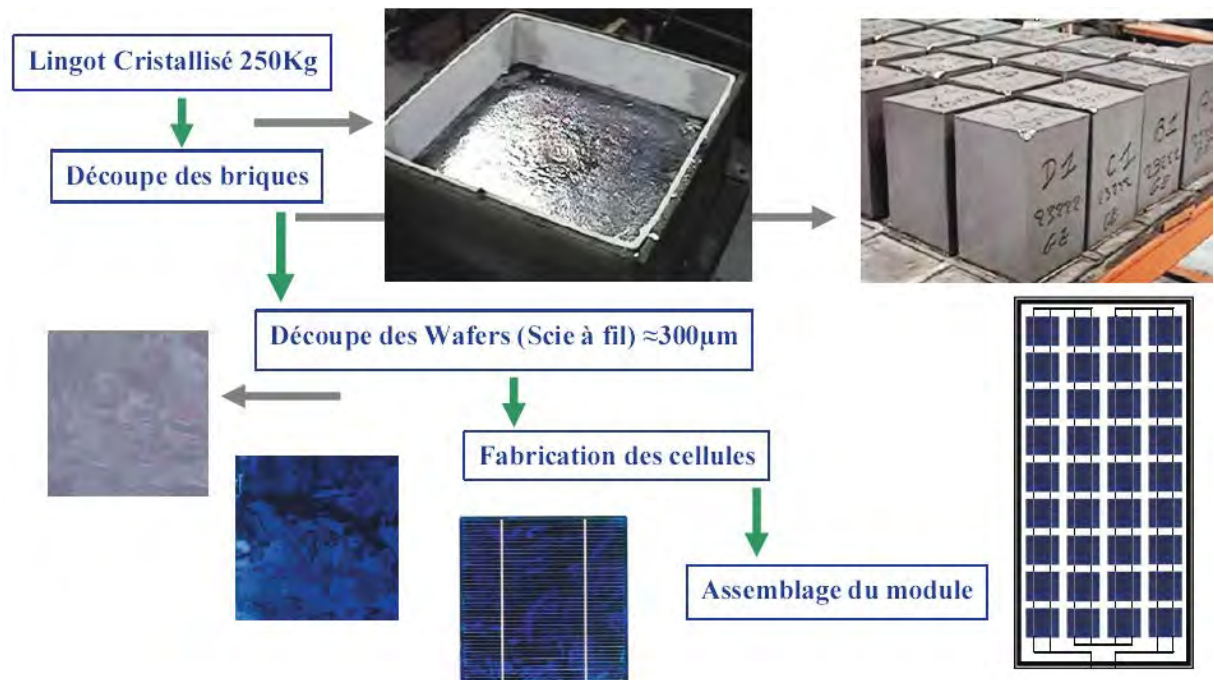
Les modules photovoltaïques basés sur silicium cristallin dominent depuis toujours le marché avec plus de 90% des ventes. Les cellules à partir de plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir de silicium monocristallin (mcSi) et celles à partir de silicium poly-cristallin (pc-Si). Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium multi-cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 24.7% contre 19.8% de rendement record sur petite cellule en laboratoire [5].



**Figure (1) :** Schéma de principe d'une cellule à base de silicium cristallin [5].

Les modules en silicium cristallin sont fabriqués industriellement. Toutes les étapes du processus de fabrication ne cessent de progresser régulièrement afin de viser le plus possible les rendements théoriques calculés tout en évitant d'augmenter le prix des modules. Il reste encore aujourd'hui un

large potentiel d'optimisation. La première étape consiste à fabriquer des lingots à base de silicium pur pour les différents processus de fusion et de cristallisation du silicium (figure I-2). Le matériau supérieur est le silicium monocristallin, typiquement produit par la méthode de Czochralski, consistant à introduire un germe préformé monocristallin dans le lingot de silicium en fusion. Le silicium se solidifie sur ce germe et garde la même organisation cristalline que celui-ci. Le matériau inférieur est le silicium poly-cristallin, produit en lingots par le biais de différents procédés de fusion et de solidification du silicium. Sa cristallisation est assurée par un contrôle drastique de la température de solidification [5,6].



**Figure (2) :** Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en silicium [5].

### b) Le rendement d'une photopile

Le rendement d'une photopile est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie solaire reçue sur l'ensemble de sa surface. Ce rendement est limité par différentes pertes thermique et électrique intervenant lors de la conversion de l'énergie [2,7].

- Absorption incomplète : Seuls les photons d'énergie supérieure à l'énergie de Gap sont absorbés dans le volume de la cellule. Les autres photons ne sont pas utilisés. Il s'agit de tous ceux dont la longueur d'onde est supérieure à la longueur d'onde critique (seuil) correspondant à la condition :

$$h \cdot \nu_{\text{critique}} \geq E_G$$

Cette perte est estimée à environ 23% dans le silicium.

- Excès d'énergie : Un grand nombre de photons absorbés possèdent d'avantage d'énergie que celle nécessaire à la génération de paire électron-trou. L'énergie en excès qu'il faudra



absorber est finalement cédée à l'électron sous forme d'énergie cinétique qu'il perd par collision sur les autres atomes du réseau cristallin ; élevant ainsi la température de la cellule. Pour le silicium, cette perte est estimée à environ 33%.

- Réflexion à la surface : Le flux de photons  $\Psi$  transmis à la photopile

$\Psi = \Psi_i \cdot (1 - R_{ef})$  ne représente qu'une fraction du flux incident  $\Psi_i$ . Cependant, la réflexion ( $R_{ef}$ ) à la surface dépend du traitement technologique de la surface du semi-conducteur. Toutefois, on y remédie en déposant sur une surface du semi- conducteur après traitement des couches antireflet ramenant ainsi la valeur moyenne de  $R^{ef}$  à moins de 4%.

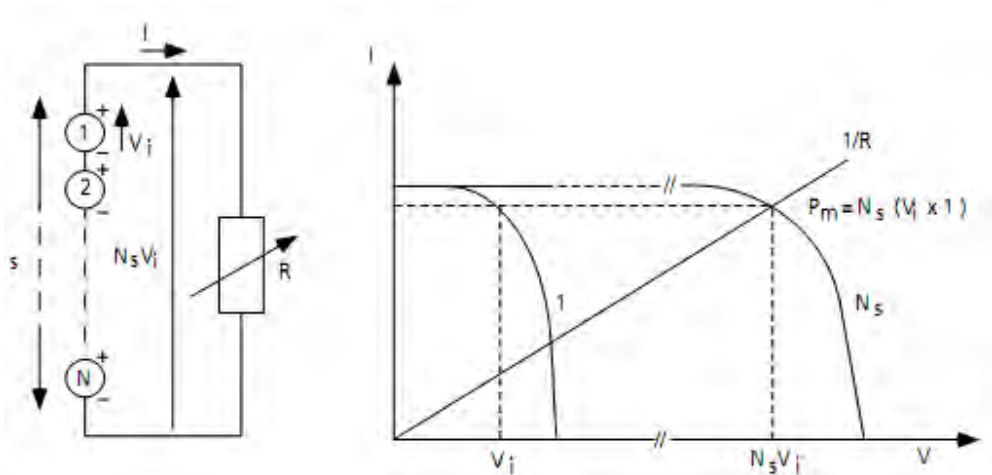
- Recombinaison : De nombreux électrons créés rencontrent des charges positives et se recombinent avant d'avoir fourni un courant utile.
- Collecte des porteurs minoritaires : La collecte du courant photovoltaïque c'est-à-dire la récupération des charges électrique ayant traversé la jonction se fait en face avant et arrière de la photopile. La face avant est constituée d'une grille qui permet la récupération des charges tout en laissant passer la lumière. La surface de cette grille ( $S^{grille}$ ) masque une partie de la face avant ( $S^{face-avant}$ ) et doit, pour ce faire, rester inférieure à un taux de 10% de la surface totale avant. Le dit taux, appelé taux d'ombre ( $\tau_s$ ) caractérise la grille est calculé par la relation :

$$\tau_s = \frac{S_{grille}}{S_{face-avant}} \leq 10\%$$

Ces différents phénomènes limitent le rendement de la photopile.

### c) Association en série

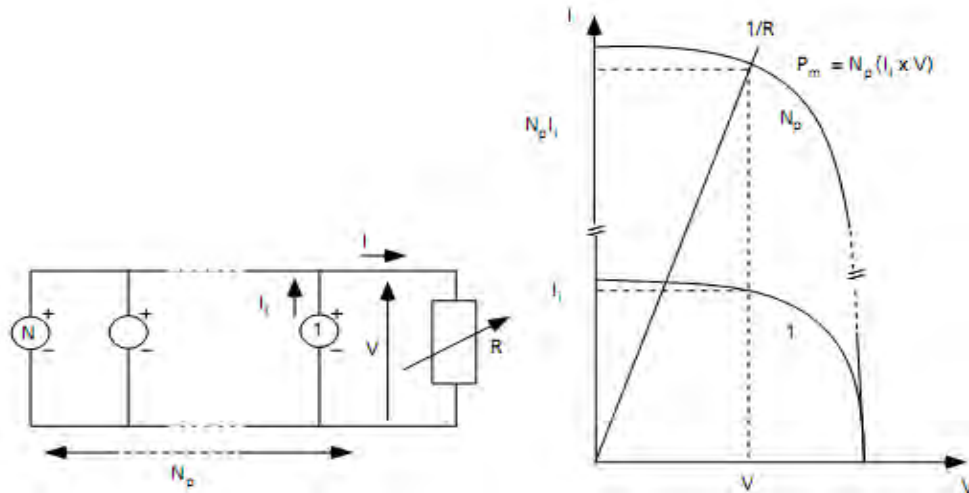
En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [7], (voir figure I.5).



**Figure (3) : cellules identiques en série**

#### d) Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [7].



**Figure (4) : cellules identiques en parallèles**

#### e) Caractéristiques d'un module

- ❖ la puissance de crête,  $P_c$  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^{\circ}\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).
- ❖ la caractéristique  $I/V$  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ❖ tension à vide,  $V_{co}$  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- ❖ courant de court-circuit,  $I_{cc}$  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- ❖ point de fonctionnement optimum,  $(U_m, I_m)$  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m * I_m$ .
- ❖ rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- ❖ facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} * I_{cc}$ .

## 2. Système de stockage

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite

d'envisager des stockages suivant les conditions météorologiques et qui vont répondre à deux fonction principales [10] :

- fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)
- fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

### a. Types d'accumulateurs

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, lorsque les puissances rencontrées sont inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique, ce stockage est largement employé dans les applications stationnaires. La technologie des accumulateurs est très diversifiée. On peut citer les principaux types [11] :

- les accumulateurs au plomb ;
- les accumulateurs au nickel à électrolyte alcalin, nickel/cadmium, nickel/hydrure métallique, nickel/hydrogène, nickel/fer ;
- les accumulateurs alcalins nickel/zinc et  $\text{MnO}_2$ /zinc ;
- les accumulateurs alcalins métal/air : air/zinc, air/fer, air/magnésium ;
- les accumulateurs scellés au sodium à électrolyte solide en alumine fonctionnant à haute température ( $300^\circ\text{C}$ ) : sodium/soufre, sodium/chlorure de nickel ;
- les accumulateurs au lithium à électrolyte sel fondu à  $450^\circ\text{C}$  :  $\text{LiAl/FeS}$  ou  $\text{FeS}_2$  ;
- les accumulateurs au lithium fonctionnant à température ambiante dont l'électrode positive est un composé d'insertion dans un oxyde métallique :
  - à électrolyte polymère solide et anode de lithium métallique en films minces  $\text{Li/MOx}$  ;
  - ou à électrolyte organique liquide ou polymère plastifié avec électrode négative à insertion  $\text{LixC}_6/\text{MOy}$  ;

### b. Les accumulateurs au plomb acide

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale.

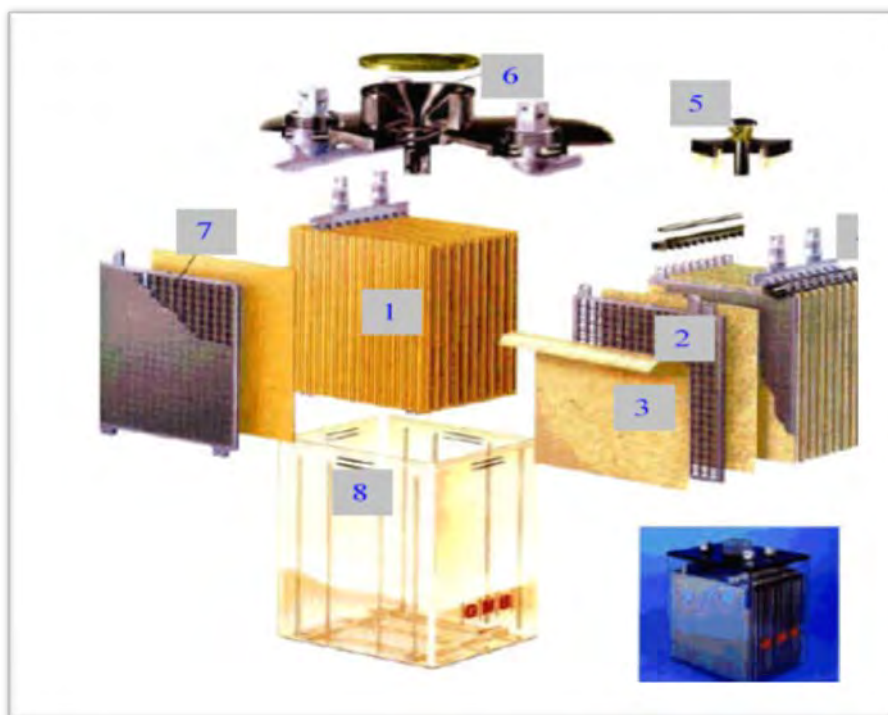
Le tableau suivant résume les principales données techniques des accumulateurs au plomb [11].

<b>Température de fonctionnement</b>	-20 à $+50^\circ\text{C}$
<b>Energie</b>	25 /45 W/kg 60/120 Wh/dm <sup>3</sup>
<b>Nombre de Cycles profonds</b>	300/1500

<b>Puissance massique</b>	80/150 W/kg
<b>Rendement<sup>I</sup></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energétique : de 60 à 95%</li> <li>Faradique : 65/100%</li> </ul>
<b>Autodécharge</b>	2 à 10% par mois à 25°C
<b>Maintenance</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>surveiller le niveau d'eau pour les batteries (ouvertes) non étanches tous les 2 mois</li> <li>sulfatation de l'électrolyte en cas de stockage prolongé ⇒ brassage</li> </ul>
<b>Impact environnemental</b>	Le plomb est toxique ⇒ recyclage (≈ 100%) par réduction des oxydes de plomb et tri pneumatique ou hydraulique des plastiques (polypropylène)
<b>Sécurité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>acide sulfurique : corrosif</li> <li>problèmes de surpression de l'hydrogène en cas de surcharge</li> </ul>

*Tableau (1) : principales données techniques de la batterie au plomb.*

### c. Composition d'une batterie solaire plomb-acide



**Figure (5) : Construction d'une batterie Plomb**

La figure (I-6) on distingue les éléments constitutifs suivants [12] :

	<b>Les séparateurs microporeux</b> : ces séparateurs présentent une porosité uniforme et
--	--

1	permettent une bonne circulation des ions tout en garantissant l'isolation électronique entre électrodes positives et négatives.
2 et 7	<p><b>Les électrodes :</b> celles-ci sont dessinées afin de présenter la plus grande surface de contact possible avec l'électrolyte. Cela permet de maximiser la puissance dé livrable par la batterie.</p> <p>La structure à p laques planes est classique (procédé Faure) : la matière active est préparée sous forme d'une pâte constituée principalement d'oxyde plomb, d'acide sulfurique et d'eau. Cette pâte est ensuite déposée sur une grille constituée d'un alliage de plomb, puis transformée électriquement pour obtenir du dioxyde de plomb (plaque positive) et du plomb spongieux (plaque négative).</p> <p>La structure à plaques positives tubulaires est de construction identique avec celle des éléments à plaques planes. La principale différence réside dans les électrodes positives réalisées sous forme de tubes. Ce qui apporte une amélioration de la durée de vie grâce à une diminution des chutes de matières actives. Mais, la résistance interne est plus élevée que pour la technologie à plaques planes, d'où un courant maximal exploitable plus faible. Par ailleurs, dans les deux structures, pour réaliser des éléments durables, la quantité de matière active doit représenter au moins deux fois la masse des matières réellement utilisées.</p>
3	<p><b>Le séparateur en fibres de verre :</b> celui-ci est combiné avec le séparateur microporeux afin d'homogénéiser les différentes concentrations dans l'électrolyte et d'augmenter l'isolation entre électrodes. En effet, les plaques positives et négatives sont isolées les unes des autres par des séparateurs non conducteurs aux propriétés spécifiques : une bonne résistance mécanique pour supporter les contraintes dues aux variations de volume des matières actives pendant les cycles de charge et de décharge, une résistance chimique suffisante (en effet la présence d'acide est très contraignante), une structure microporeuse avec une porosité d'au moins 50% pour permettre la diffusion de l'électrolyte, une faible résistance interne pour permettre des décharges à régimes élevés, un rayon de pore très faible (<math>\mu\text{m}</math>) pour éviter les transports de matière d'une électrode à l'autre et éviter ainsi des courts-circuits.</p>
	<p><b>Les collecteurs positif et négatif :</b> ce sont des barres qui collectent le courant provenant des électrodes et qui acheminent celui-ci vers les connecteurs externes.</p> <p>Leur design doit être réalisé de telle façon que le flux de courant provenant de chaque électrode soit le plus homogène possible ; la grille métallique ne sert pas seulement de support mécanique pour la matière active, mais aussi de collecteur du courant. Le Plomb est à peu près le seul métal envisageable pour la grille au regard des conditions hautement corrosives (acide sulfurique) mais n'a pas la tenue mécanique</p>

4	nécessaire. Pour améliorer la rigidité, on rajoute de l'antimoine (Sb) entre 6 et 7%. Cet alliage représente un bon compromis entre la tenue mécanique, la conductivité électrique, et une bonne adhérence entre la grille et la matière active.
5	L'orifice d'accès : celui-ci permet d'introduire un pèse-acide permettant de mesurer la densité de l'électrolyte, afin de connaître l'état interne de la batterie et de réaliser la mise à niveau de l'électrolyte.
6	<b>L'orifice d'évacuation des gaz ou soupape de sécurité</b> : cet orifice permet l'évacuation des gaz produits durant le phénomène de gassing. Il doit également empêcher une étincelle externe ou des flammes d'atteindre l'intérieur de la batterie afin d'éviter tout risque d'explosion des gaz dégagés par l'électrolyte.
8	<b>Les indicateurs de niveau d'électrolyte</b> : ces lignes indiquent les niveaux minimum et maximum d'électrolyte afin d'assurer un fonctionnement correct. L'utilisateur doit veiller à vérifier régulièrement ce niveau.

**Tableau (2)** : principales des éléments constatifs de la batterie Pb.

#### d. Principe de fonctionnement

à l'anode :  $Pb + H_2SO_4 \rightarrow Pb^{2+} + SO_4^{2-} + 2H^+ + 2e^-$   $E^0 = -0,36V$

à la cathode :  $PbO_2 + H_2SO_4 + 2e^- \rightarrow Pb^{2+} + SO_4^{2-} + 2OH^-$   $E^0 = 1,68V$

Réaction globale :  $Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \leftrightarrow 2Pb^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$   $E^0 = 2,04V$

### 3. Système de régulation

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales [15, 16 et 17] :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.



**Figure (6) :** Régulateur de charge et décharge du CRAER

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur la quelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension préréglés : seuil haut et seuil bas.

#### **4. Convertisseur**

Dans un système photovoltaïque SPV, des convertisseurs sont utilisés pour charger les batteries de stockage et pour transformer le CC en CA. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SPV : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [18].

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SPV, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement.

Les onduleurs sont des convertisseurs qui permettent la transformation de courant continue en courant alternatif. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA.



**Figure (7) :** Convertisseur continu alternatif du CREAR

Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources [18].