

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, il sera exposé les équations et les modèles mathématiques bien détaillés qui seront utilisés pour modéliser le système photovoltaïque.

Nous présenterons ensuite les différentes caractéristiques d'un système PV comme la caractéristique de courante tension, et de puissance tension .Ainsi que l'influence de température, et l'éclairement,

## II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

L'utilisation des circuits électriques équivalents nous permet la modélisation des caractéristiques d'une cellule PV[6].

### II.2.1 Modelé a paramètres constants

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé; il a été étudié par Townsend et Beckmann. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série  $R_s$ . Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique  $I(V)$  sont : le courant photonique  $I_L$ , la résistance série  $R_s$ , et deux caractéristiques de la diode  $I_0$  et  $n$ . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations  $I(V)$  pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants). D'après la loi de Kirchhoff, le courant de sortie de la cellule est :

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

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par[5] :

$$I_L = (G / G_{\text{réf}}) (I_{L,\text{ref}} + U_{\text{Isc}}(T_c + T_{c,\text{ref}})) \quad (\text{II.2})$$

Ou :

$I_{L, \text{réf}}$  : le courant photonique sous condition de référence [A]

G, Gréf : l'éclairement réels et à la condition de référence [w/m<sup>2</sup>]

$T_c$ ,  $T_{c, \text{réf}}$  : température de cellules, réels et à la condition de référence

$U_{\text{isc}}$  : coefficient de la température du courant de court-circuit [ampère/degé]

Le courant de diode est donné par l'équation de schockly :

$$I_D = I_0 [\exp(q(v + IR_s) / \gamma k T_c) - 1] \quad (\text{II.3})$$

Avec V=la tension de sortie [V].

$I_0$  ; le courant inverse de saturation [A]

$\gamma$ : Le facteur de qualité.

$R_s$  : la résistance série [ $\Omega$ ]

q : la constante de charge d'électron,  $1,602 \cdot 10^{-19} \text{c}$

K : la constante de Boltzmann,  $1,381 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$

$$I_0 = I_{0, \text{réf}} (T_c / T_{c, \text{réf}})^3 \exp[(q \varepsilon_G / k A) (\frac{1}{T_{c, \text{réf}}} - \frac{1}{T_c})] \quad (\text{II.4})$$

La caractéristique I(v) est décrite aussi par :

$$I = I_L - I_0 [\exp(q(v + I R_s) / \gamma k T_c) - 1] \quad (\text{II.5})$$

Le facteur de qualité  $\gamma$  mesure l'imperfection de la cellule il est lie au facteur d'accomplissement par :

$$\gamma = A * N_{cs} * N_s.$$

Est le nombre des cellules reliées en série par module.

Un module est défini comme un groupe de cellules, habituellement encapsulé pour la protection, lorsqu'il est délivré par le fabrication ;  $N_s$  est le nombre de modules relies en série.

Les quatre paramètre inconnus sont  $I_L, I_0, \gamma$  et  $R_s$  on avec précision les paramètre au condition de référence, alors que  $R_s$  et  $\gamma$  sont supposés être constants,  $I_L$  est en fonction de l'éclairement et de la température de la cellules et  $I_0$  est en fonction de la température[6].

### II.2.2 Evaluation des paramètres

Le fabricant fournit généralement : la tension à vide (circuit ouvert)  $V_{OC,REF}$  , le courant de court-circuit  $I_{SC,REF}$  et la tension et le courant à la puissance maximale  $V_{MP,REF}$  et  $I_{MP,réf}$ . Le procédé à suivre pour les trois paramètres  $I_{0,réf}$  ,  $I_{L,réf}$  et  $\gamma_{réf}$  est en forçant le passage de la courbe  $I(V)$  par ces trois points. Ceci est obtenu en formant un système de trois équations. Comme il sera montré, ce système peut être simplifié et une solution explicite est possible [9].

Les relations pour les points donnés sont :

Au court-circuit	$I=I_{sc}$	$V=0$
Au circuit ouvert	$I=0$	$V=V_{oc}$
à la point maximale	$I=I_{MP}$	$V=V_{MP}$

En substituant ces expressions successivement dans l'équation (II.3), le système d'équations obtenu est ;

$$I_{sc, réf} = I_{0,réf} \left[ \exp\left(\frac{qI_{sc,réf} R_s}{\gamma K T_c, réf}\right) - 1 \right] \quad (II.6)$$

$$I_{L, réf} = I_{0,réf} \left[ \exp\left(\frac{qV_{oc,réf}}{\gamma K T_c, réf}\right) - 1 \right] \quad (II.7)$$

$$I_{MP, réf} = I_{L, réf} - I_{0,réf} \left[ \exp\left(\frac{q(V_{mp,réf} + I_{mp,réf} R_s)}{\gamma K T_c, réf}\right) - 1 \right] \quad (II.8)$$

La substitution de l'équation (II.7) dans l'équation (II.8) nous donne le terme  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{q(V_{mp,réf} + I_{mp,réf} R_s - V_{oc,réf})}{K T_c, réf \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc,réf}}\right)} \quad (II.9)$$

Le schéma d'une cellule solaire peut se présenter sous diverses variantes. La configuration la plus usuelle est la suivante :

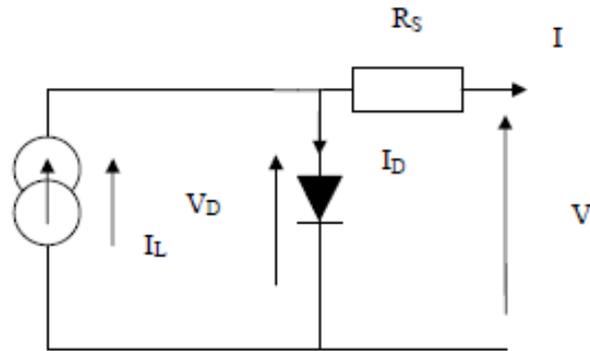


Figure II.1 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque

### II.3 MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge, les modules ont généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque [11].

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente

#### II.3.1 Cellule photovoltaïque idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode Figure II.2 qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

Après la loi de nœuds:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (II.10)$$

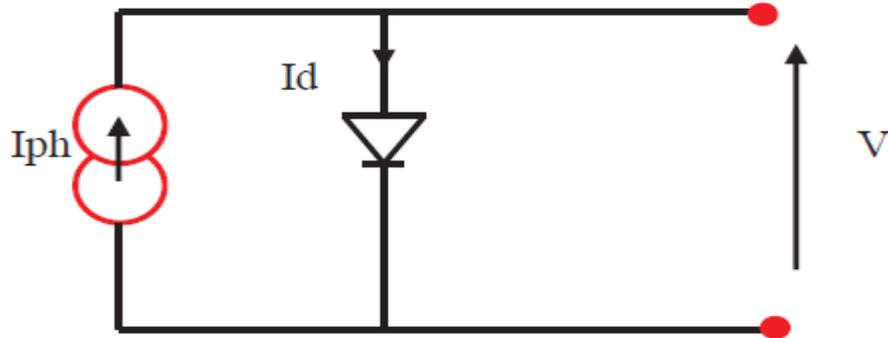


Figure II.2 : Modèle de cellule photovoltaïque idéal

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (II.11)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_o \cdot \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (II.12)$$

Avec:

$I_o$ : Le courant de saturation inverse de la diode.

$V_d$ : la tension au borne de diode

$V_t$  ( $KT/q$ ) : potentielle thermique

Donc la relation (1) sera :

$$I = I_{ph} - I_o \cdot \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (II.13)$$

### II.3.2 Cellule photovoltaïque réel

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_p$ .

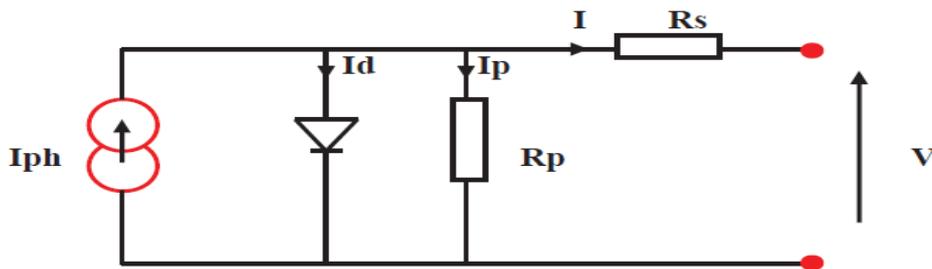


Figure II.3 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel

Donc on a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II.14})$$

$$I_p = \left( \frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (\text{II.15})$$

$$I_d = I_0 \left( \frac{V + IR_s}{V_t} \right) - 1 \quad (\text{II.16})$$

$$V_t = \frac{N_s \cdot K \cdot T}{q} \quad (\text{II.17})$$

$$I_{pv} = \frac{G}{G_m} [I_{pvn} + K_i(T - T_n)] \quad (\text{II.18})$$

$$I_0 = I_{0n} \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{K} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (\text{II.19})$$

$$I_{0n} = \frac{I_{scn}}{\exp \left( \frac{V_{ocn}}{K \cdot T_n} \right) - 1} \quad (\text{II.20})$$

Avec:

$I$  : Le courant fourni par la cellule

$I_{ph}$  : Le photo-courant dépendant de l'éclairement ( $G$ ).

$I_0$ : Le courant de saturation de la diode.

$K$  : constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  joule/Kelvin).

$q$ : charge d'électron  $= 1,602 \cdot 10^{-19}$  C.

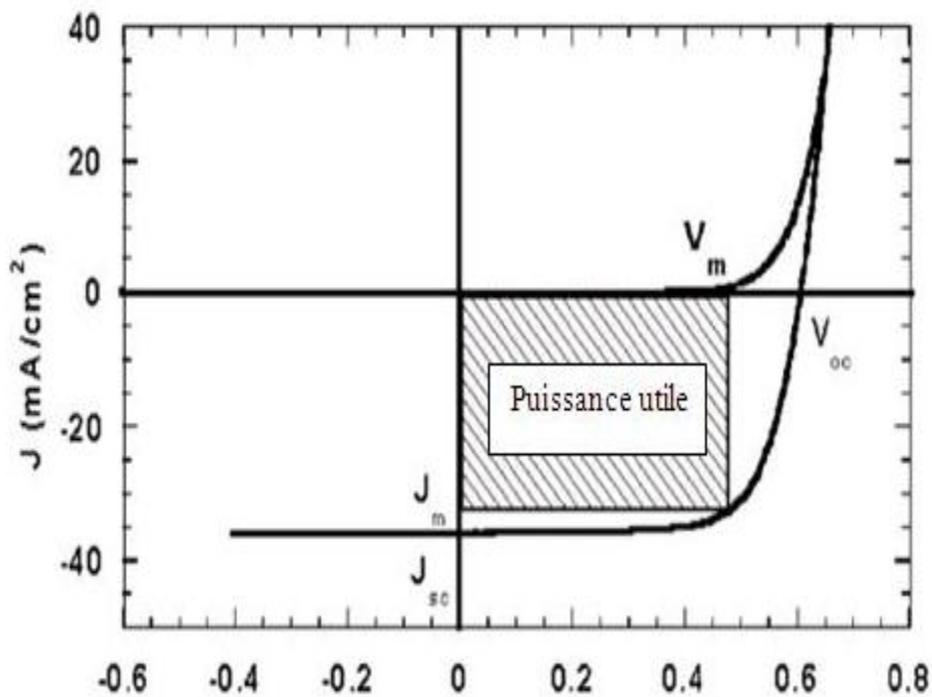
$n$ : Le facteur de qualité de diode.

$T$ : La température de cellule en kelvin.

Donc sera:

$$I = I_{ph} - \left[ \left( \frac{V + IR_s}{V_t} \right) - 1 \right] \cdot \left( \frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (\text{II.21})$$

Sur la figure (II.4) nous reportons cette caractéristique.



**Figure II.4 :** caractéristique  $I(v)$  sous obscurité et sous éclairage d'une cellule PV

### II.3.3 CARACTERISTIQUE D'UN MODULE SOLAIRE

#### II.3.3.1 Caractéristique courant - tension I(V)

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire type MSX60 d'un nombre de cellule ( $N_s=1$ ) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens

Bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante

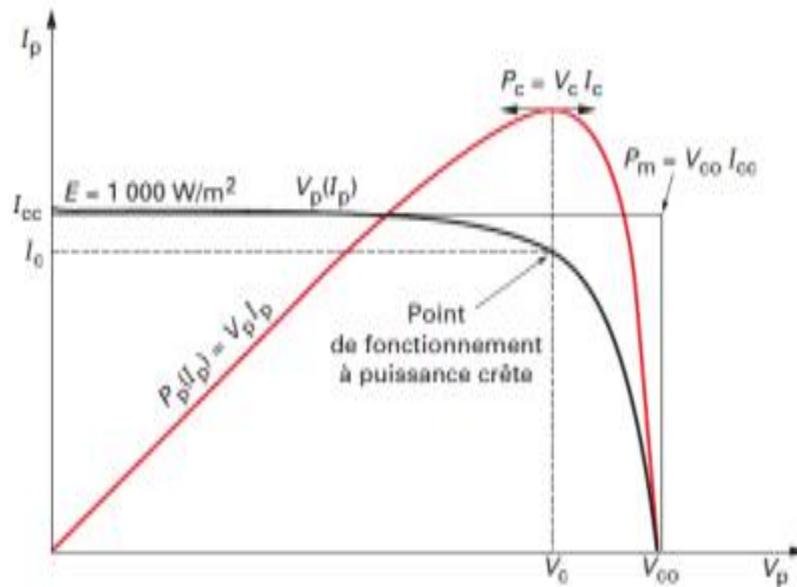


Figure II.5 : Caractéristique I(V) d'un module solaire,

#### II.3.3.2. CARACTERISTIQUE PUISSANCE - TENSION (P-V)

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes

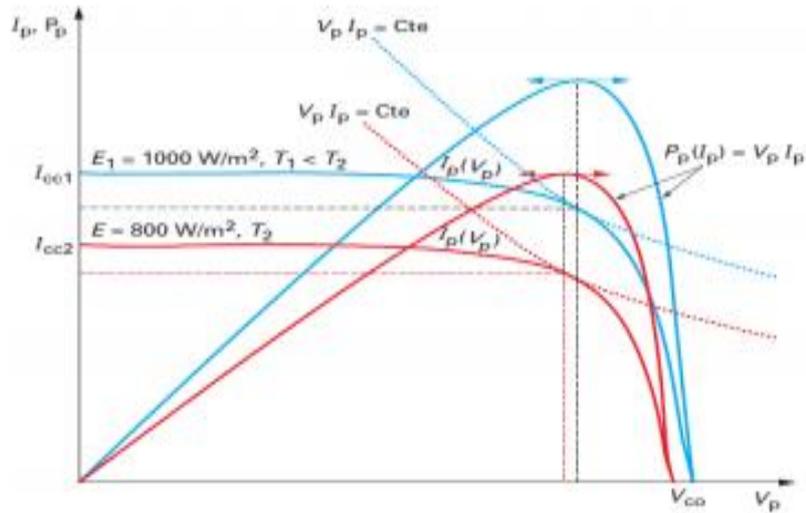


Figure II.6 : Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

## II.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation mathématique d'une cellule photovoltaïque. La caractérisation du modèle de la photopile paraît intéressante, l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur les caractéristiques  $I(V)$ ,  $P(V)$  a été abordée.