

---

# Modélisation des dispositifs photovoltaïques

## (Cellule, module et générateur)

---

### 2.1. Introduction

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

Pour développer un circuit électrique équivalent précis pour une cellule solaire, 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. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

### 2.2. Circuits électrique et modèles mathématique caractérisant les cellules solaires

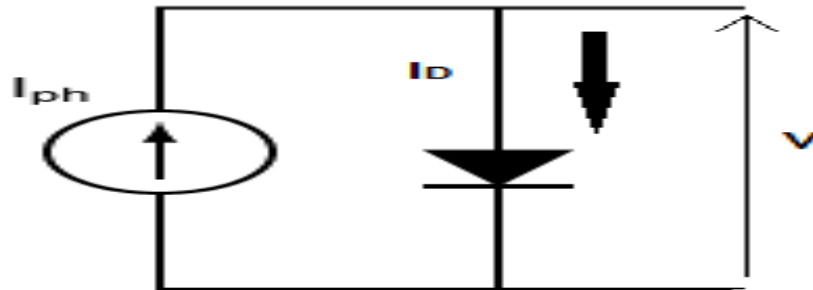
L'utilisation d'un circuit électrique équivalent c'est-à-dire l'association des composants électriques comme: Source, résistance, diode, pour modéliser une cellule photovoltaïque est fréquemment utilisé afin de décrire sa comportement électrique. Dans l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique.

#### 2.2.1. Modèle idéal

Les schémas de la figure (2.1) présentent les circuits électriques équivalents cellule solaire idéale sous éclairage.

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du d'un phénomène de diffusion figure (2.1). Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire

se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. La source de courant produit le photo-courant  $I_{ph}$ , qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire  $G$ . L'équation de la caractéristique courant-tension I-V du circuit équivalent simplifié est déduite à partir de la loi de Kirchhoff (première loi de Kirchhoff : la somme de tous les courants entrant et sortant d'un point est égale à zéro)



**Figure 2.1.** Circuit électrique équivalent du modèle idéal.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V}{m \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (2.1)$$

Ou

$I_{ph}$  est le photo courant (en A),  $I_0$  est le courant de saturation inverse (en A),

$m$  est le facteur d'idéalité de la diode et  $V_t$  est la tension thermodynamique (en mV)

### 2.2.1.1. Modèle à trois paramètres

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  (eq.2.1) proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode [11.12].

Le schéma du circuit électrique équivalent de la cellule pour ce modèle est représenté par la figure (2.1).

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à l'unité. L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I = I_{ph} - I_D \quad (2.2)$$

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

$$I_D = I_0 \left( \exp \left( \frac{V_D}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (2.3)$$

Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V}{m \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (2.4)$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression:

$$I_0 = I_{0_{Ref}} \left( \frac{T_C}{T_{C_{Ref}}} \right)^3 \exp \left( \left( \frac{E_g}{mK} \right) \left( \frac{1}{T_{C_{Ref}}} \right) - \left( \frac{1}{T_C} \right) \right) \quad (2.5)$$

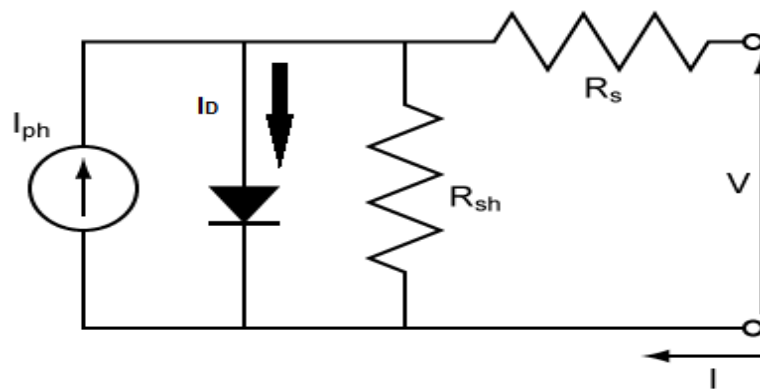
### 2.2.2. Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établi par Shocky pour une seule cellule PV. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. Une description plus simple est obtenue à partir du modèle à une exponentielle. Ce modèle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui implique que ce modèle comporte dans l'équation de la caractéristique courant- tension une exponentielle de moins[13].

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheets). Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires.

Il tient compte non seulement des pertes en tension exprimées par la résistance série  $R_s$ , mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle  $R_{sh}$  voir figure (2.2).

Il est à signaler que la résistance parallèle  $R_{sh}$  est en générale très élevée, et lorsqu'elle est trop faible, la cellule solaire ne donnera plus de tension sous faible éclairement.



**Figure 2.2.** Circuit électrique équivalent du modèle à une diode

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{V + I.R_s}{m.V_t}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

### 2.2.2.1. Modèle à trois paramètres

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  (eq.2.6) proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Il est connu aussi sous le nom L3P (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Parameters). Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode[11.12].

Le schéma du circuit électrique équivalent de la cellule pour ce modèle est représenté par la figure (2.2) avec :  $(R_s \approx 0, R_{sh} \rightarrow \infty)$

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à l'unité. L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I = I_{ph} - I_D \quad (2.7)$$

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

$$I_D = I_0 \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (2.8)$$

Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V}{m.V_t}\right) - 1 \right) \quad (2.9)$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression:

$$I_0 = I_{0\text{Ref}} \left( \frac{T_C}{T_{C\text{Ref}}} \right)^3 \exp \left( \left( \frac{E_g}{mK} \right) \left( \frac{1}{T_{C\text{Ref}}} \right) - \left( \frac{1}{T_C} \right) \right) \quad (2.10)$$

#### 2.2.2.2. Modèle à quatre paramètres

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé; il a été étudié par Townsend. 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  $R_s$  et ( $R_{sh} \rightarrow \infty$ ).

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique  $I(V)$  sont ( $I_{ph}, I_0, m, R_s$ ) le photo-courant  $I_{ph}$  (eq.2.6), la résistance série  $R_s$ , et deux caractéristiques de la diode, et  $m$ . 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) [14].

Le schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque pour ce modèle est représenté sur la figure (2.2) :

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{mVt} \right) - 1 \right) \quad (2.11)$$

#### 2.2.2.3. Modèle à cinq paramètres

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (2.2) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt, une résistance série. Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants:  $m, I_{ph}$  (eq.2.6),  $R_s, R_{sh}$  et  $I_0$ . Il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism, Parameters).

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2.12)$$

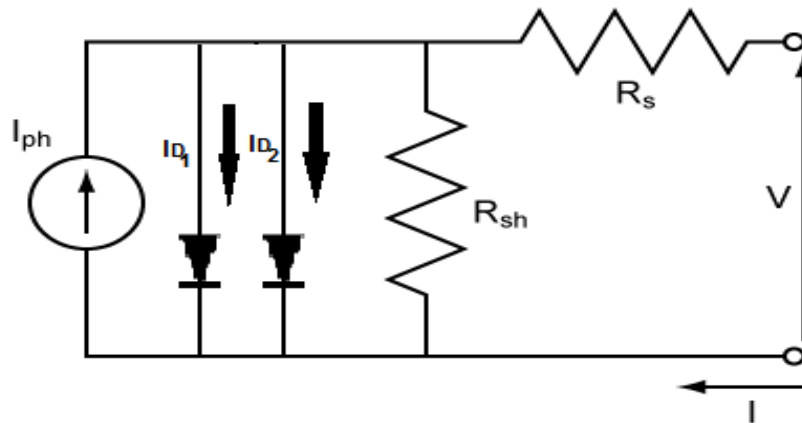
Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{m \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (2.13)$$

### 2.2.3. Modèle à deux diodes

Le circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes est donné sur la figure (2.3) ce modèle est dit le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes).

Le modèle à deux diodes (eq.2.3) est composé de deux exponentielles, la première tient compte du phénomène de diffusion, tandis que la deuxième exponentielle correspond au phénomène de recombinaison, dans la région de déplétion, par les niveaux profonds.



**Figure 2.3.** Circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( \exp \left( \frac{V}{m_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - I_{02} \left( \exp \left( \frac{V}{m_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.14)$$

avec  $m_1=1$  et  $m_2=2$  (sont les facteurs d'idéalité),  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  sont les courant de saturation inverse (en A).

#### 2.2.3.1. Modèle à cinq paramètres

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit du modèle à six paramètres représenté sur la figure (2.3) et le nom du modèle dans ce cas est

2M5P (Lumped, 2 Mechanism model with 5 Parameters). Cette simplification se traduit par supposer que la résistance shunt est infinie, et la résistance série est nulle [14].

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{01}$  (équation (2.14)) et  $I_{02}$ , les facteurs de diode  $m_1$  et  $m_2$ , une source de courant produisant un photo-courant  $I_{ph}$  (eq.2.15) qui dépend de l'éclairement solaire et de la température. L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} \quad (2.15)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( \exp \left( \frac{V}{m_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - I_{02} \left( \exp \left( \frac{V}{m_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (2.16)$$

### 2.2.3.2. Modèle à six paramètres

Si la résistance shunt est considérée infinie ( $R_{sh} = \infty$ ), le nombre de paramètres à déterminer devient 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P (Lumped, 2 Mechanism model with 6 Parameters). Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances donc le courant qui la traverse est négligeable. Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{01}$  et  $I_{02}$ , les facteurs de diode  $m_1$  et  $m_2$ , une source de courant produisant un photo-courant  $I_{ph}$  qui dépend de l'éclairement solaire et de la résistance série  $R_s$  [14].

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} \quad (2.17)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ e^{\frac{V + I \cdot R_s}{m_1 \cdot V_t}} - 1 \right] - I_{02} \left[ e^{\frac{V + I \cdot R_s}{m_2 \cdot V_t}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.18)$$

### 2.2.3.3. Modèle à sept paramètres

Il est connu aussi par le nom 2M7P (Lumped, 2 Mechanism model with 7 Parameters). Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent de la figure (2.3). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{01}$  et  $I_{02}$ , les

facteurs de diode  $m_1$  et  $m_2$ , une source de courant produisant un photo-courant qui dépend de l'éclairement solaire.

La résistance série  $R_s$  rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal. Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique  $I(V)$  pour une tension  $V$  égale à  $V_{oc}$ . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle  $R_{sh}$  traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [15.11].

Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (2.19)$$

Avec:

$I_{ph}$  est le photo courant (en A)

$I_{D1}$  est le courant de la diode 1 (en A),

$I_{D2}$  est le courant de la diode 2 (en A).

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

$$I_{D1} = I_{01} \left( \exp \left( \frac{V_D}{m_1 V_t} \right) - 1 \right) \quad (2.20)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left( \exp \left( \frac{V_d}{m_2 V_t} \right) - 1 \right) \quad (2.21)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.22)$$



Avec :

$Vt = \frac{KT_C}{q}$  : représentant la tension thermodynamique (si . $T=25^{\circ}\text{C}=300^{\circ}\text{K}$ ,  $Vt=25\text{mV}$ )

$q$  est la charge de l'électron,  $1.602 \times 10^{-19}$  (en C)

$k$  est la constante de Boltzmann,  $1.38 \times 10^{-23}$  (en J/K)

$I_{sh}$  est le courant de la résistance de shunt (en A)

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ e^{\frac{V+I.R_s}{m_1.Vt}} - 1 \right] - I_{02} \left[ e^{\frac{V+I.R_s}{m_2.Vt}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (2.23)$$

Le photo-courant lié à l'éclairement, à la température et au photo courant mesuré aux conditions de référence est donné par:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{Ref}} \left( I_{phRef} - \mu_{CC} (T_C - T_{CRef}) \right) \quad (2.24)$$

Avec

$I_{phRef}$  est le photo courant sous condition de référence (en A).

$\mu_{CC}$  est le Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température.

$G, G_{Ref}$  est L'éclairement réels et à la condition de référence (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$T_C, T_{CRef}$  est La température de cellule, réelle et à la condition de référence

Les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$  sont donnés par les relations suivantes :

$$I_{01} = C_{s1} T_C^3 \exp \left( \frac{-E_g \cdot q}{m_1 TK} \right) \quad (2.25)$$

$$I_{02} = C_{s2} T_C^{3/2} \exp \left( \frac{-E_g \cdot q}{m_2 TK} \right) \quad (2.26)$$

Les constantes  $C_{s1}$  et  $C_{s2}$  sont généralement comprises respectivement entre  $150 - 180 \text{ A.K}^{-3}$  et  $1,3 - 1,7 \times 10^{-2} \text{ A.K}^{-5/2}$  pour une cellule d'une surface de  $100 \text{ cm}^2$ .

Une valeur du facteur d'idéalité différent de l'unité est associée à un mécanisme de recombinaison prédominant et elle dépend de la nature et de la position des niveaux pièges.

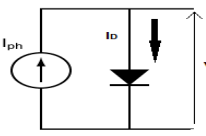
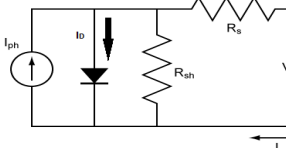
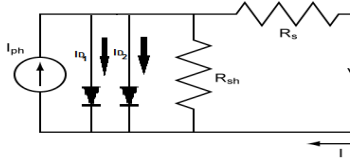
- $m=1$ : La zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal).
- $1 < m < 2$ : Le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et  $m$  dépend de la polarisation .

- $m=2$  : Les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.
- $2 < m < 4$ : Les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface.

$E_g$  est l'énergie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV)

#### 2.2.4. Récapitulatif des différents modèles du circuit

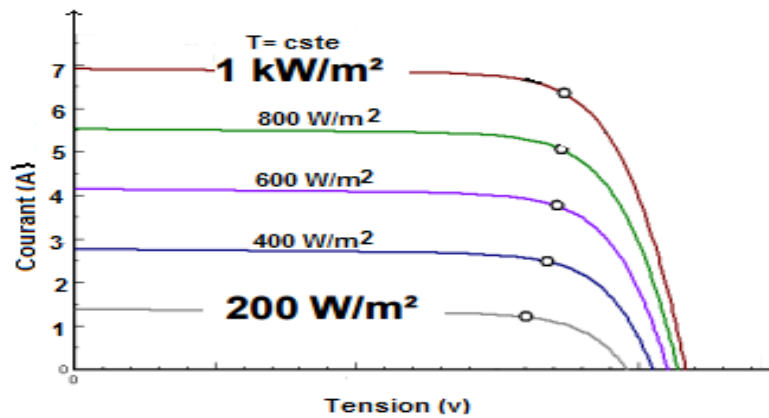
Le tableau 2.1 regroupe les différents modèles mathématiques avec leurs circuits électriques équivalant et les paramètres de chaque modèle.

Circuit Electrique équiva- lent  modèle	ideal	à 1 diode	à 2 diodes
	 $I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{m \cdot V_t} \right) - 1 \right)$	 $I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{m \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right)$	 $I = I_{ph} - I_{01} \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{m_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - I_{02} \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{m_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right)$
3 paramètres	$I_{ph}, I_0, m$	$I_{ph}, I_0, m$ ( $R_s \approx 0, R_{sh} \rightarrow \infty$ )	
4 paramètres		$I_{ph}, I_0, m, R_s$ ( $R_{sh} \rightarrow \infty$ )	
5 paramètres		$I_{ph}, I_0, m, R_s, R_{sh}$	a) $I_{ph}, I_{01}, I_{02}, R_s, R_{sh}$ ( $m_1 = 1, m_2 = 2$ ) ou b) $I_{ph}, I_{01}, I_{02}, m_1, m_2$ ( $R_s \approx 0, R_{sh} \rightarrow \infty$ )
6 paramètres			$I_{ph}, I_{01}, I_{02}, m_1, m_2, R_s$ ( $R_{sh} \rightarrow \infty$ )
7 paramètres			$I_{ph}, I_{01}, I_{02}, m_1, m_2, R_s, R_{sh}$

**Tableau 2.1.** Les différents modèles mathématiques et électriques d'une cellule solaire

### 2.3. Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V

En faisant varier l'éclairement entre 200 et 1000 avec un pas de 200, la caractéristique I-V est donnée par la figure (2.4).

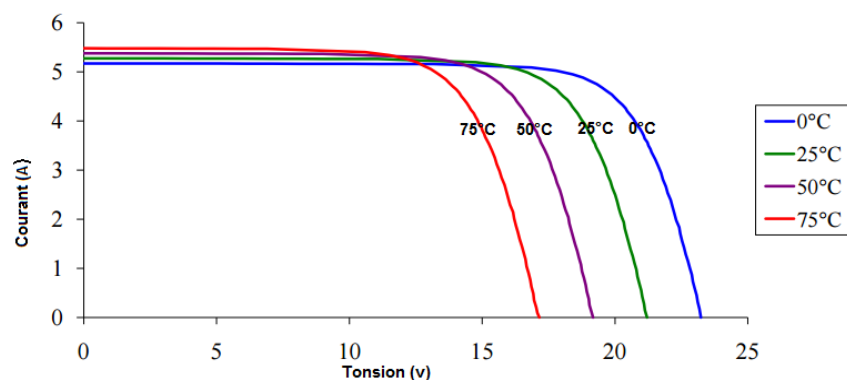


**Figure 2.4.** Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V

D'après la Figure (2.4), on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement  $G$  et une faible diminution de la tension du circuit ouvert [16].

### 2.4. Effet de la température sur la caractéristique I-V

En faisant varier la température entre ( $0^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$ ) avec un pas de  $25^{\circ}\text{C}$  l'influence de celle-ci sur la caractéristique I-V est donnée par la figure (2.5), avec un éclairement  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ . On constate d'après la figure (2.5) que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit-ouvert du générateur photovoltaïque, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant[16].



**Figure 2.5.** Effet de la température sur la caractéristique I(V)

## 2.5. Influence de la résistance série $R_s$ sur la caractéristique I-V

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit. L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance [16].

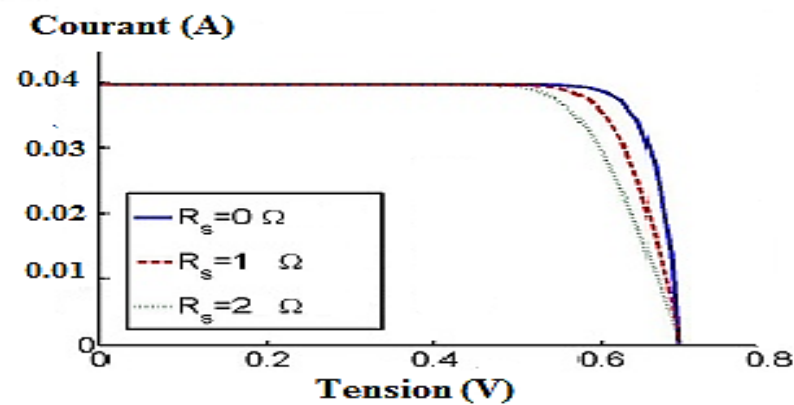


Figure 2.6. Influence de  $R_s$  sur la caractéristique I-V

## 2.6. Effet de la résistance shunt $R_{sh}$ sur la caractéristique I-V

L'existence de fissures et de défauts de structure complexe devient le siège de phénomène physique assimilable à une résistance shunt, qui apparaît en parallèle sur le schéma électrique. Cette résistance shunt est liée directement aux processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs. La figure 2.7 montre que cette influence se traduit par une soustraction du photo-courant.

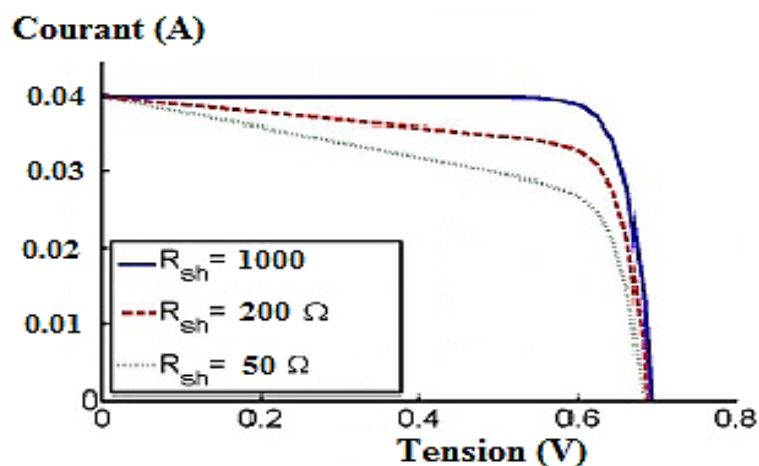


Figure 2.7. Influence de  $R_{sh}$  sur la caractéristique I-V

En effet l'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe I-V de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant[16].

## 2.7. Effet du photo-courant $I_{ph}$ la caractéristique I-V

Le photo-courant  $I_{ph}$  d'une cellule solaire définit la quantité des paires électron-trou créé traversant la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous.

D'après la figure (2.6), nous remarquons que  $I_{ph}$  influe surtout sur le courant de court-circuit, et non sur la tension de circuit ouvert [16].

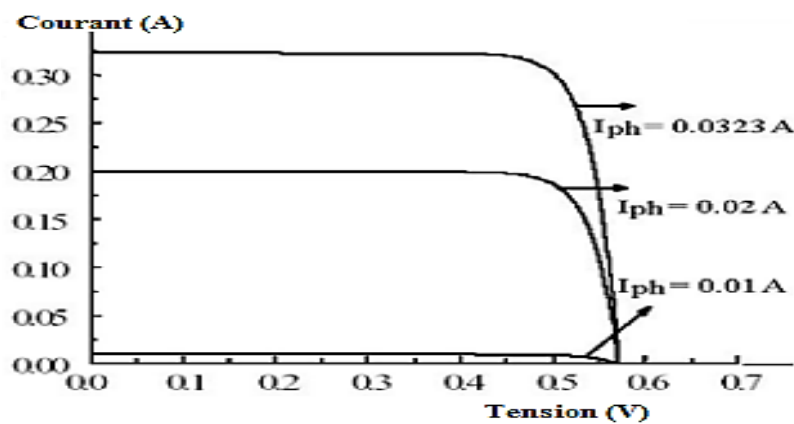


Figure 2.8. Influence de  $I_{ph}$  sur la caractéristique I-V

## 2.8. Effet des courants $I_{01}$ et $I_{02}$ sur la caractéristique I-V

D'après la figure (2.9), nous remarquons que pour un facteur de qualité  $n$  donné, l'influence du courant de diffusion  $I_{02}$  est prépondérante devant celle du courant de recombinaison  $I_{01}$ . Et pour une grande valeur du facteur de qualité de la diode, de grandes valeurs du rendement  $\eta$  peuvent être obtenues avec une cellule solaire caractérisée par un courant de recombinaison  $I_{01}$  important et un courant de diffusion  $I_{02}$  faible de l'ordre de  $10^{-13} \text{ A/cm}^2$  [16].

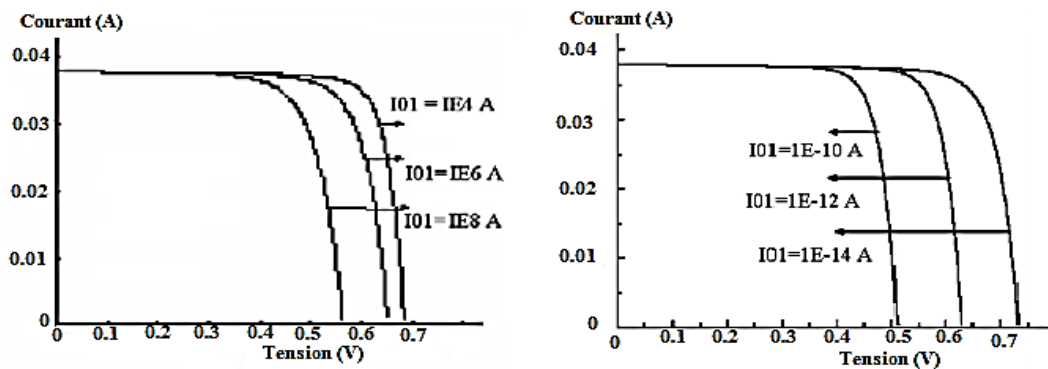


Figure 2.9. Influence des courants de saturation  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  sur la caractéristique I-V

## 2.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les circuits électriques équivalents et les modèles mathématique caractérisant les cellules solaires (module photovoltaïque), et on à présenter aussi l'effet des donnée météorologiques (éclairage et température) et les paramètres suivant  $R_s, R_{sh}, I_{01}, I_{02}, I_{ph}$  sur la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire.

Nous avons vu que la cellule solaire présente une caractéristique  $I(V)$  non linéaire donc il est possible d'identifier les paramètres interne d'une cellule solaire.