

Modelisation et protection des modules photovoltaïques

2.1 Introduction

L'énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10000W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

2.2 Modèle électrique idéal

Le modèle électrique idéal d'une cellule photovoltaïque peut être représenté par le circuit électrique équivalent donné par la figure (2.1) composé d'un courant photonique I_{ph} , une diode parallèle qui correspond à l'aire de transition P-N du module PV et une résistance en série.

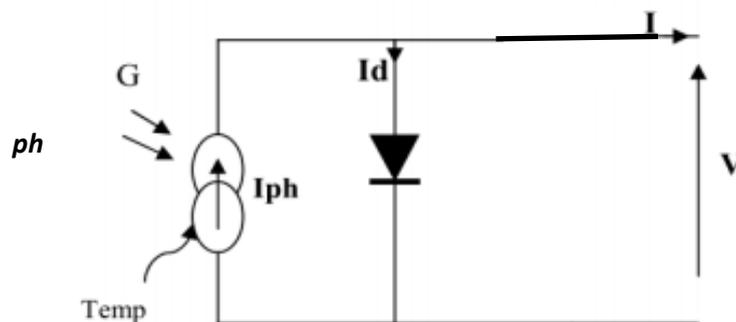


Figure 2.1 Circuit équivalent de la cellule PV modèle idéal [14].

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2-1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (2-2)$$

Avec :

I : Courant fourni par la cellule [A].

V : Tension à la borne de la cellule [V].

I_{ph} : Le photo-courant, proportionnel à l'irradiance.

I_0 : Le courant de saturation de diode.

$V_t = (nK_b T/q)$: Tension thermique de la diode. T(K) est la température, n est le facteur d'idéalité de diode, K_b la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/°K) et q la charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C).

2.3 Modèle à une diode

Ce modèle contient une source de courant I_{ph} qui représente l'ensoleillement reçu par la cellule et une diode pour modéliser la jonction PN de la cellule. La résistance série R_s et la résistance shunt R_{sh} représente l'état non idéal de la cellule. La résistance série représente la résistivité du matériau dans lequel est fabriquée la cellule, la résistance de contact entre métal et semi-conducteur et la résistance d'interconnexion entre cellules. La résistance parallèle représente tous les chemins traversés par le courant de fuite.

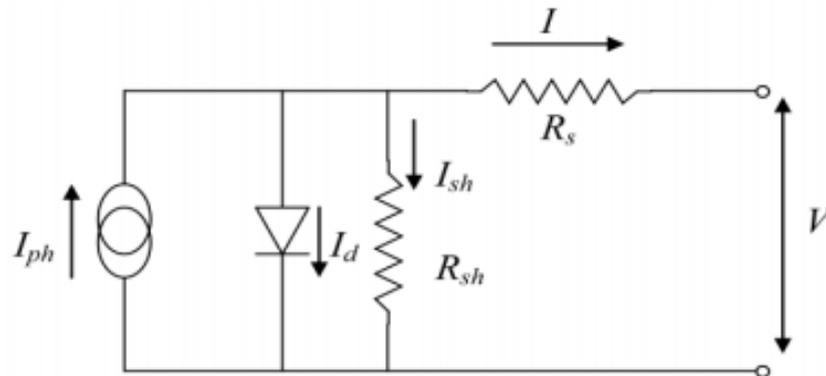


Figure 2.2 Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode [14].

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.3)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

I : Courant fourni par la cellule [A].

V : Tension à la borne de la cellule [V].

I_{ph} : Le photo-courant, proportionnel à l'irradiance.

I_0 : Le courant de saturation de diode.

R_s : Résistance série [ohm].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [ohm].

$V_t = (nK_b T/q)$: Tension thermique de la diode.

$T(K)$ est la température, n est le facteur d'idéalité de diode, K_b la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$) et q la charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

2.4 Modèle à deux diodes

La figure (2.3) représente le circuit équivalent d'une cellule solaire, réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes de courants de saturation I_{01} et I_{02} et de facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire. La résistance série R_s tient compte de la résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal. La résistance parallèle R_{sh} traduit la présence d'un courant de fuite dans la jonction.

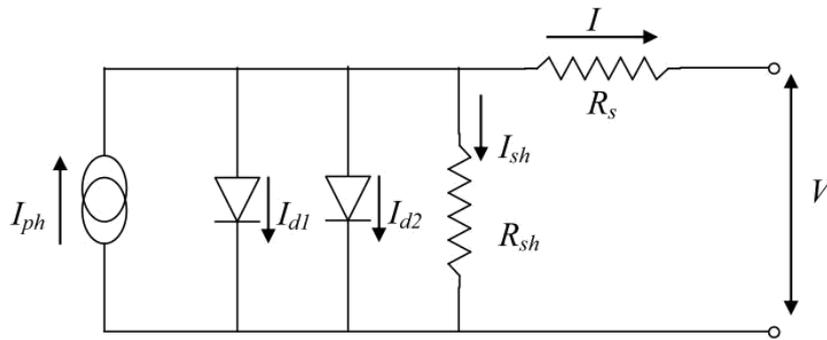


Figure 2.3 Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diode [14].

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (2-5)$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{n_1 K_b T}\right) - 1 \right] - I_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{n_2 K_b T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2-6)$$

Avec :

I_{01} (A) correspondant au courant de saturation de la diode1,

I_{02} (A) correspondant au courant de saturation de la diode2,

K_b ($1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), la constante de Boltzmann,

T (K), la température effective de la cellule,

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

n_1 , le facteur de non idéalité de la jonction de la diode1,

n_2 , le facteur de non idéalité de la jonction de la diode2,

I (A), le courant fourni par la cellule,

V (V), la tension aux bornes de la cellule,

R_{Sh} (Ω), la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction,

R_S (Ω), la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

2.3. Les paramètres d'une cellule Photovoltaïques

Il existe de nombreux paramètres qui permettent caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. La figure (2.2) représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque a jonction PN. Le trace de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètre physiques caractéristiques du composant les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit(I_{cc}), la tension a circuit ouvert (V_{co}) et la puissance maximale.

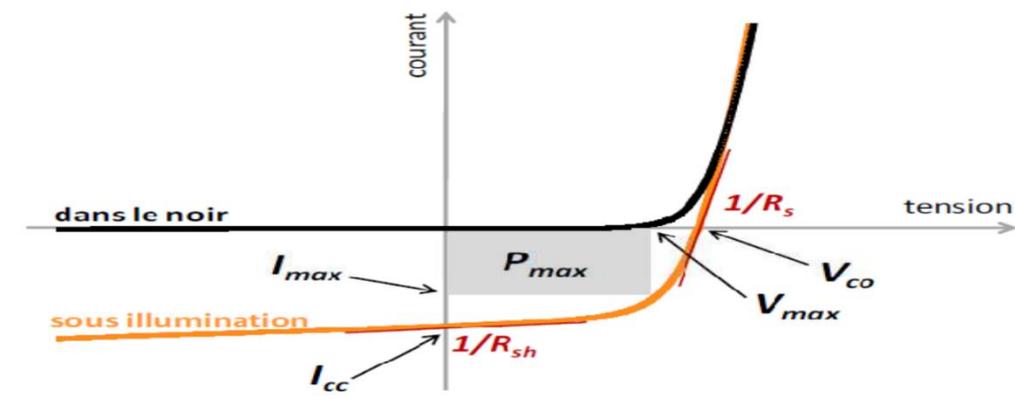


Figure 2. 2. Caractéristique courant tension et paramètre physique d'une cellule PV.

2.3.1 Le courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle.

Dans le cas idéal (R_S nulle et R_{SH} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (2.7), on obtient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\left(\frac{q \cdot (V_{pv} + R_S \cdot I_{pv})}{n \cdot k \cdot T_C} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_S \cdot I_{pv}}{R_{SH}} \quad (2.7)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_{sat} \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{n.k.T_c} \right)} - 1 \right)$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_S}{R_{SH}}} \quad (2.8)$$

Il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

2.3.2 La tension de circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension V_{co} pour laquelle, le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{CC} - I_{sat} \left(e^{\left(\frac{q \cdot V_{pv}}{n.k.T_c} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_{SH}} \quad (2.9)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à

$$V_{co} = V_{th} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right) \quad (2.10)$$

Où :
$$V_{th} = \frac{n.k.T_c}{V_{pv}}$$

2.3.3 Le courant optimal

C'est le courant pour lequel la puissance est maximale noté : I_{OP}

2.3.4 La tension optimale

C'est la tension pour laquelle la puissance est maximale noté : V_{OP}

2.3.5 Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement $P_{max}(I_{OP}, V_{OP})$ de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{CO}).

2.3.6 La puissance maximale idéale

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale $P_{max\text{ idéale}}$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} :

$$P_{max\text{ idéale}} = I_{cc} \times V_{co} \quad (2.11)$$

En réalité, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum V_{OP} est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{CO} , de même que le courant fourni I_{OP} est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{CC} .

2.4. Caractéristique d'une cellule Photovoltaïques:

2.4.1 Caractéristique courant-tension :

C'est une caractéristique fondamentale de la cellule solaire, 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 (2.3).

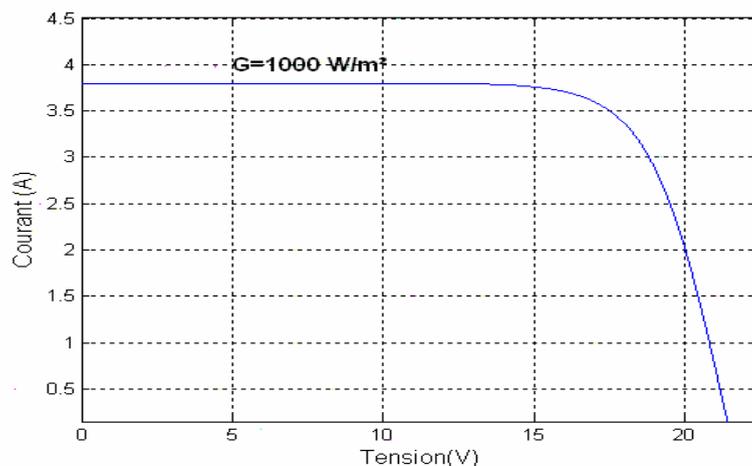


Figure 2.3. Caractéristique I(V) d'une cellule solaire, T=25°C.

2.4.2 Zone de fonctionnement :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe I (V) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (2.4) représente trois zones essentielles [9] :

- ✓ **La zone (I)**: où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- ✓ **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre

les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

- ✓ **La zone (III) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

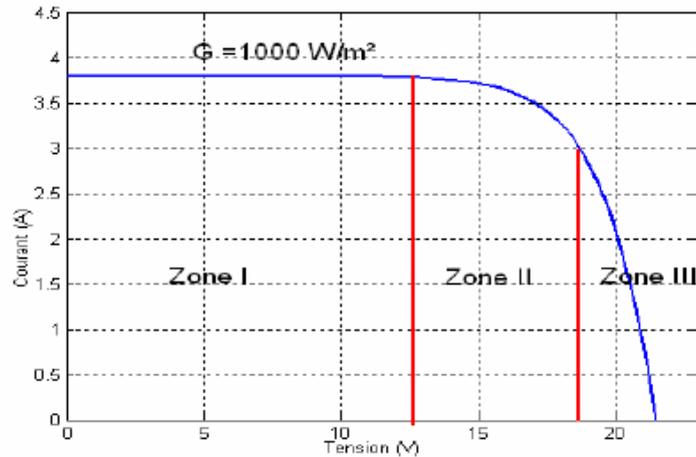


Figure 2.4. Les différentes zones de la caractéristique I(V), T=25°C.

2.4.3 Caractéristique Puissance-Tension

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 (2.5).

Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

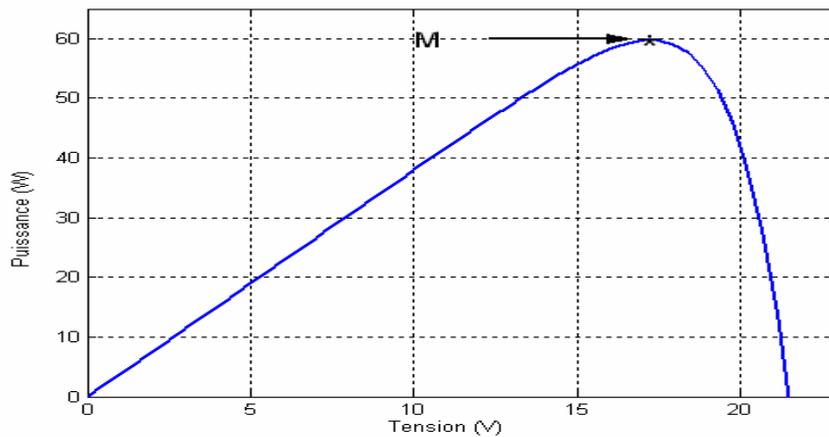


Figure 2.5. Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, T=25°C [10].

2.4.4 Facteur de forme

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF).

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{\max} et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} \times V_{OC}$.

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [22]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (2.12)$$

2.4.5 Rendement

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incident, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (2.13)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

2.5 Résolution du modèle de la cellule

L'équation de la cellule est non linéaire, elle ne peut être résolue analytiquement, on lui appliquera la méthode de Newton-Raphson.

1. $F(x)=0$
2. Condition initiale
3. Critère d'arrêt ϵ

4. La récurrence est donnée par $x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$

La Figure(2.6) montre la caractéristique I-V d'une cellule PV obtenue à partir de l'algorithme proposé. Ces paramètres sont indiqués sur la figure même.

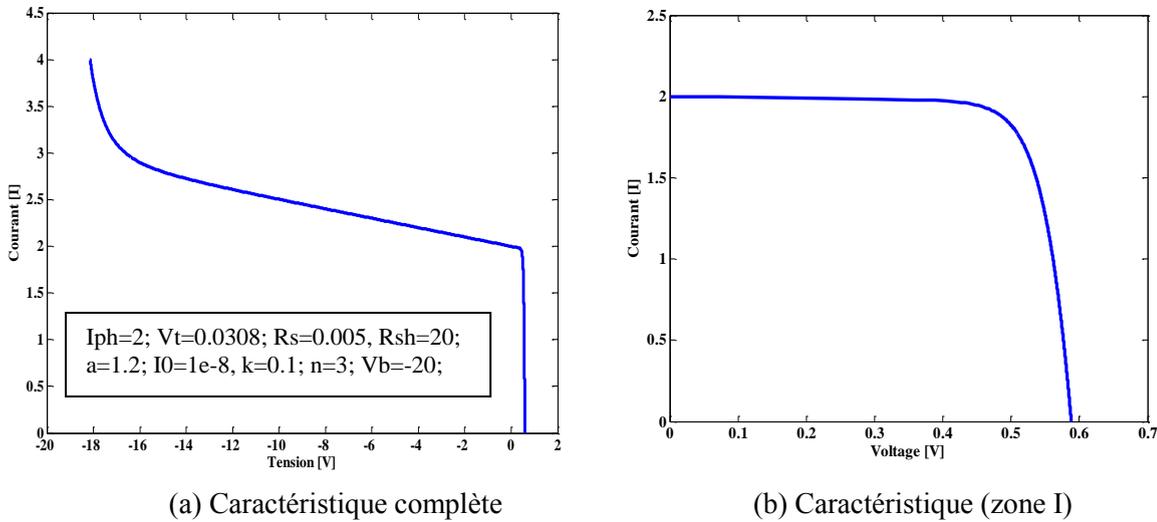


Figure 2.6 Caractéristique I-V d'une cellule PV.

2.6 Modèle d'un module & d'un générateur PV

Le module ou panneau est un assemblage de cellules en série tandis que le générateur PV est groupement en série et/ou en parallèle de modules PV.

2.6.1 Modèle d'un module (Panneau) PV

Le module photovoltaïque est un groupement de cellules raccordés en série, la tension d'un module ainsi que le courant sont respectivement donnés par :

$$I_M = I \quad (2.15)$$

$$V_M = N_s \cdot xV \quad (2.16)$$

N_s : Nombre de cellules en série

L'équation 2.4 devient

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{N_s V + R_s \cdot I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{N_s V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2.17)$$

2.6.2 Modèle d'un générateur (champ)PV

Dans le générateur photovoltaïque les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". En fonction de la puissance désirée, les panneaux eux-

mêmes peuvent être assemblés pour constituer le champ (générateur) photovoltaïque.

$$I_{GPV} = N_p \times I \quad (2.18)$$

$$V_{GPV} = N_s \times V \quad (2.19)$$

$$R_{GPV} = N_s \times R_s / N_p \quad (2.20)$$

N_p : Nombre de modules en parallèles.

N_s : Nombre de modules en séries.

2.7 Effet de la variation des paramètres internes

2.7.1. Effet de la variation de résistance en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Les figures ci-dessous montrent la caractéristique résultante (I_{scc}, V_{sco}) obtenue en associant en série (indices) N_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}) :

$$I_{scc} = I_{cc} \text{ et } V_{sco} = N_s \times V_{co} \quad (2.21)$$

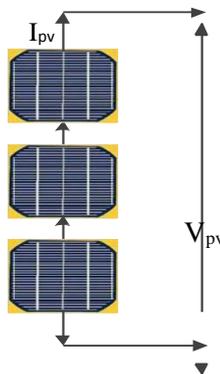


Figure 2.7 Schéma de cellules photovoltaïques associées en série

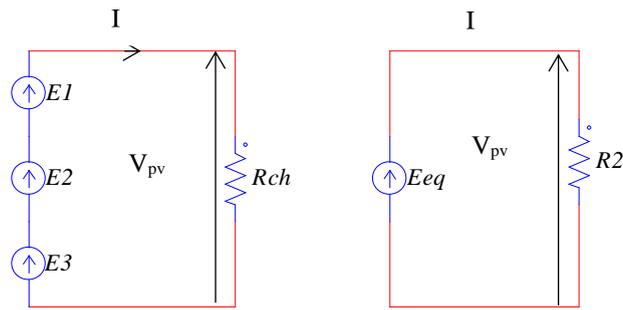


Figure 2.8 Schéma équivalente électrique de cellules photovoltaïques associées en série.

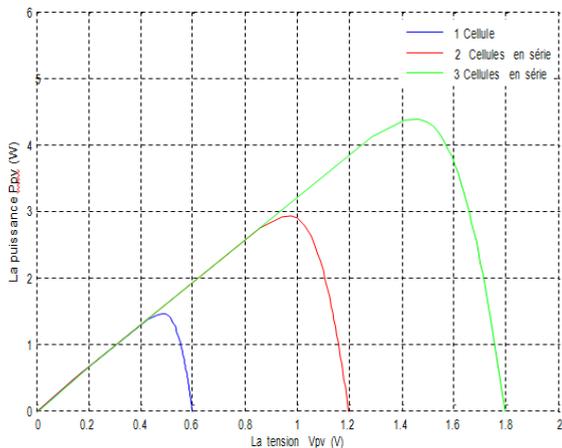


Figure 2.9 Caractéristique P-V des cellules Photovoltaïques raccordées en série.

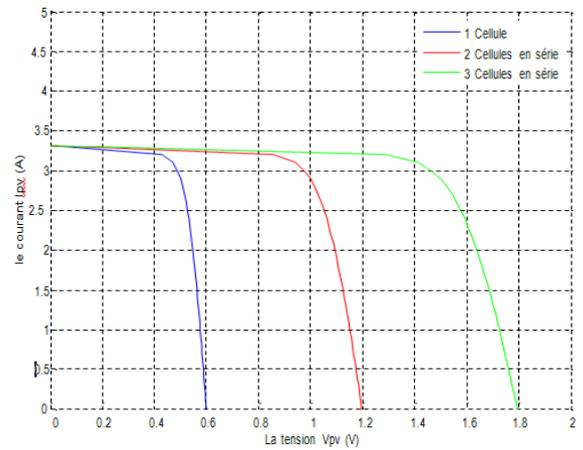


Figure 2.10 Caractéristique I-V des cellules Photovoltaïques raccordées en série.

La plupart des panneaux photovoltaïques commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules photovoltaïques connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du générateur photovoltaïque en cas de défaut partiel.

2.7.2 Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. Les figures ci-dessous montrent les caractéristiques résultantes (I_{PCC} , V_{PCO}) obtenues en associant en parallèle (indice p) N_p cellules identiques:

$$I_{PCC} = N_p \times I_{CC} \text{ et } V_{PCO} = V_{CO} \quad (2.22)$$

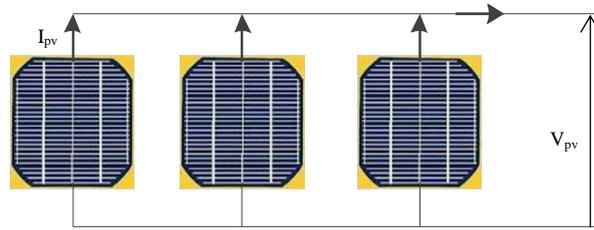


Figure 2. 18. Schéma de cellules photovoltaïques associées en parallèle.

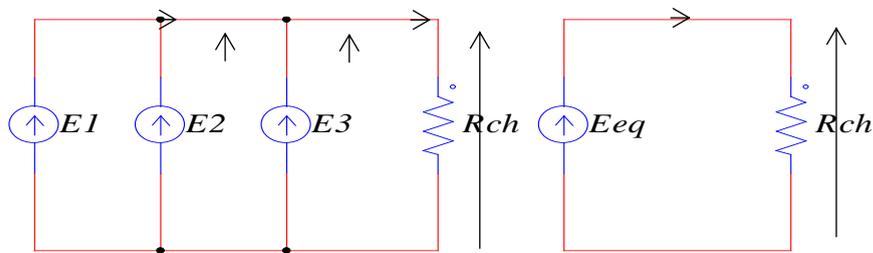


Figure 2.19. Schéma électrique de cellules photovoltaïques associées en parallèle.

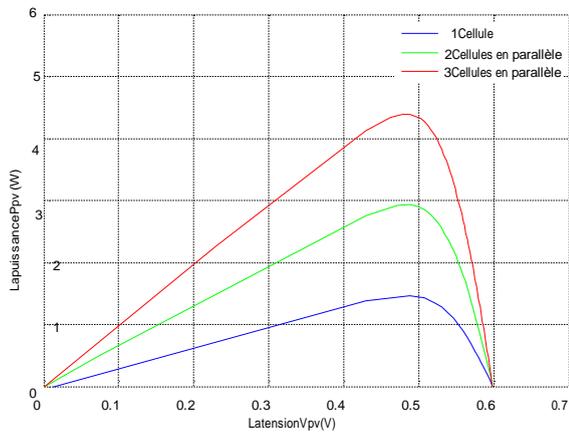


Figure 2.20. Caractéristique P-V des cellules PV Raccordées en parallèle

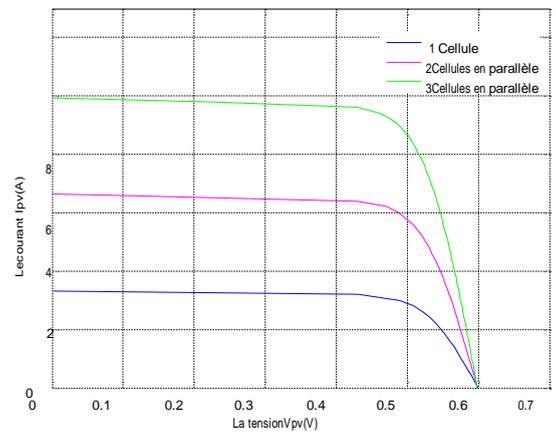


Figure 2.21. Caractéristique I-V des Cellules PV raccordées en parallèle

2.8. Effet de la variation de l'ensoleillement et de la température

L'adaptation des équations avec différents niveaux d'éclairement et de températures sont données par :

$$\Delta T = T - T_r$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{E}{E_r} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_r} - 1 \right) I_{sc}$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I$$

$$V = V_r + \Delta V$$

$$I = I_r + \Delta I$$

-Le courant de court circuit dépend de la variation du l'ensoleillement et de la température.

$$I_{cc} = E/E_r \cdot I_{cc-r} (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

-La variation de Voc en fonction de la température

$$V_{oc} = V_{oc-r} (1 + \beta \cdot \Delta T)$$

α : Coefficient de variation du courant par la température

β : Coefficient de variation de la tension par la température

2.8.1 Effet de la variation de l'ensoleillement

L'augmentation de l'éclairement provoque le déplacement de la caractéristique suivant l'axe des courants, car l'accroissement du courant de court-circuit est plus important que celui de la tension de circuit ouvert parce que le premier est une fonction linéaire et le second est une fonction logarithmique [15].

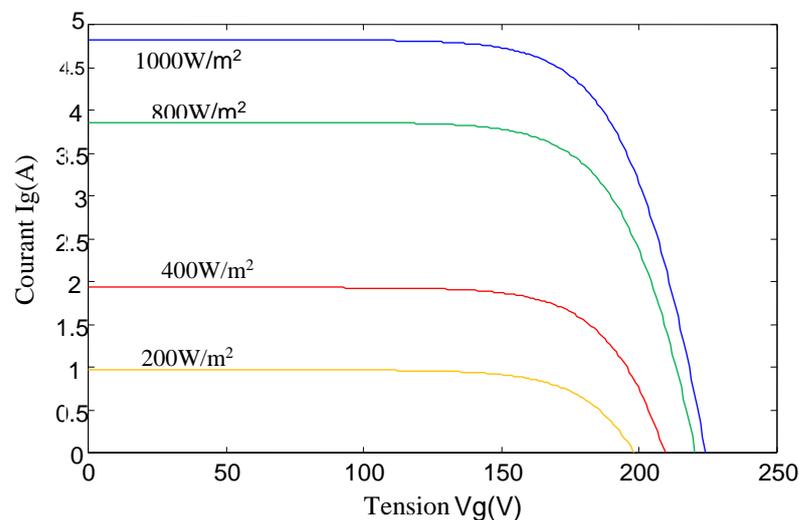


Figure 2.22 Influence de l'éclairement I-V.

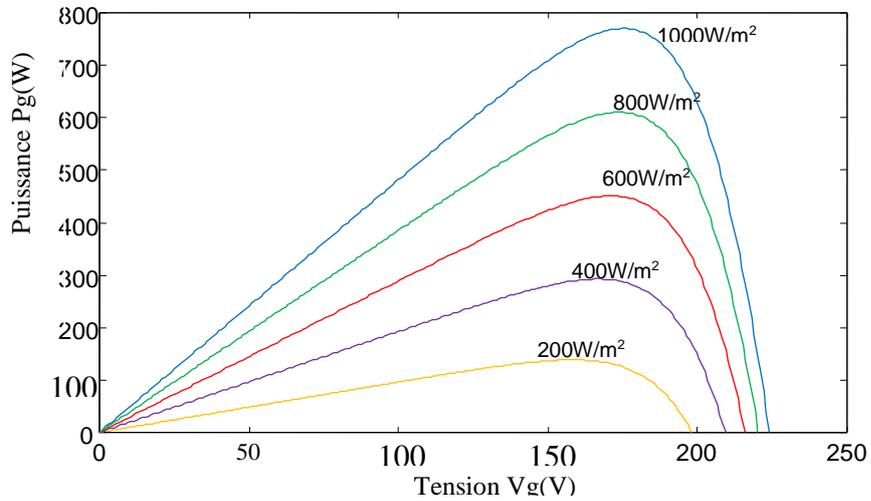


Figure 2.23 Influence de l'éclairement P-V.

2.8.2 Effet de la variation de la température

Si la température de la cellule augmente, le courant généré augmente par suite de la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Cette augmentation est de $0.190 \text{ V}/^\circ\text{C}$, le courant direct dans la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite, il s'ensuit une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 millivolts par degré et la puissance maximale disponible diminue de 0.35% par $(^\circ\text{C})$. Ce faisceau de courbe se trace à un éclairement fixe, $E=1000 \text{ W}/\text{m}^2$ [14].

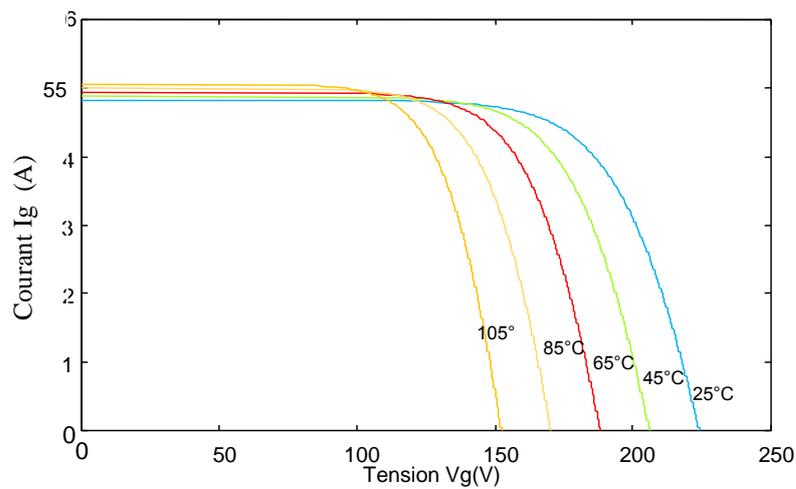


Figure 2.24 Effet de la variation de la température sur les caractéristiques P-V.

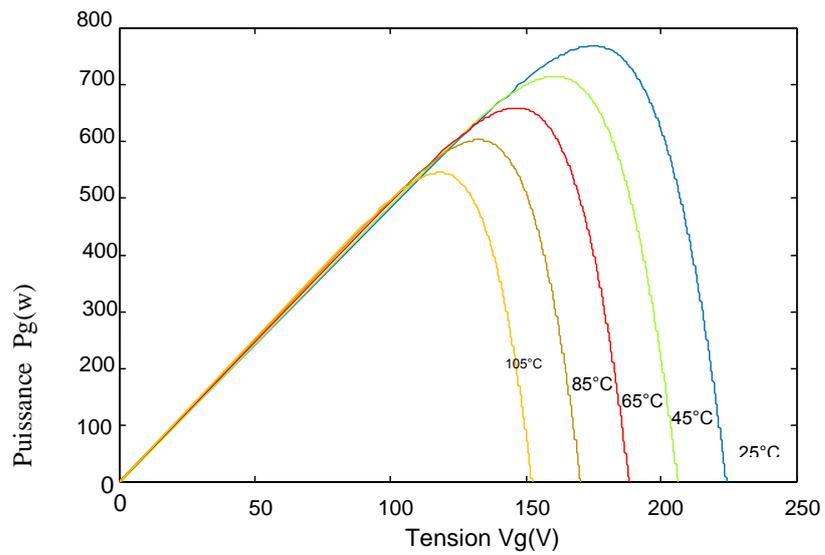


Figure 2.25 Effet de la variation de la température sur les caractéristiques P-V.

2.8.3 Effet simultané de l'éclairement et la température

En pratique, une variation importante de l'éclairement entraînerait forcément une variation de température, les faisceaux de courbe sont illustrés sur les figures ci-dessous

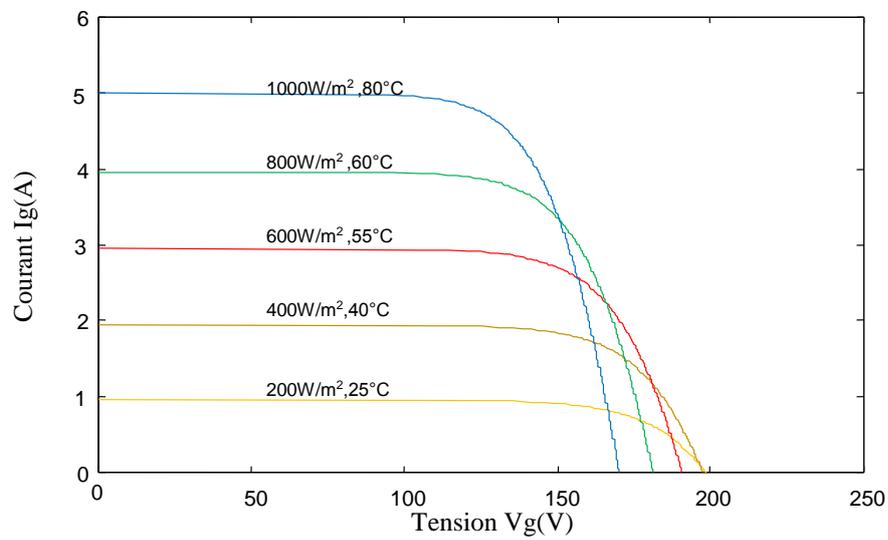


Figure 2.26 Effet simultané de l'éclairement et la température sur les caractéristiques I-V.

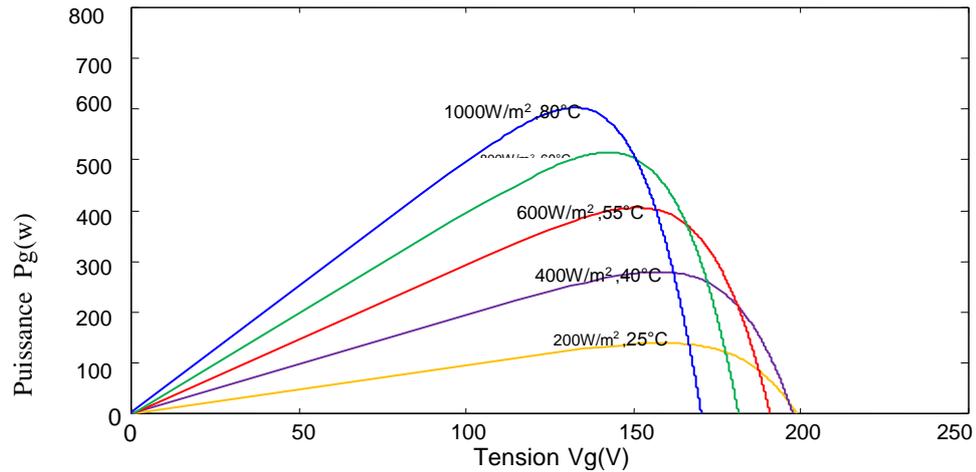


Figure 2.27 Effet simultané de l'éclairement et la température sur les caractéristiques P-V.

2.9 Protections classiques d'un GPV :

Lorsque nous concevons un panneau photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette panneau afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles [2]:

- ✚ La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit [1].
- ✚ Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées [1].

Nous rappelons dans les paragraphes suivants le fonctionnement de ces deux protections.

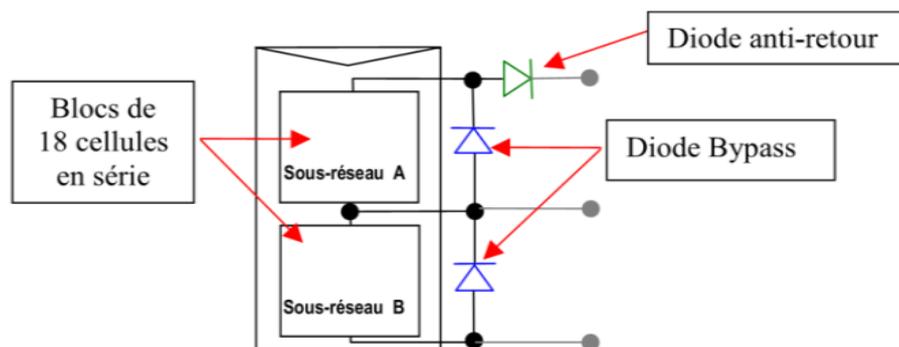


Figure 2.28 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [2].

2.9.1 Diode By-pass

Il est possible, par exemple sous l'effet d'un ombrage ou de la température que toutes les cellules placées en série n'aient pas les mêmes caractéristiques, et les cellules grises (moins ombrées) ne seront pas en mesure de produire autant de courant que les cellules non ombrées, créant ainsi des déséquilibres et des échauffements ou même déformer ou éclater la plaque en verre des panneaux [3]. Par ailleurs, quand un module devient grisé sa diode de dérivation devient «polarisée» et commence à conduire. Tout le courant supérieur au nouveau courant de court-circuit de la cellule ombragée est «court-circuité» par la diode, cela réduit considérablement la quantité de chauffage local à la zone ombrée. En fin lors d'un assemblage de cellules PV en série, il est nécessaire de mettre une diode de by-pass pour empêcher le fonctionnement dans la zone II (en inverse) d'une cellule ombrée et ainsi empêcher la destruction de celle-ci. Notons que dans les faits, pour des raisons économiques et de simplicité de réalisation, une diode de by-pass est placée en parallèle de chaque groupe de 18 cellules constituant le module [3].

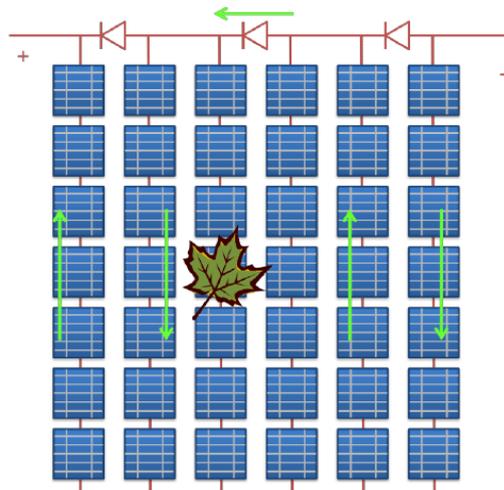


Figure2.29 Protection par la mise en place d'une diode de by-pass [16].

2.9.2 Diode anti-retour

Pour empêcher le retour du courant électrique vers le module PV pendant l'obscurité (éviter la décharge des accumulateurs à travers les panneaux photovoltaïques), des diodes anti-retour sont placées entre le module et les batteries. Ce phénomène a également été remarqué dans les installations photovoltaïques ayant plusieurs strings en parallèle mais cette fois le courant circule dans les strings ayant une tension supérieure au string ayant une tension inférieure. Il se produit entre les strings du champ photovoltaïque, en raison de :

l'inégalité des modules, ou l'ombrage ou à cause des défauts d'un string. Pour éviter ces courants inverses dans le champ PV, des diodes anti-retour sont placées en tête de chaque string en série pour isoler temporairement ou définitivement le string en défaut des autres strings, comme est représenté sur la figure (I-11) [3].

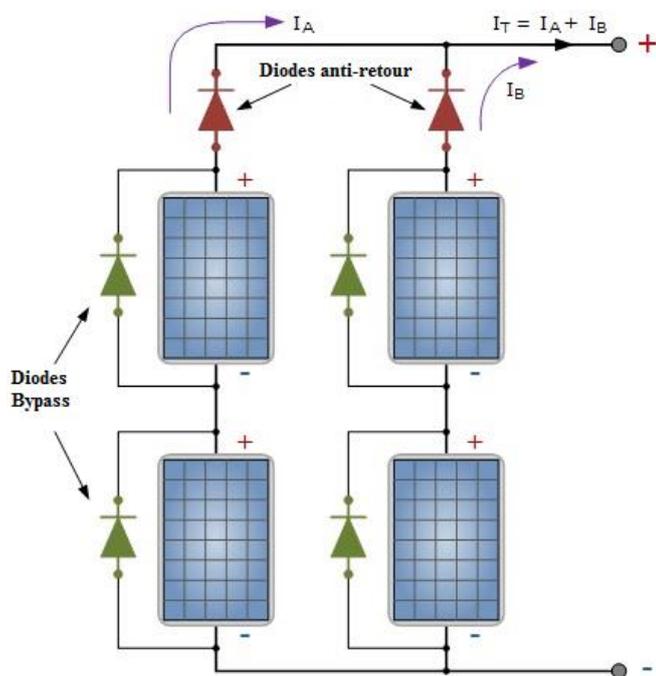


Figure2.30 Système photovoltaïque, protection par la mise en place d'une diode d'anti-retour [15].