

2.1 Introduction

Les modules photovoltaïques ont pour rôle de convertir l'énergie solaire incidente en électricité. Quand elles reçoivent une certaine quantité de lumière, les surfaces photovoltaïques (cellules ou films minces) intégrées dans un module (appelé aussi capteur ou panneau) se mettent à produire de l'électricité sous forme de courant continu. Dans ce chapitre nous présentons la modélisation d'un générateur PV, l'influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ et la protection des modules PV constituant le générateur par l'utilisation des diodes by-pass et diodes anti-retour.

2.1 Module photovoltaïque

Les puissances demandées par les charges couramment utilisées nécessitent conjointement des tensions et des courants supérieurs à ceux que peuvent fournir les cellules élémentaires (0,6 volt et 7.34A)[15], et il faut donc envisager des groupements de plusieurs cellules. Dans la pratique les connexions sont effectuées au niveau des modules regroupant un certain nombre de cellules généralement connectées en série. Ces modules sont les éléments de base du champ photovoltaïque et l'encapsulation ainsi réalisée va avoir deux rôles principaux :

- La protection des cellules vis-à-vis des variations atmosphériques extérieures pour que leurs durées de vie soient significatives.
- Le contrôle de la température des jonctions via un échange thermique entre les cellules et l'air ambiant (convection naturelle) au travers du matériau d'encapsulation.

2.1.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans la pratique, les cellules solaires sont associées électriquement en différentes combinaisons (série, parallèle, série-parallèle) qui permettent d'obtenir des valeurs de courant et de tension nécessaires pour une application déterminée. L'ensemble des cellules, connexions protections, support,...constitue ce que l'on appelle le générateur photovoltaïque(GPV).

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire peut s'exprimer par l'équation usuelle suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (2.1)$$

Avec:

I_{ph} : le courant photo-généré.

I_0 : le courant d'obscurité.

R_s : la résistance série.

R_{sh} : la résistance shunt

$$V_t = \frac{mKT}{q} \text{ (pour } m=1, V_t(300K) = 25\text{mV}).$$

Le schéma du circuit équivalent correspondant à l'équation (2.1) est donné par la figure (2.1).

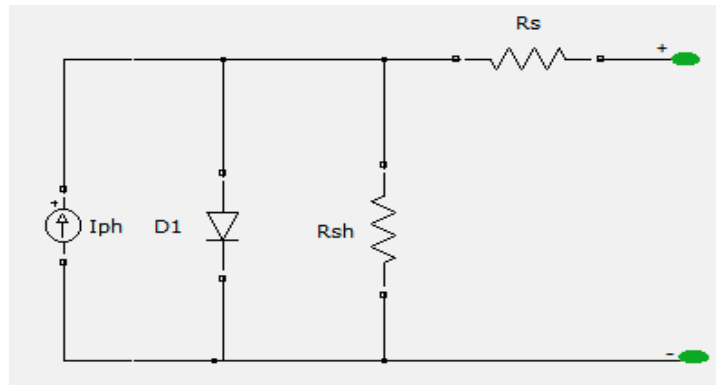


Figure (2.1) : modèle électrique équivalent d'une cellule solaire

a) Caractéristique d'un GPV

Nous l'avons indiqué qu'un GPV est constitué de plusieurs cellules associées entre elles (figure 2.2). Ces cellules ne sont pas identiques pour la détermination de la caractéristique I-V, ce pondant la résolution des problèmes pratiques ne nécessite pas une telle exactitude et on pourra recourir à un modèle simple basé sur les hypothèses suivantes :

- Les effets de la résistance R_{sh} sont négligeables.
- Le courant I_{ph} et le courant de court-circuit sont égaux.
- $\exp(\frac{V+R_s I}{V_t}) > 1$ quelque soit les conditions de travail.
- Toutes les cellules du même générateur sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conceptions.
- Les chutes de tension dues aux conducteurs et aux points d'interconnexions sont négligeables.

A partir de ces hypothèses, la caractéristique I-V d'un GPV est obtenu directement de l'équation (2.1) tout en considérant que :

$$I_G = I \cdot N_p \quad (2.2)$$

$$\text{et } V_G = V \cdot N_s \quad (2.3)$$

I_G : est le courant du générateur.

V_G : est la tension du générateur.

N_s : est le nombre des cellules associées en série.

N_p : est le nombre des branches parallèles.

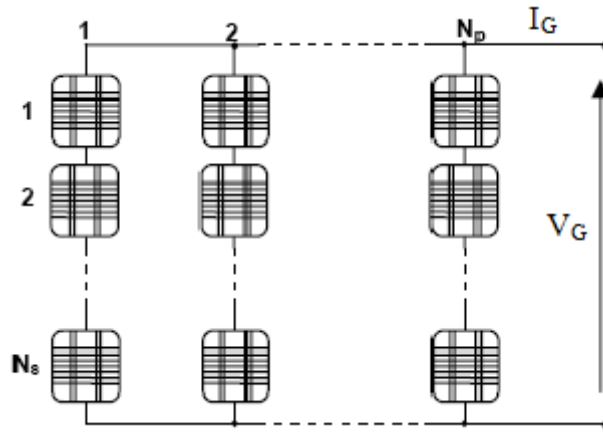


Figure (2.2) : configuration d'un générateur photovoltaïque

A partir l'équation (2.1), (2.2) et (2.3) on a :

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

b) Expression utile

L'hypothèse (a) et (b) permettent de transformé l'équation (1.1) au :

$$I = I_{ph} - I_0 \exp \left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_t} \right) \quad (2.5)$$

En circuit-ouvert on obtient :

$$V_{oc} = V_t \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (2.6)$$

$$\text{Et } I_0 = \exp \left(\frac{V_{oc}}{V_t} \right) \quad (2.7)$$

Remplaçant (2.7) dans (2.5) on obtient :

$$I = I_{sc} \exp \left(\frac{V - V_{oc} + R_s \cdot I}{V_t} \right) \quad (2.8)$$

A partir de l'équation (2.8) la détermination des paramètres nécessaires du GPV sera comme suit :

$$I_{scg} = I_{sc} \cdot N_p \quad (2.9)$$

$$V_{ocg} = V_{oc} \cdot N_s \quad (2.10)$$

$$R_{sg} = R_s \cdot \frac{N_s}{N_p} \quad (2.11)$$

D'où :

$$I_g = V [I_{scg} - \left(1 - \exp\left(\frac{V_g - V_{ocg} + R_{sg} I}{V_t}\right)\right)] \quad (2.12)$$

c) Détermination du point de puissance maximale

La puissance produite par une cellule solaire a un point de fonctionnement s'écrit :

$$P = V \cdot I \quad (2.13)$$

Pour le calcul des coordonnées (I_m, V_m) du point de puissance maximale PPM dans le cas d'une cellule solaire idéale on a :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{ou bien} \quad d(I V)_m = I_m \cdot dV + V_m \cdot dI = 0 \quad (2.14)$$

$$D'où : \quad \frac{dI}{dV} = -\frac{I_m}{V_m} \quad (2.15)$$

A partir de la dérivation de l'équation, $I = I_{ph} - I_o \left(\exp^{\frac{eV}{nkT}} - 1\right)$ on obtient :

$$-I_o \frac{e}{nkT} \exp^{\frac{eV_m}{nkT}} = -\frac{I_m}{V_m} \quad (2.16)$$

$$D'autre part on a : \quad I_m = I_{ph} - I_o \left(\exp^{\frac{eV_m}{nkT}} - 1\right) \quad (2.17)$$

A partir des équations (2.16) et (2.17), on peut démontrer que :

$$I_m = \frac{I_{ph} + I_o}{1 + \frac{eV_m}{nkT}} \quad (2.18)$$

A partir du système de 2 équations (2.17) et (2.18) on pourra calculer (I_m, V_m) du PPM. Néanmoins de ce système d'équations n'a pas de solution explicite ; pour le résoudre on a recours à des méthodes numériques.

d) Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule du PPM de coordonnées (I_{opt}, V_{opt}) sur la caractéristique I-V et la puissance solaire incidente P_{inc} . Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}.V_{opt}}{S.G} \quad (2.19)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement (G) et de la surface totale de la cellule (S). Le rendement est paramètre qui reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

e) **Facteur de forme**

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule P_{max} et le produit du courant de court-circuit I_{sc} par la tension du circuit-ouvert V_{oc} . Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} . Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc}.V_{oc}} = \frac{I_{opt}.V_{opt}}{I_{sc}.V_{oc}} \quad (2.20)$$

2.2 Modèle de cellule solaire à double-diode

Nous utilisons ce modèle pour caractériser la courbe (I-V). 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} , et les facteurs d'idéalité de diodes n_1 et n_2 . Une source de courant produit un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire. Une partie de ce courant traverse les deux diodes à cause de la recombinaison des porteurs de charge. La perte de courant dans la cellule pour de faibles rayonnements est caractérisée par la résistance parallèle ou shunt R_{sh} . R_s est la résistance série à travers laquelle se développe la perte de tension proportionnelle au courant I[14]. 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. Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure (2.3). Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[e^{\frac{q(V+R_s.I)}{n_1 K T}} \right] - I_{02} \left[e^{\frac{q(V+R_s.I)}{n_2 K T}} \right] - \left(\frac{V+R_s.I}{R_{sh}} \right) \quad (2.21)$$

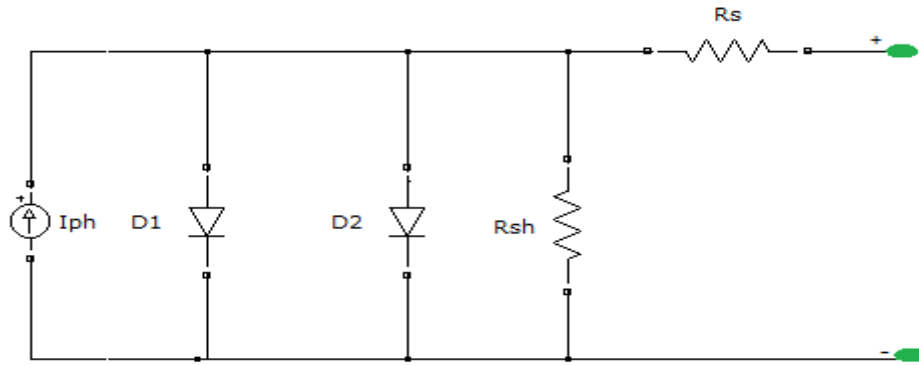
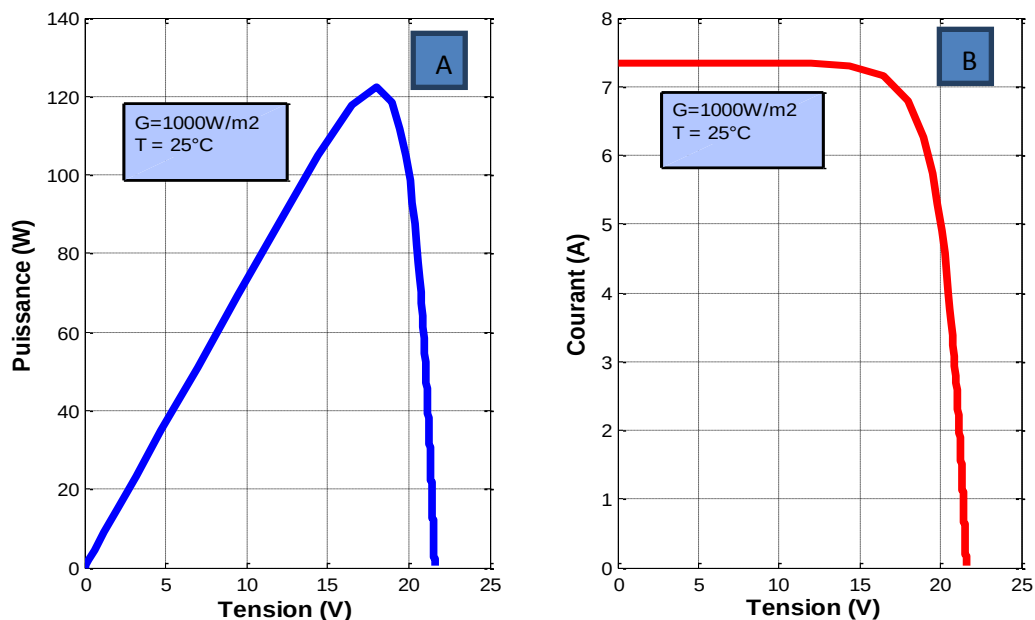


Figure (2.3) : modèle électrique équivalent d'un cellule PV a deux diodes

2.3 Caractéristiques de transfert du module PV

Les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un module photovoltaïque mettent en évidence son comportement vis-à-vis des charges possibles sous des conditions particulières d'ensoleillement et de température en particulier. En effet, 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 les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un module PV pour un éclairement et une température donnés.



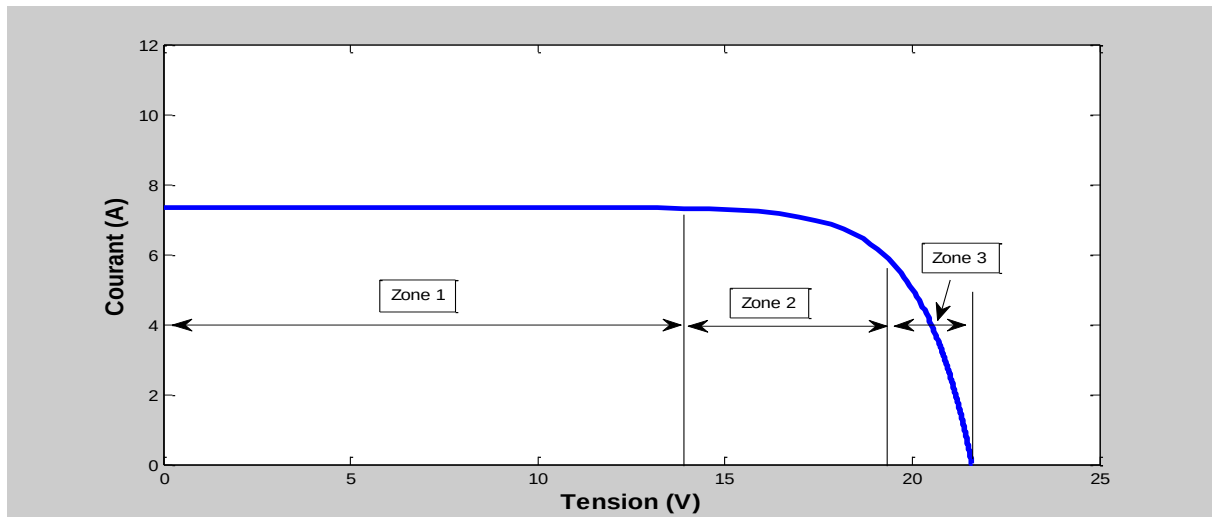
Figure(2.4) : les caractéristiques P-V et I-V du module : A- caractéristique (I-V) B- caractéristique (P-V)

Le comportement du module PV dépend de la zone dans laquelle se trouve le point de fonctionnement. La Figure (2.5) montre les trois principales zones de fonctionnement de la caractéristique I-V.

Dans la **zone 1**, le courant reste constant quelle que soit la tension, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

Dans la **zone 3**, la tension est presque constante malgré la variation du courant, dans ce cas le module photovoltaïque est assimilable à un générateur de tension.

La **zone 2** qui correspond au coude de la caractéristique I-V est la région intermédiaire entre les deux zones précédentes. Elle représente la meilleure région pour le fonctionnement du module PV en générateur photovoltaïque.



Figure(2.5) : les différentes zones de fonctionnement du module PV

Le point optimal caractérisé par une puissance de sortie maximale peut être déterminé dans cette zone. La zone de fonctionnement du module PV dépend de la charge mais également des paramètres météorologiques dont l'influence sur les caractéristiques du module PV peut être déterminant pour ses performances.

2.3.1 Paramètres influant sur le comportement du module PV

Les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent généralement qu'un dimensionnement approximatif du système PV. Nous présentons dans cette partie l'influence de certains paramètres météorologiques (température, ensoleillement) et électriques (résistance série R_s , résistance shunt R_{sh}) sur les performances

d'un module PV telles que les caractéristiques électriques I-V et P-V et la puissance nominale.

2.3.2 Influence de l'ensoleillement

La caractéristique courant-tension dépend directement du rayonnement incident. En effet, l'augmentation du flux lumineux se traduit par un déplacement de la caractéristique I-V suivant l'axe des courants. Le courant de court-circuit est proportionnel à l'irradiation. Cependant, l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension en circuit-ouvert. La tension en circuit ouvert est très faiblement influencée par l'éclairement. La puissance augmente fortement avec l'éclairement. Les figures (2.6) et (2.7) montrent l'évolution des caractéristiques I-V et P-V d'un module PV en fonction de l'éclairement $G(\text{W/m}^2)$ [9].

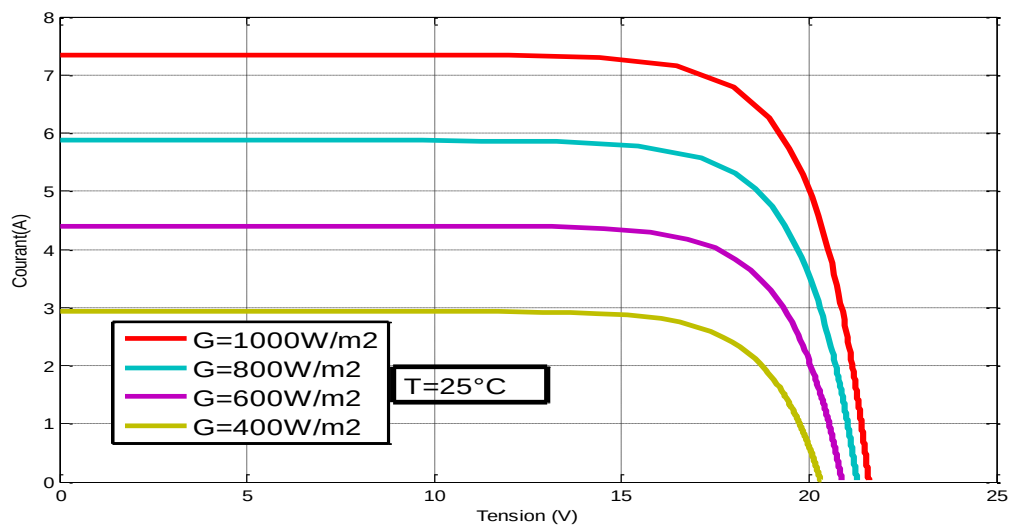


Figure (2.6) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I-V

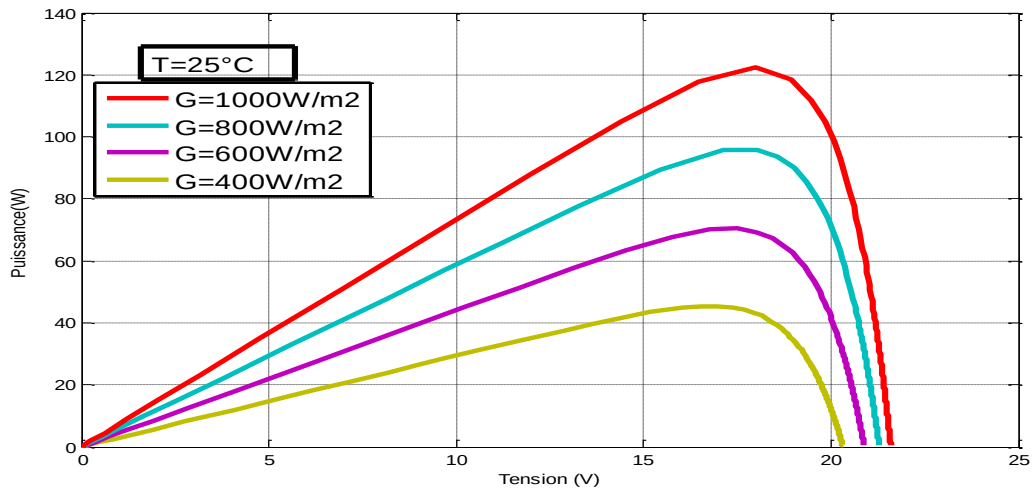


Figure (2.7) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique P-V

2.3.3 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température. Les figures (2.8) et (2.9) représentent les caractéristiques I-V et P-V d'un module PV en fonction de la température, sous un éclairement constant. Une augmentation de la température entraîne une chute importante de la tension de circuit-ouvert (de l'ordre de $-0.4\%/^{\circ}\text{K}$) tandis que le courant de court-circuit varie peu avec l'augmentation de la température. Globalement, une augmentation de la température entraîne une perte non négligeable de la puissance [13].

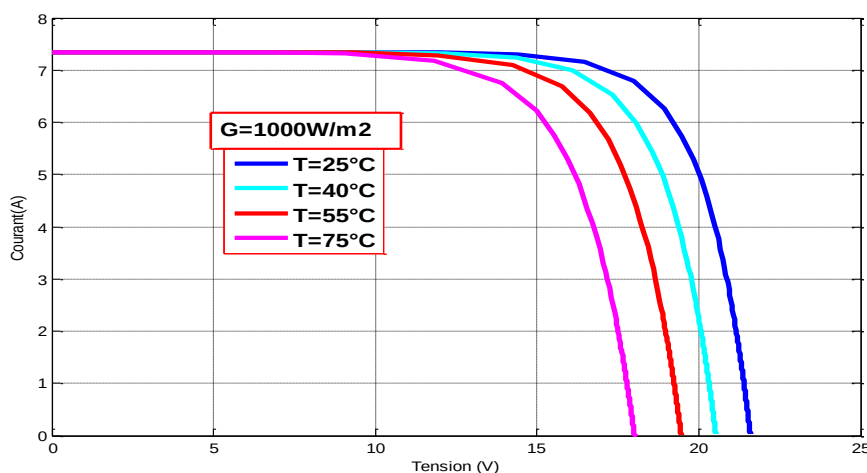
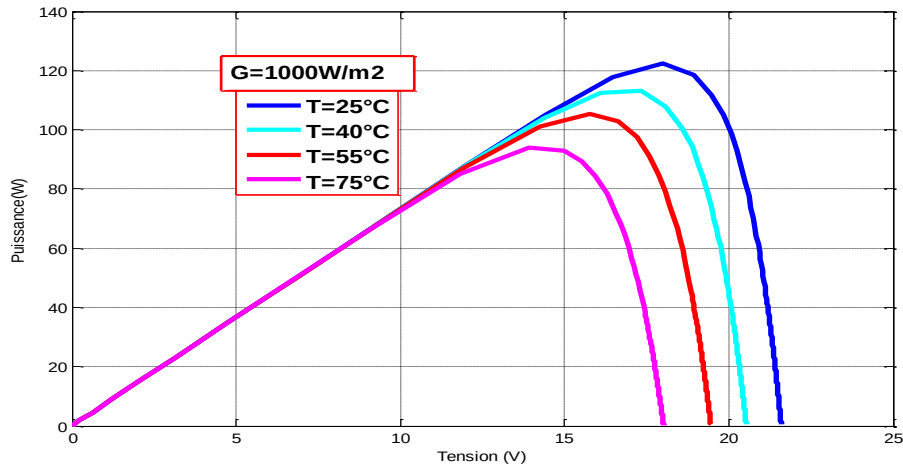


Figure (2.8): Influence de la température sur la caractéristique I-V



Figure(2.9) : Influence de la température sur la caractéristique P-V

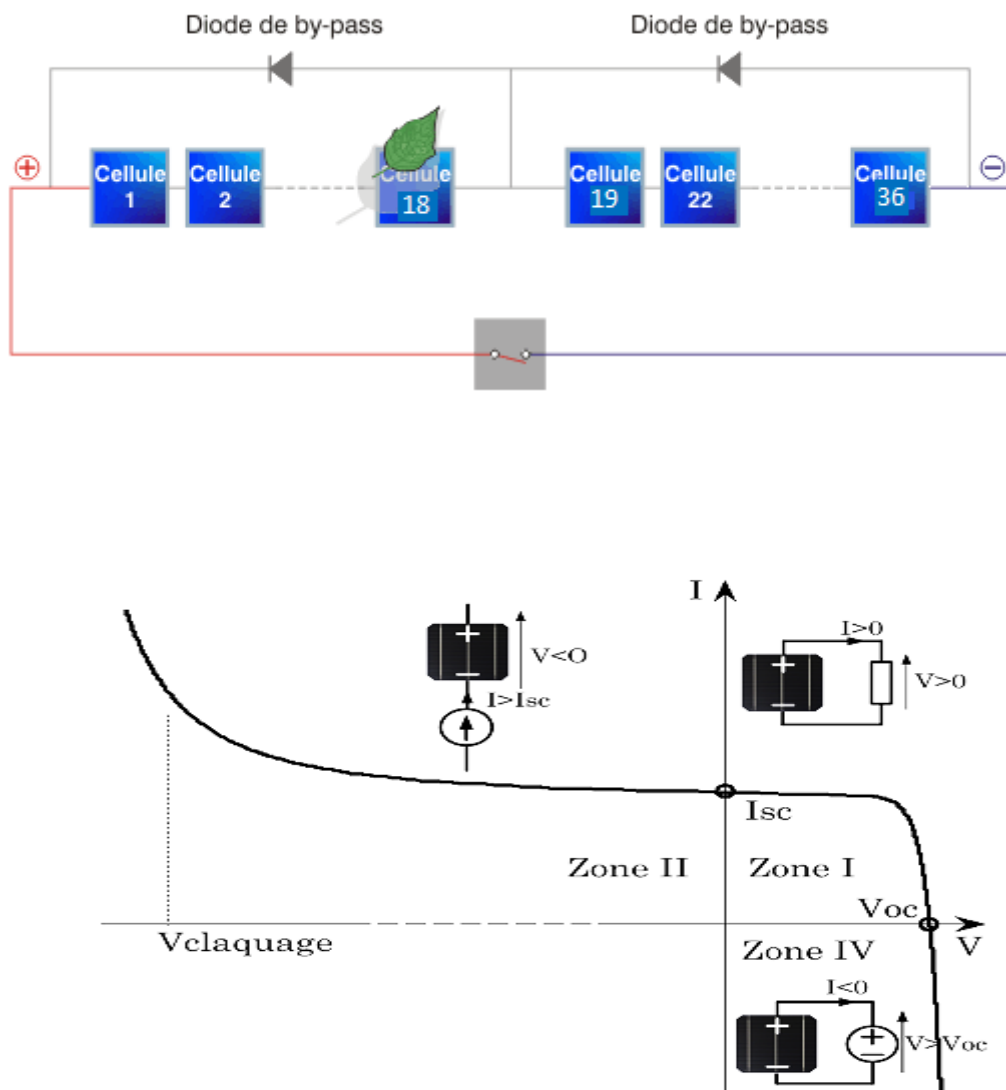
2.4 Protections des Modules

L'existence d'une cellule non identique dans un module peut provoquer sa destruction, par échauffement. Les déséquilibres importants dans les modules dus à l'occultation, d'une ou plusieurs cellules peuvent amener ces dernières à travailler en récepteur. Pour remédier à ces problèmes ; des diodes peuvent être placées en parallèle et en série avec les modules.

2.4.1 Les diodes by-pass

Il est possible que sous l'effet d'un ombrage ou de la température que toutes les cellules placées en série n'aient pas les mêmes caractéristiques, créant ainsi des déséquilibres. Lors d'un assemblage de cellules PV en série, il est nécessaire de mettre une diode by-pass pour empêcher le fonctionnement, dans la zone 2 de la figure (2.5) (en inverse), d'une cellule ombragée et ainsi empêcher la destruction de celle-ci. Pour empêcher cette destruction, la tension inverse vue par la cellule ne doit pas dépasser V_{op} (environ 12V, aussi appelé tension d'avalanche). Pour que cette condition soit vérifiée, une diode by-pass doit être mise en parallèle au maximum toutes les 20 cellules pour les technologies silicium. Dans les faits, pour des raisons de simplicité de réalisation, une diode by-pass est placée en parallèle de chaque groupe de 18 cellules constituant le module. Deux diodes by-pass sont nécessaires pour un module de 21.6 V. la courbe bleue est la caractéristique d'un bloc de 36 cellules PV connectées en série. La courbe rouge est elle aussi la caractéristique d'un bloc de 36 cellules PV connectées en série mais sous un éclairement plus élevé. Le bloc ayant la caractéristique bleue est soumis à un éclairement plus faible, son courant de court-circuit est donc plus faible. Si ces deux blocs sont connectés en série sans protection (courbe noire) et que la charge

impose au module PV de fonctionner au point $P_{\max}$ (V_{02}), alors la cellule la moins éclairée (en bleu) va fonctionner en inverse et risque de se détruire si la tension à ses bornes s'approche de la tension d'avalanche. Pour éviter ce risque, des diodes by-pass sont classiquement mises toutes les 18 cellules PV pour s'assurer qu'aucune cellule, quelles que soient les conditions, ne puisse fonctionner proche de sa tension d'avalanche. Sur la figure (2.10), les caractéristiques en pointillées correspondent aux caractéristiques du module PV en présence de diodes de by-pass.



Figure(2.10) : Caractéristique D'un cellule PV avec et sans diode by-pass

2.4.2 Les diodes anti-retour

Lors d'un assemblage de cellules PV en parallèle, un deuxième phénomène néfaste à la production photovoltaïque intervient lorsque la tension d'une cellule dépasse sa tension en circuit-ouvert. Dans ce cas, la cellule va fonctionner dans la zone 3 (figure 2.5) et va absorber du courant afin de compenser cette augmentation de tension. Les cellules éclairées vont donc débiter dans les cellules occultées partiellement ou totalement. L'utilisation d'une diode anti-retour (aussi appelée diode série) ou d'un fusible dans une chaîne de cellules permet d'éviter leur destruction (figure 2.11). Cette protection est nécessaire si une branche de modules PV n'est pas en mesure de supporter le courant total débité par les autres branches mises en parallèle. Pour le silicium cristallin le problème apparaît à partir de 4 branches en parallèle. Dans le cas de l'utilisation d'un fusible, ce dernier doit être dimensionné à $I_{\max} = I_{sc} \times 1,25$. L'utilisation d'une diode induit une perte de puissance proportionnelle à la chute de tension dans la diode.

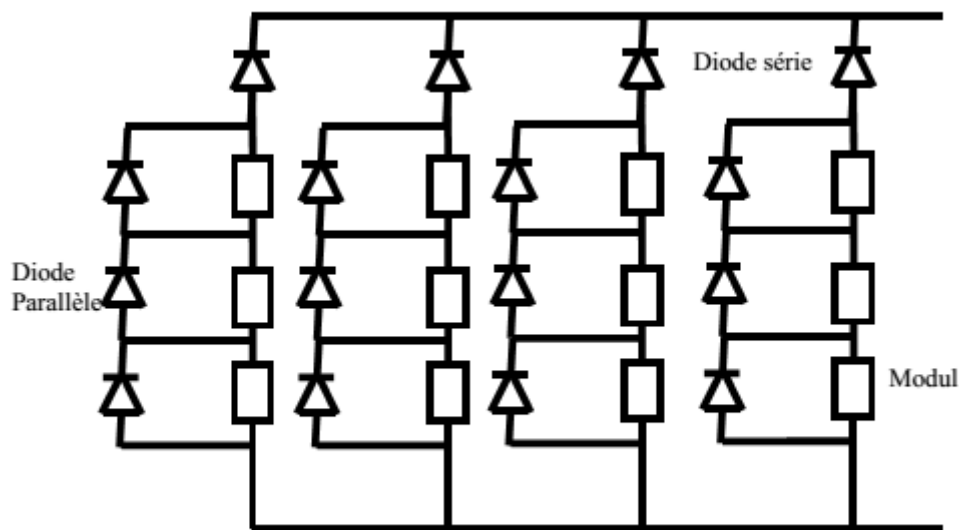


Figure (2.11) : Protection d'une configuration mixte.

2.5 Conception d'un module photovoltaïque

Au sein d'un module PV les cellules interconnectées sont rassemblées en branche de 9 cellules. Un module PV est constitué de la mise en série de 4. Nous verrons, dans la suite, pourquoi N_s est généralement égal à 36 cellules lors de la mise en série. La conception d'un module PV repose encore aujourd'hui sur des raisons historiques. A l'origine, l'énergie solaire était réservée aux applications en sites isolés. La tension de fonctionnement de ces

installations était donc imposée par la tension des batteries utilisées pour stocker l'énergie. Ces systèmes fonctionnant avec des batteries au plomb avec des tensions de 12V, 24V ou 48V. Cette raison historique explique que la quasi-totalité des modules existants aujourd'hui aient encore une tension de sortie de 12 ou 24V. Les modules étant conçus pour pouvoir fonctionner sur ces systèmes, ils ne sont en réalité qu'une mise en série de cellules pour obtenir la tension désirée, 36 cellules pour 21.6V. Aujourd'hui, très peu d'études remettent en cause cette conception historique qui n'est pas optimisée pour un fonctionnement connecté au réseau. La conception d'un module photovoltaïque impose de s'assurer que les composants de ce dernier ne risquent pas d'être détruits au cours d'un fonctionnement dans les quadrants B et C (Figure (2.10)). Dans ces zones les cellules PV fonctionnent en récepteurs et des risques de destruction existent. Pour les protéger de ces risques deux types de protection sont mis en place dans les installations photovoltaïques : la diode by-pass et la sécurité contre-courant. De nouvelles architectures de modules PV sont présentées pour limiter les impacts des ombrages, mais ces solutions ne sont pas développées industriellement.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule PV ainsi que d'un module PV et d'un GPV. L'influence de la température et l'éclairement sur le rendement de la cellule, et aussi présenté on constate que la puissance ne dépend pas seulement de la température mais dépend aussi de l'éclairement. Dans le chapitre suivant nous présentons les résultats de simulation de l'influence du taux d'ombrage sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un générateur PV.