

## II.1 Introduction :

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. Une cellule solaire est modélisée comme une jonction p-n avec des caractéristiques non linéaires pour décrire sa réponse électrique. Pour analyser ces caractéristiques, un modèle mathématique de la cellule solaire est dérivée d'équations mathématiques en termes d'entrées des cellules solaires et les sorties. [1]

## II.2 Les cellules photovoltaïques

### II.2.1 Définition d'une cellule solaire

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement. [18]

### II.2.2 Dispositifs à semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées. [5]

### II.2.2.1 Les semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal. [8]

### II.2.2.2 Les semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage. [8]

#### Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre.

On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif). [8]

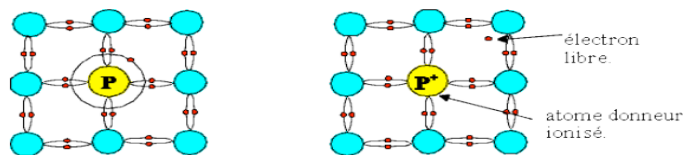


Figure :2.1 dopage N

#### Dopage de type P :

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

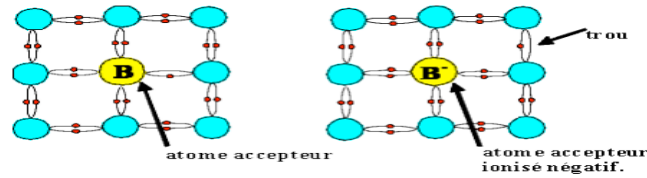


Figure :2.2 dopage P

### La jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

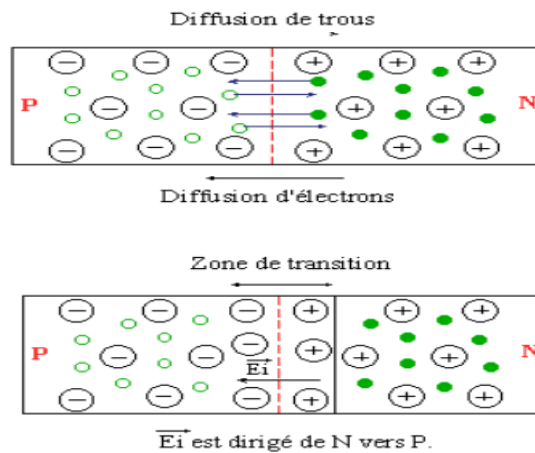


Figure :2.3 jonction PN

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone

De traverser la jonction pour se recombiner.

### II.2.3 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est permise de transformer l'énergie solaire en énergie électrique à trois mécanismes suivant :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce que correspondre à la création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteur pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N d'autre structure, comme les hétérojonctions et les Schottky sont également être utilisée.

### II.3 Modélisation des cellules solaires

Le circuit équivalent le plus simple d'une cellule solaire est une source de courant connectée en parallèle avec une diode comme il montre la figure 2.4. La sortie de la source actuelle est directement proportionnelle à la lumière tombant sur la cellule. Pendant l'obscurité, la cellule solaire n'est pas active et fonctionne comme une diode. Il ne produit ni courant ni tension. Cependant, si la lumière tombe sur la cellule solaire, elle génère un courant de diode. La diode, « D » détermine les caractéristiques I-V de la cellule. Une résistance en série,  $R_s$ , représente la résistance à l'intérieur de chaque cellule, tandis que la résistance au shunt  $R_{sh}$ , est négligé car il a une grande valeur de résistance.[4]

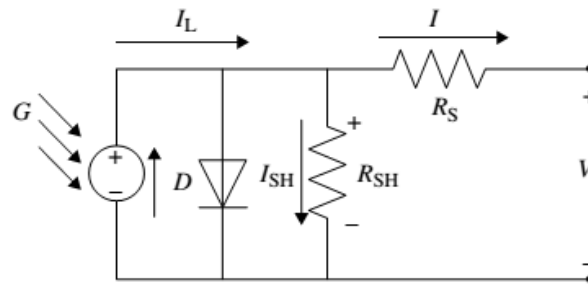


Figure 2.4 Circuit équivalente de cellule solaire.

Dans une cellule solaire idéale, on suppose que  $R_s = 0$  et  $R_{sh} = l'infini$ . Le courant net de la cellule est la différence entre le photo courant,  $I_L$ , Et le courant de diode normal, Qui est donnée par :

$$I = I_L - I_o \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Le photo courant,  $I_L$ , Dépend des premières et des secondes températures de référence,  $T_1$  et  $T_2$ , respectivement, et est donné par : [1]

$$I_L = I_L(T_1) + K_o(T - T_1) \quad (2.2)$$

Où :

$$I_L(T_1) = I_{scT_1.nom} \left( \frac{G}{G_{nom}} \right) \quad (2.3)$$

$$K_o = \frac{I_{scT_2} - I_{scT_1}}{T_2 - T_1} \quad (2.4)$$

Où  $G$  c'est le rayonnement solaire actuel et  $G_{nom}$  est le rayonnement solaire à la référence tester. Le courant de saturation de la diode,  $I_o$ , est donné par :[1]

$$I_o = I_{oT_1} \left( \frac{T}{T_1} \right)^3 e^{\frac{qVqT_1}{nk\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}} \quad (2.5)$$

Où :

$$I_{oT_1} = \frac{I_{scT_1}}{\left( \frac{e^{\frac{qV_{scT_1}}{nkT_1}} - 1}{e^{\frac{qV_{scT_1}}{nkT_1}} - 1} \right)} \quad (2.6)$$

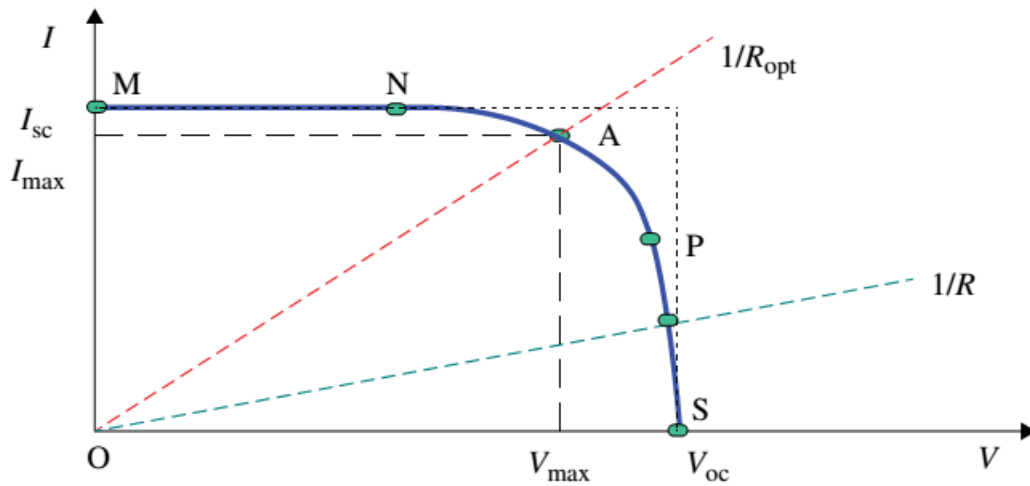


Figure 2.5 Courbe de caractéristique I-V d'une cellule solaire.

La résistance série d'une cellule solaire est donnée par [1]

$$R_s = - \frac{dV}{dI_{V_{oc}}} - \frac{1}{X_V} \quad (2.7)$$

Où :

$$X_V = I_{oT_1} \frac{q}{nkT_1} e^{\frac{qV_{ocT_1}}{nkT_1}} \quad (2.8)$$

Une caractéristique I-V typique d'une cellule solaire à une certaine irradiation ambiante, G et la température fixe de la cellule est indiquée à la figure 2.5 Pour une charge résistive, la caractéristique de charge est une ligne droite avec une pente  $I/V = 1/R$ . Il est à noter que la puissance fournie à la charge dépend de la valeur de la résistance de la figure 2.5, si la charge est faible, la cellule fonctionne dans les régions M-N de la courbe, où la cellule se comporte comme une source de courant constante qui est presque égale le courant de court-circuit. D'autre part, si la charge est grande, la cellule fonctionne dans le régions P-S de la courbe et la cellule se comporte plus comme une source de tension constante qui est presque égal à la tension de circuit ouvert. [3]

Le courant de court-circuit,  $I_{sc}$  est la plus grande valeur du courant généré par un système de cellule solaire. Il est produit pendant la condition de court-circuit où  $V = 0$ . Le circuit ouvert de tension correspond à la chute de tension qui travers la diode lorsque le photo courant est zéro. Il reflète la tension de la cellule sans conditions légères et peut être exprimé mathématiquement comme : [1]

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_o} \right) = V_t \ln \left( \frac{I_L}{I_o} \right) \quad (2.9)$$

Où ( $V_t = mkT/q$ ) est connu comme la tension thermique et « T » la température absolue. Le point de puissance maximale est le point de fonctionnement A dans lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est à sa valeur maximale et est donné par : [1]

$$P_{max} = V_{max} I_{max} \quad (2.10)$$

Le rendement d'une cellule solaire est le rapport entre la puissance maximale et la puissance lumineuse incidente et est exprimée en : [15]

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} V_{max}}{A G_a} \quad (2.11)$$

Où A est la zone du module PV et  $G_a$  rayonnement.

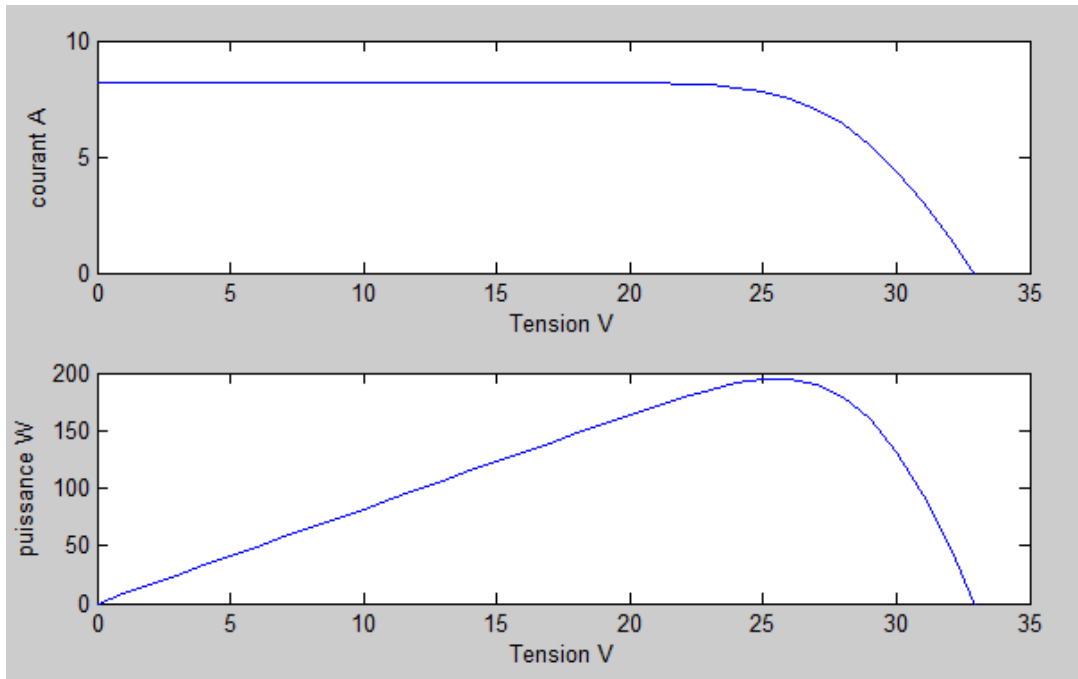
Le facteur de forme (FF) est une mesure de la caractéristique I – V réel. Efficace des cellules solaires, la valeur doit être supérieure à 0,7. Le (FF) diminue lorsque la cellule température augmente. Le FF est exprimé en : [4]

$$FF = \frac{I_{sc}V_{oc}}{V_{max}I_{max}} \quad (2.12)$$

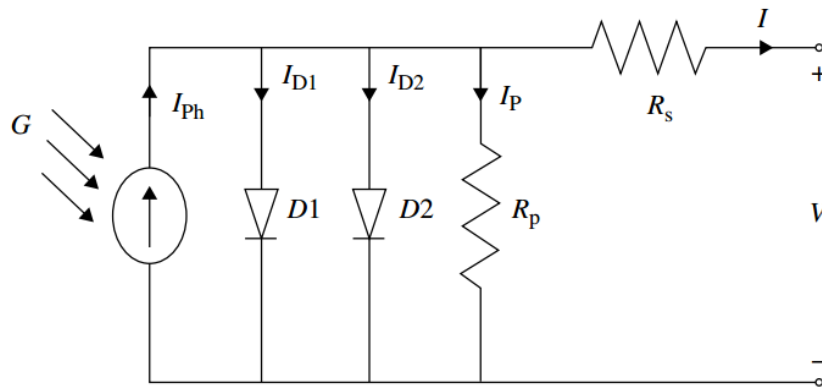
Le code doit être formulée en fonction tout d’abord afin de permettre à l’utilisateur de prédire les courbes à différents niveaux du rayonnement solaire et la température ambiante. Au début, certaines constantes doivent être définis. Les relations entre tension et rayonnement actuel et l’énergie solaire et la température de la cellule de codage peut être tel qu’illustré dans les équations 2.1 – 2.11.

Spécifications			
▪ Performances électriques dans des conditions d'essai standard (*STC)		▪ Cellule	
Puissance maximal ( $P_{max}$ )	200 W(+10%/-5%)	Nombre per module	54
Tension d'alimentation maximale ( $V_{mpp}$ )	26.3V		
Courant maximum de puissance ( $I_{mpp}$ )	7.16A	▪ Module caractéristiques	
Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	32.9V	Longueur, largeur, profondeur	1425mm(56.2in)×990 mm(39.0in)×36mm(1.4in)
Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )	8.21A	Poids	18.5 kg(40.7 lbs)
Tension maximale du système	600V	Câble	(+)720 mm(28.3in), (-)1800 mm(70.9in)
Coefficient de température ( $V_{oc}$ )	$-1.23 \times 10^{-1} V/^{\circ}C$		
Coefficient de température ( $I_{sc}$ )	$3.18 \times 10^{-3} A/^{\circ}C$	▪ Junction box caractéristiques	
*STC: Irradiante 1000 W/m, AM1.5 Spectrum, module température 25°C		Longueur, largeur, profondeur	113.6 mm(4.5in)×76 mm(3.0in)×9 mm(0.4in)
▪ Performance électrique à 800 W / m <sup>2</sup> , NOCT, AM1.5		IP code	IP65
Puissance maximum ( $P_{max}$ )	142W		
Tension d'alimentation maximale ( $V_{mpp}$ )	32.2V	▪ Réduction de l'efficacité sous faible Irradiation	
Courant de puissance maximum ( $I_{mpp}$ )	6.13A	Réduction	7.8%
Tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	29.9V	Réduction de l'efficacité d'une irradiante de 1000 à 200 W / m (température du module °C)	
Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )	6.62A		
Température nominale de la cellule de fonctionnement (NOCT): 47°C			

Tableau2.1 Fiche technique d’une modèle PV



**Figure 2.6** I – V et P-V caractéristique de modules photovoltaïques à 1000 W/m<sup>2</sup> et 25° C.



**Figure 2.7** circuit équivalent électrique double-diode de la cellule solaire.

Le modèle d'une diode offre un comportement satisfaisant dans des conditions normales mais offre souvent un comportement dégradé sous faible rayonnement solaire. Toutefois, certains chercheurs ont exprimé l'effet des pertes charge transporteur recombinaison dans la région de déplétion par une diode supplémentaire. Ce modèle s'appelle modèle double-diode PV. La figure 2.7 montre le circuit équivalent double-diode.

Le courant de sortie de cellule solaire, basé sur le circuit équivalent de double-diode est décrit par :



$$I = I_{ph} - I_{D1} \left[ \exp\left(\frac{V+IR_s}{V_{t1}}\right) - 1 \right] - I_{D2} \left[ \exp\left(\frac{V+IR_s}{V_{t2}}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (2.13)$$

où  $I_{D1}$  et  $I_{D2}$  sont les courants de saturation de premières et seconde diodes, respectivement et  $V_{t1}$  et  $V_{t2}$  sont les tensions thermiques des diodes et ils peuvent être donnés par : [1]

$$V_{t1} = \frac{a_1 K T C}{q} \quad (2.14)$$

$$V_{t2} = \frac{a_2 K T C}{q} \quad (2.15)$$

où un  $a_1$  et  $a_2$  sont les facteurs d'idéalité de diode qui représentent les composants, le courants de diffusion et recombinaison.

Bien que le modèle double-diode présente une plus grande précision que le modèle d'une-diode, il a besoin pour des efforts de calcul étendu.

#### II.4 Modélisation de panneau PV

Pour presque toutes les applications, la moitié de tension produite par une seule cellule solaire est insuffisante. Par conséquent, les cellules sont reliées en série pour augmenter la tension.

Plusieurs de ces chaînes série de cellules peuvent être reliés entre eux en parallèle pour augmenter aussi bien le courant. Ces cellules interconnectées et leurs raccordements électriques sont alors pris en sandwich entre une couche de verre ou de plastique transparent et d'un niveau inférieur de métal ou plastique. [10]

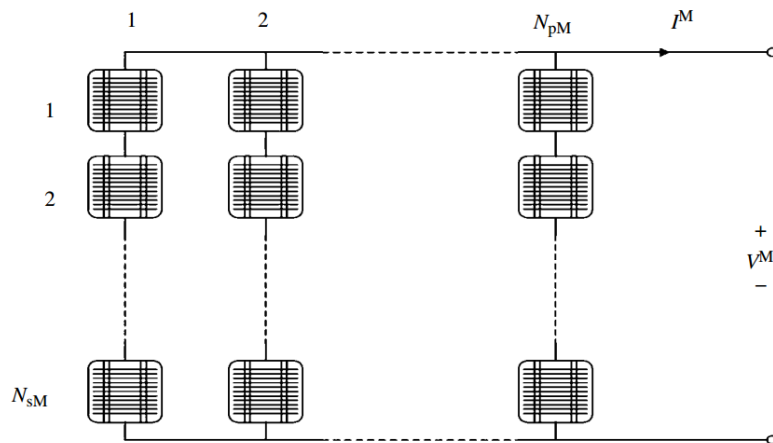


Figure 2.8 Diagramme schématique d'un module PV.

Un cadre extérieur est attaché pour augmenter la résistance mécanique et de fournir un moyen pour monter la machine. Ce paquet s'appelle un module PV ou un panneau photovoltaïque. En règle générale, un module est composant fondamentale des systèmes PV. la figure 2.8 illustre le diagramme schématique d'un module PV.

Les relations entre la tension de la cellule ( $V_C$ ) et actuelle ( $I_C$ ) et du module tension ( $V_M$ ) et le courant ( $I_M$ ) sont données par les équations suivantes :[1]

$$I_M = N_{pM} I_C \quad (2.16)$$

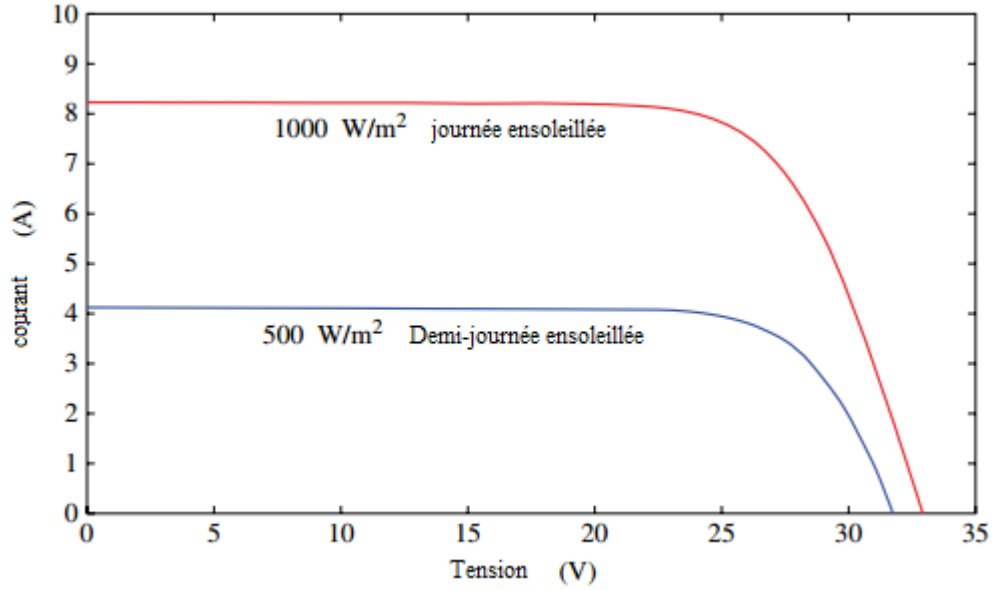
$$V_M = N_{sM} V_C \quad (2.17)$$

$$R_{sM} = \frac{N_{sM}}{N_{pM}} R_{sC} \quad (2.18)$$

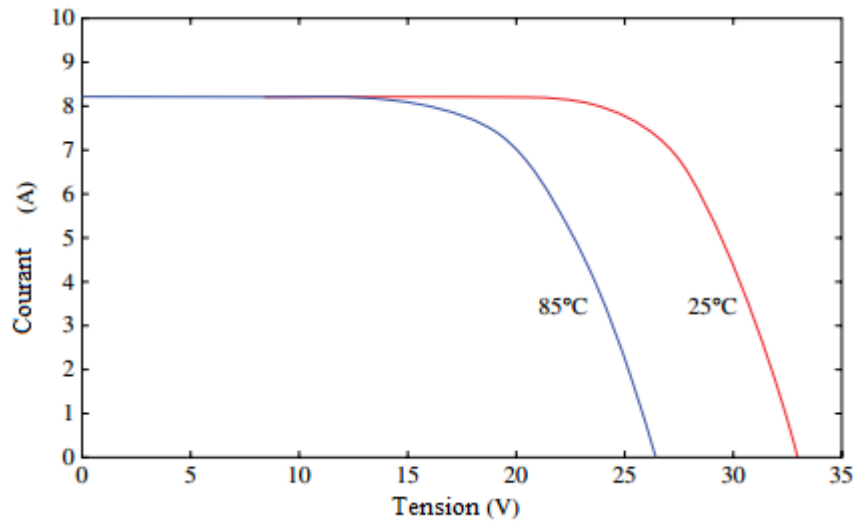
où  $N_{sM}$  est le nombre de cellules de série  $N_{pM}$  représente le nombre de cellules parallèles et  $R_{sM}$  est la résistance série équivalente du module PV. L'exécution d'un module PV dépend fortement des conditions de lumière du soleil.

Des conditions d'ensoleillement standard par temps clair sont censées pour être 1000 W d'énergie solaire par mètre carré, et il est parfois appelé « un soleil » ou un « soleil de pointe ». Moins d'un soleil permettra de réduire le courant de la sortie d'un module PV d'un montant proportionnel. Par exemple, si seulement la moitié soleil (500 W/m<sup>2</sup>) est disponible, la quantité de courant de sortie de PV est grossièrement coupée en deux comme sur la Figure 2.9.

En revanche, la température influe sur la tension de sortie PV inversement à Quelles températures élevées réduira la tension de 0,04 à 0,1 V pour chaque 1° C monter en température, comme illustré dans la Figure 2.10. [11]



**Figure 2.9** Courbe I-V à deux valeurs de rayonnement.



**Figure 2.10** Effet de la température du module PV.

Dans de nombreuses applications, la puissance disponible d'un module est insuffisante pour alimenter de nombreuses charges. Un certain nombre de modules photovoltaïques peut être connecté en série, parallèle, ou les deux pour former un panneau PV pour augmenter soit sortie courant ou tension. Lorsque les modules sont connectés en parallèle, le courant va augmenter. Par exemple, trois modules connectés en parallèle avec chaque module évalué à 15 V et 3 A vont produire une puissance de 15 V et 9 A.

Quand un panneau PV est relié à un système de stockage des batteries, un flux inverse du courant de la batterie vers le tableau peut se produire pendant la nuit. Ce flux videra la puissance de la batterie. Pour éviter cela, une diode est utilisée pour arrêter ces courants inverses. Cependant, parce que les diodes créent la chute de tension, certains systèmes utilisent un contrôleur qui ouvre le circuit au lieu d'utiliser une diode de blocage. Pour un champ photovoltaïque avec modules connectés en série, si un module dans une chaîne de la série échoue, il fournit donc beaucoup de résistance que d'autres modules dans la chaîne n'est peut-être pas en mesure de fonctionner. Un chemin de contournement autour du module handicapé permettra d'éliminer ce problème. La diode de dérivation permet de courante parmi les autres modules de couler dans le « bon » sens [11]

### II.5 Modélisation de la température de la cellule solaire

L'approche standard pour définir l'efficacité d'une cellule solaire fortement dépend de la température de la cellule, qui est calculée selon la température ambiante et la valeur de référence de la température de la cellule connue comme la température nominale de cellules d'exploitation (NOCT). NOCT est définie comme la température atteinte par les cellules de circuit ouvert dans un module photovoltaïque dans des conditions de l'irradiante  $800 \text{ W/m}^2$  sur la surface du cellule,  $20^\circ \text{ C}$  température de l'air, et la vitesse du vent  $1 \text{ m/s}$ . Toutefois, ces conditions peuvent varier selon la nature de zone climatique. Cependant, certaines études menées dans divers endroits dans le monde ont révélé que les conditions NOCT ne sont pas exactes pour toutes les zones.

La plupart des fabricants de systèmes photovoltaïques fournissent les éléments de température pour leurs modules PV cristallines sur le NOCT comme la température de la cellule ( $T_c$ ), qui a une équation de [1]

$$T_c = T_a + \frac{G}{800} (NOCT - 20^\circ\text{C}) \quad (2.19)$$

Lorsque  $T_c$  est la température de la cellule, la  $T_a$  est la température ambiante température,  $G$  le rayonnement solaire instantané et NOCT est la température nominale de cellules.

Cette équation indique également la température de module ( $T_m$ ) avec  $1 \text{ m/s}$  de vitesse de vent, température ambiante de  $20^\circ \text{ C}$  et  $800 \text{ W/m}^2$  irradiante hémisphérique ( $G$ ) comme les conditions environnementales. L'emplacement de l'élément de mesure température du module PV reste discutable en raison de la question sur l'effet de la température de surface ( $T_s$ ), la température de fond ( $T_b$ ) et la température ambiante ( $T_a$ ) sur la température de la cellule ( $T_c$ ).

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre II nous avons donné un aperçu général sur la production photovoltaïque qui est à base d'un semi-conducteur (silicium), assurant la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Nous avons expliqué et présenté le concept d'un système photovoltaïque .et encore expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que le fonctionnement des modules photovoltaïque nous avons ensuite présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant et tension I-V typique d'une cellule solaire évalue principalement avec irradiation ambiante, et la température.