

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs, c'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau. Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

Dans ce chapitre, nous allons donner des définitions de l'énergie photovoltaïque, et les différents types de cellule, la modélisation de la cellule, l'effet de variation climatique, et enfin la simulation d'un générateur photovoltaïque sous Matlab.

I.2 Différentes configurations des systèmes PV

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants : [1]

- Un générateur photovoltaïque.
- Un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- Un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.
- Une source auxiliaire d'appoints.

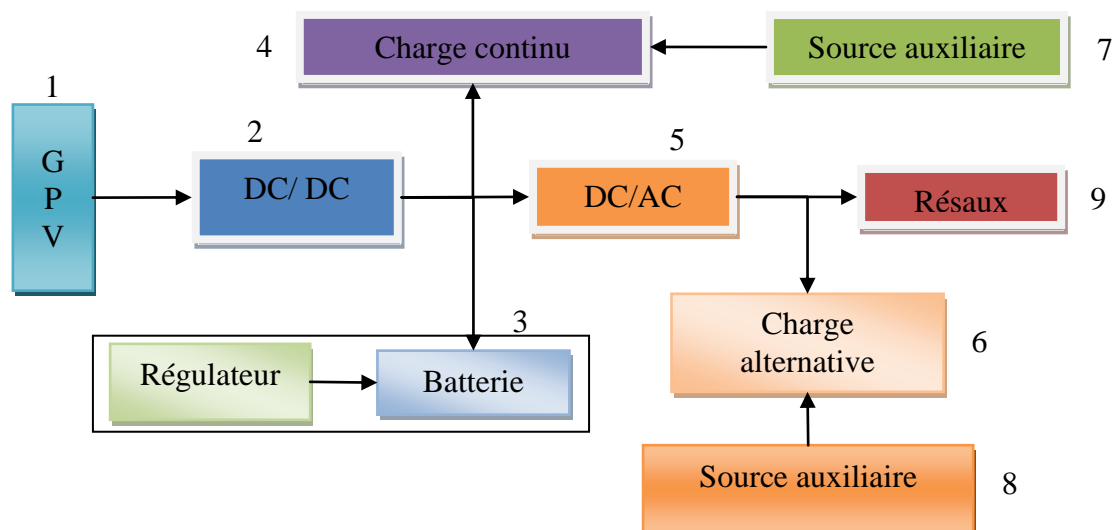


Figure I.1 : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque.

I.2.1 Système autonome sans batterie :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par les blocs (1) et (4) de la figure précédente. La charge de type continu est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.

I.2.2 Système autonome avec batterie :

Ces systèmes sont représentés par les blocs [(1), (3), (4)] dans le cas où la charge est de type continu et les blocs [(1), (3), (5), (6)] si la charge est de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire.

- **Un générateur photovoltaïque :** peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique).
- **Le régulateur de charge :** a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie
- **Une batterie d'accumulateurs :** permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques.
- **Convertisseur continu/continu (DC/DC) :** permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum,
- **Convertisseur DC/AC :** permettant d'alimenter les charges alternatives.
- **La charge :** on peut utiliser deux types de charges (continu ou bien Alternative) .

I.2.3 Système fonctionnant au fil du soleil

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permettent de faire une adaptation entre le générateur et la charge continue [(1), (2), (4)]. Si la charge est de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit [(1), (5), (6)].

I.2.4 Système avec appoint électrique

Pour ces systèmes on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électriques (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu [(1),(2),(3),(4),(7)] et [(1),(2),(3),(4),(7),(9)] ; ou de type alternatif [(1),(2),(3),(5),(6),(8)] et

[(1),(2),(3),(5),(6),(8),(9)].

Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie.

I.3 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque également dénommée cellule solaire est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs. Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée.

I.3.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants: Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous 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-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons/trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction-N [2] (Fig. I.2).

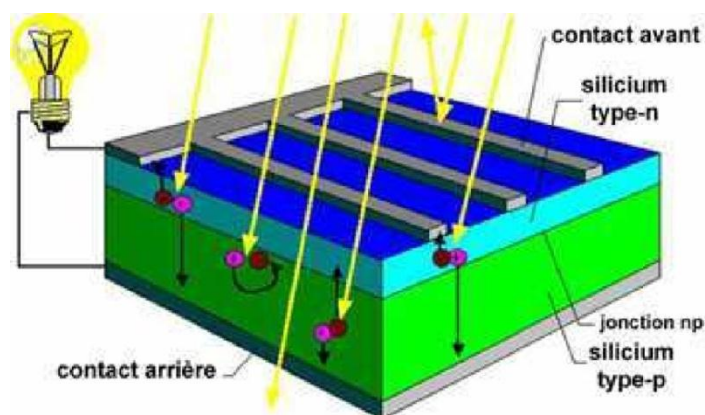


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.3.2 Les Différents technologies de cellules photovoltaïques

Différents types de cellule photovoltaïque existent, ils dépendent principalement du type de technologie utilisé. On peut citer les types suivants :

- ***Cellules monocristallines (mono c-SI)***

Sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal.

- ***Cellules poly cristallines (multi c-SI)***

Sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées.

- ***Cellules amorphes***

Ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines.

I.3.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La figure suivante (figure I.3) représente le modèle électrique d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une diode en parallèle et une résistance série R_s et résistance parallèle R_P . la diode $D1$ décrit la propriété de semi-conducteur de la cellule.

Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante).

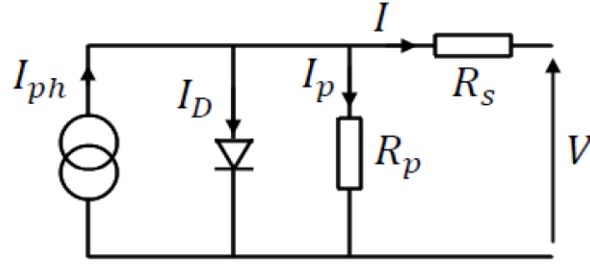


Figure I.3: Circuit équivalent d'une cellule solaire.

D'après le modèle de la cellule, on remarque qu'il y a une résistance shunt R_{sh} qui représente les fuites par effet de bord autour de la cellule solaire. La résistance R_s qui représente la résistance série, prend en compte les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque de Silicium ; I_{ph} est le courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses, et la diode représente la jonction PN de la cellule.

En appliquant la loi des nœuds, on trouve :

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (I.1)$$

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(q \frac{(V + IR_s)}{\alpha \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) \quad (I.2)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{e(V + IR_s)}{\alpha \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (I.3)$$

Où : α : Est le facteur d'idéalité,

T : Est la température de la cellule en K,

e : Est la charge de l'électron $e = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$,

K : est la constante de Boltzmann $K = 1.3854 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$.

La cellule photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres :

- **Le courant de court-circuit I_{SC}** : c'est le courant maximal généré par la cellule ; il est produit lorsqu'elle est soumise à un court-circuit, dans ce cas on peut écrire $I_{SC} \approx I_{ph}$ du fait que $R_s \ll R_p$.

Dans le cas idéal ($R_s=0, R_p=\infty$) Son expression approchée est donnée par:

$$I_{SC} = I_{ph} - I_0 * \left[\exp \frac{V + I_{SC} \cdot R_s}{V_T} - 1 \right] - \frac{V + I_{SC} \cdot R_s}{R_p} \quad (I.4)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible) on peut négliger le

terme $I_0 * \left[\exp \frac{V + I_{SC} \cdot R_s}{V_T} - 1 \right]$ devant I_{ph} .

L'expression approchée du courant de court-circuit alors :

$$I_{sc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + R_s/R_p} \quad (I.5)$$

- **Tension à circuit ouvert V_{oc}** : C'est la tension aux bornes de la cellule sans charge.

Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$I_{ph} - I_0 * \left[\exp \frac{V_{oc}}{V_T} - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_p} = 0 \quad (I.6)$$

Dans le cas idéal sa valeur est légèrement inférieure à

$$V_{oc} = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc} + I_0(T)}{I_0(T)} \right) + V_t \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0(T)} \right) \quad (I.7)$$

Avec : $V_t = \frac{\alpha \cdot K \cdot T}{e}$ la tension thermique et I_0 le courant desaturation de la diode D.

I.4 Puissance d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique P(W) disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = I * V \quad (I.8)$$

P(W) : Puissance fournie par la cellule PV.

V(V) : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I(A) : Intensité débitée par la cellule PV.

I.4.1 Puissance maximale d'une cellule PV

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

$$P_{max} = V_{oc} * I_{sc} \quad (I.9)$$

P_{max} (W): La puissance fournie par la cellule PV.

V_{oc} (V) La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{sc} (A)= L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximale V_{mp} est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{oc} de même que le courant fourni I_{mp} est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{sc} .

L'expression de la puissance en ce point est donnée par:

$$P_{mp} = V_{mp} * I_{mp} \quad (I.10)$$

- **Facteur de remplissage FF** ; il correspond au rapport de puissance maximale sur le produit de V_{oc} et I_{sc} , il reflète la qualité de la cellule par rapport à la cellule idéale avec $FF=1$.

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (I.11)$$

- **Le rendement de la cellule** ; c'est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Il est égal au rapport entre la puissance électrique que l'on peut extraire au point de puissance maximale et la lumière incidente.

$$\eta = \frac{p_{max}}{P_{in}} = \frac{FF * I_{sc} * V_{oc}}{P_{in}} \quad (I.12)$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 1 W/cm^2

I.5 Constitution d'un générateur photovoltaïque

La fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces et l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc...), peuvent endommager les cellules de façon permanente. [3]

I.5.1 Association en série

Si on assemble en série des cellules, la tension aux bornes de l'assemblage est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules

$$U = \sum U_c \quad (I.13)$$

U (Volt) : Tension aux bornes de l'assemblage.

U_c (Volt) : Tension aux bornes de la cellule d'indice " c ".

Dans ce cas, le courant qui traverse les cellules est le même mais les cellules peuvent fonctionner à des tensions différentes.

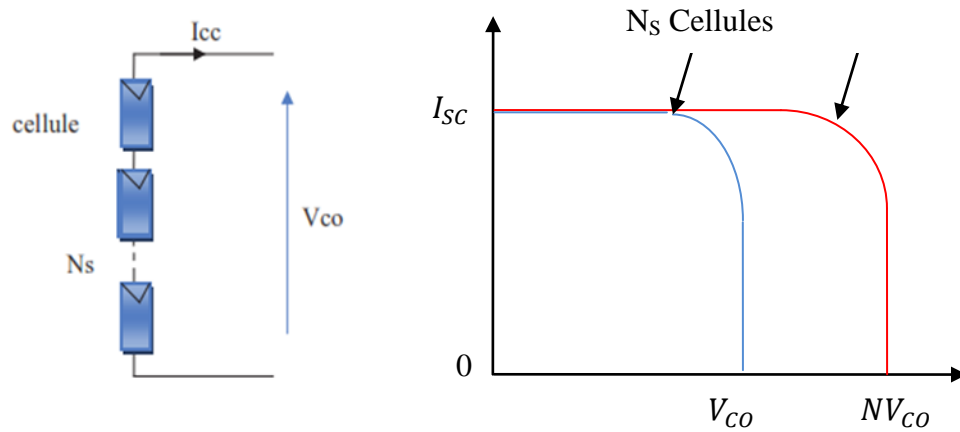


Figure I.4 : Caractéristique I/V d'un groupement en série de Cellules PV

I.5.2 Association en parallèle

Dans le cas d'un montage en parallèle, le courant de l'ensemble sera égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

$$I = \sum I_C \quad (\text{I. 14})$$

I (Ampère) : Courant circulant dans l'assemblage.

Ic (Ampère) : Courant circulant dans chaque cellule.

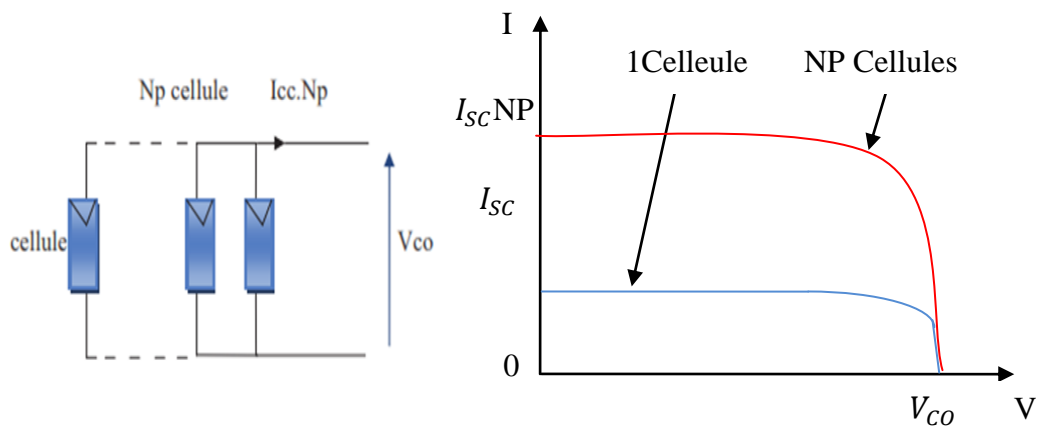


Figure I.5 : Caractéristique I/V d'un groupement en parallèle de cellules PV

Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent la même tension mais elles fonctionnent avec des courants différents.

I.6 : Générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque constitue l'élément fondamental d'un générateur électrique. Elle délivre une puissance très faible pour la majorité des applications domestiques ou industrielles. Les cellules sont triées afin qu'elles aient toutes à peu près les mêmes caractéristiques, puis assemblées en : série, parallèle, et série-parallèle pour constituer le

générateur électrique appelé aussi le module photovoltaïque.

Le module photovoltaïque PV-I106/24 est choisi pour la modélisation puis la simulation. Il contient (72) cellules en série solaire du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximum nominale de 106Wat. Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau suivant :

Tableau I.1 : Caractéristique du panneau photovoltaïque PV-I106/24

Caractéristiques physiques		PV-I106/24
Nombre de cellules en série (N_s)		$N_s = 72$
Nombre de cellules en parallèle(N_p)		$N_p = 1$
Caractéristiques électriques (STC)		$G_a = 1000w/m^2$ $T_a = 25C^0, AM1.5$
Puissance maximale (P_{max})		$106 \pm 5\%W$
Tension au point maximale (V_{mpp})		34.5V
Courant au point maximal (I_{mpp})		3.08A
Tension de circuit ouvert (V_{oc})		43.6 V
Courant de court circuit (I_{sc})		3.27 A

Pour construire un modèle équivalent (par Simulink), les expressions de la cellule puis d'un générateur PV a été utilisé. Le schéma représentatif du modèle mathématique courant tension d'un module photovoltaïque sous Matlab-Simulink est donné par la figure I.7 :

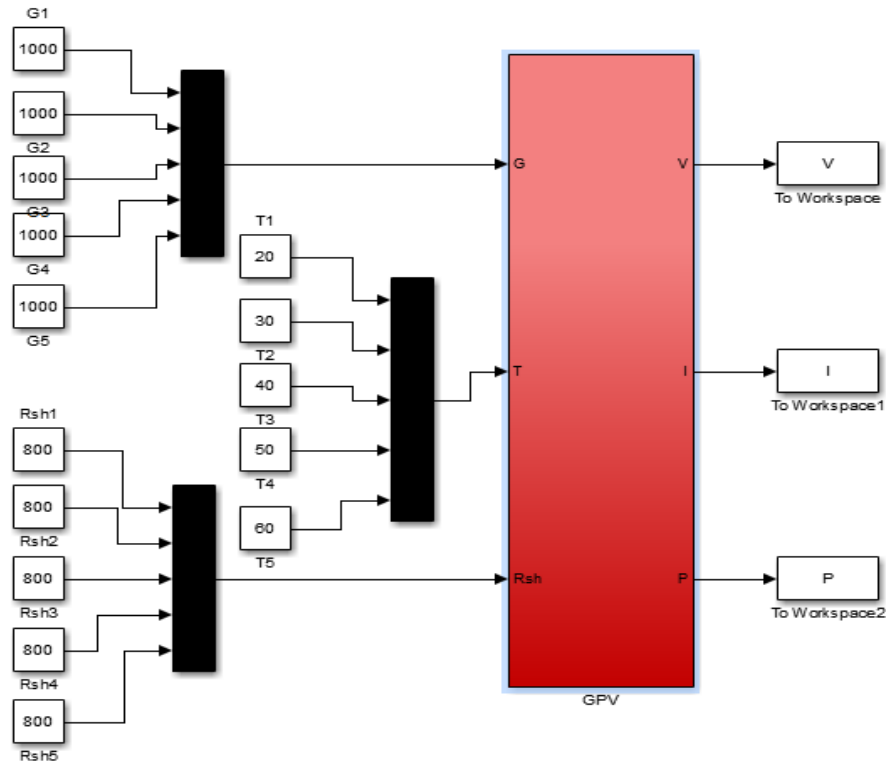


Figure I.6 : Modèle 'SIMULINK' du panneau solaire.

I.6.1 Caractéristique courant-tension

La tension aux borne 72 cellules, cette tension atteint 43.6V, le courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul est de 3.27A la figure I.7représente la caractéristique courant-tension d'un générateur

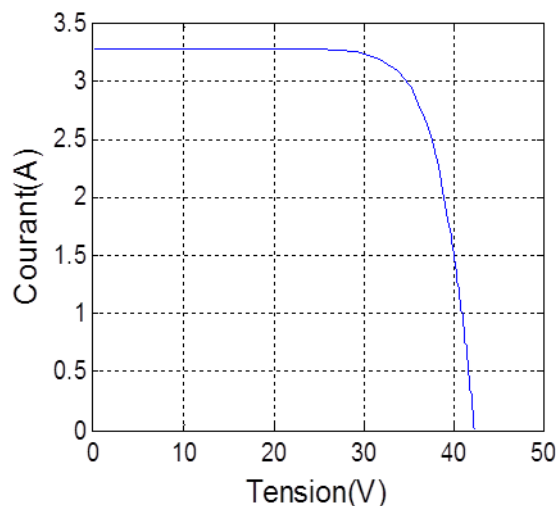


Figure I.7 : Caractéristique courant-tension d'un générateur

I.6.2 Caractéristique puissance-tension

La puissance produite par le GPV peut dépasser 100W la figure I.8 représente la caractéristique puissance-tension d'un générateur.

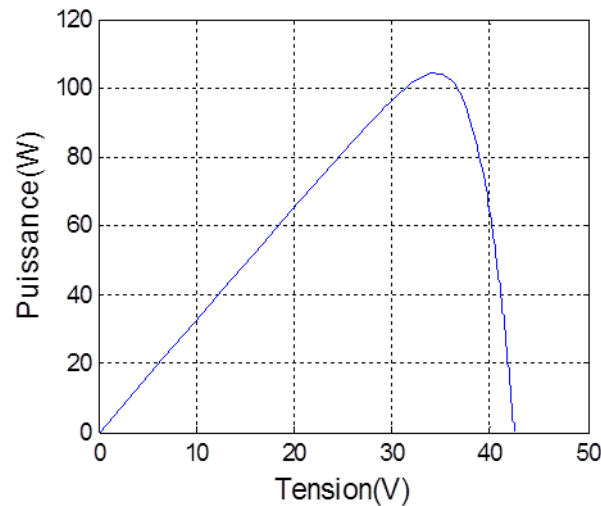


Figure I.8 : Caractéristique puissance-tension d'un GPV

I.6.3 Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température constante

particulièrement aux conditions standards (STC) ($G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T_a = 25^\circ\text{C}$), la caractéristique courant/tension $I_{PV}=f(V_{PV})$ et la caractéristique puissance/tension $P_{PV}=f(V_{PV})$ sont données sur la figure suivante :

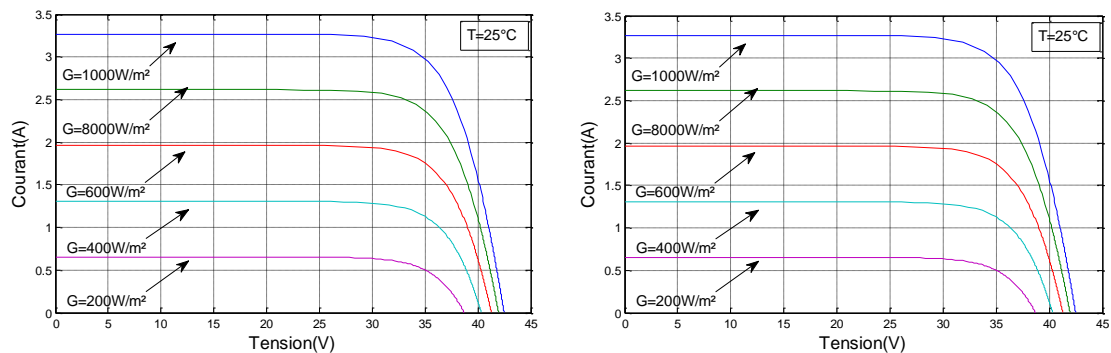


Figure I.9 : caractéristique (puissance-tension) et caractéristique (courant-tension) du GPV

I.6.4 Simulation du générateur (GPV) à éclairement variable

Le courant produit par la photopile I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire (G). Par contre, la tension V aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N _P du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminue que légèrement avec l'éclairement, ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule P_m est pratiquement proportionnelle à l'éclairement

- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension (Voir figure I.10 et figure I.11).

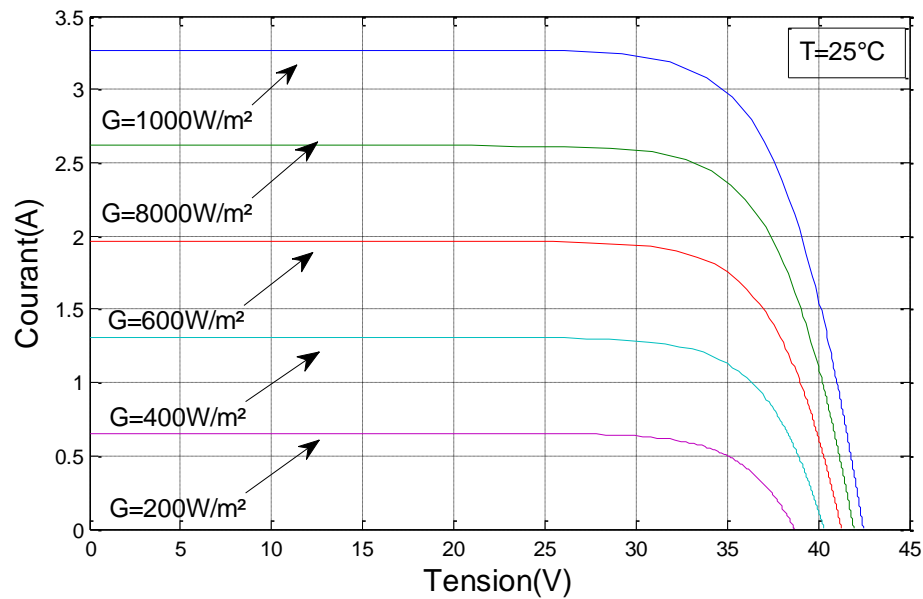


Figure I.10. Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique ($I-V$) à température constante

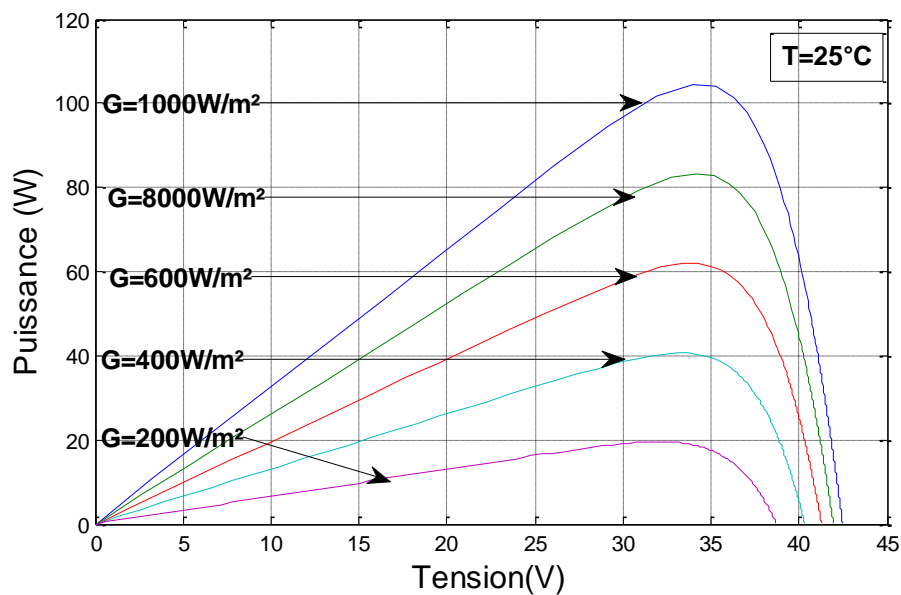


Figure I.11. Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique ($P-V$) à température constante

I.6.5 Simulation du générateur (GPV) à température variable

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur (voir Figure I.12 et I.13), pour une température qui change, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier varie légèrement.

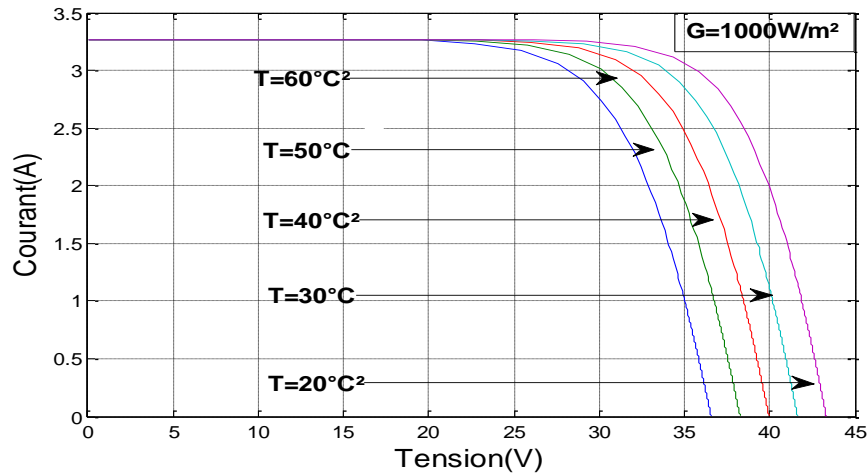


Figure I.12. Influence de la température sur la caractéristique (I-V) à un éclairement constant

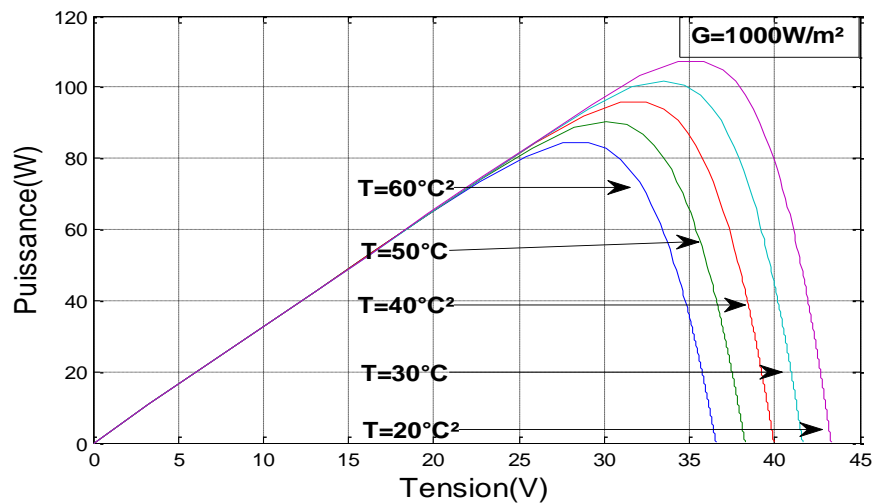


Figure 1.13. Influence de la température sur la caractéristique (P-V) à un éclairement constant

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes configurations des systèmes photovoltaïque, nous avons présenté aussi le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, ainsi que les technologies utilisées pour sa mise en œuvre.

Concernant la modélisation de la cellule, nous nous sommes basés sur le modèle électrique équivalent et le modèle mathématique pour présenter les différentes caractéristiques de la cellule ainsi que celle des panneaux photovoltaïques, ceci va nous faciliter la mise en œuvre de notre système d'optimisation.