

II.1. Introduction

Comme tout système physique, l'étude théorique (comportement, dimensionnement, ...) du système photovoltaïque commence d'abord par comprendre son principe de fonctionnement avant de passer à sa modélisation mathématique. Dans ce contexte, dans ce chapitre, on commence d'abord par l'explication des différents aspects liés au rayonnement solaire qui est la source primaire dans la chaîne de conversion photovoltaïque. Ensuite, la cellule photovoltaïque étant le cœur du processus de la conversion photovoltaïque (effet photovoltaïque) son principe de fonctionnement sera expliqué tout en exposant les différents types (technologies) des cellules PV et leurs caractéristiques. Puis, comme premier élément de la chaîne de conversion PV, la cellule PV sera le premier élément à modéliser et à simuler sous différentes conditions climatiques (ensoleillement (rayonnement solaire) et température variables). Par la suite, l'effet de l'association en série et/ou en parallèle de plusieurs cellules PV constituant un module, un panneau et un champ sera mis en évidence sous différentes conditions climatiques (ensoleillement uniforme et température variables). Enfin, l'effet de l'ensoleillement uniforme et l'ensoleillement non-uniforme (ombrage partiel) sur les caractéristiques Puissance-Tension (P-V), Courant-Tension (I-V) du générateur PV sera analysé.

II.2. Rayonnement solaire

L'énergie ou le rayonnement solaire émis par le Soleil se transmet à travers l'espace et subit une atténuation importante. Lorsqu'il atteint l'atmosphère, sa densité moyenne totale vaut 1367 W/m^2 , à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre soit variable et abondamment disponible sur toute la surface de la terre avec une valeur maximale d'environ 1000 W/m^2 (rarement 1200 W/m^2) [59]. En effet, la rotation et l'inclinaison de la terre rendent le flux solaire reçu au niveau du sol dépendant des facteurs suivants :

- La direction, la nature et l'inclinaison de la surface de la Terre.
- La localisation géographique du site (Latitude et Altitude du lieu).
- La période de l'année (la saison),
- L'heure ou le moment considéré dans la journée,
- Les conditions météorologiques et degré de pollution (nuageuses, nébulosité, poussière, humidité...).

II.2.1. Type de rayonnement

Il y a quatre types de rayonnement [33], [59] :

- **Rayonnement direct**

C'est un rayonnement reçu directement du soleil sans être diffusé par l'atmosphère. Ses rayons parallèles entre eux peuvent être mesurés avec un pyréliomètre.

- **Rayonnement diffus**

La diffusion est le phénomène responsable de l'éclatement et la distribution du faisceau lumineux parallèle provenant directement du soleil en plusieurs faisceaux qui vont dans toutes les directions dans le ciel par l'action des molécules d'air, des gouttelettes d'eau (nuages) et des poussières. Le rayonnement produit par ce phénomène est le rayonnement diffus. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

- **Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol**

C'est la partie du rayonnement incident qui est réfléchi par un obstacle (le sol ou par des objets se trouvant à sa surface), tout dépend de la valeur moyenne de sa réluctance vis-à-vis du rayonnement considéré et l'angle d'incidence rayonnement incident. Plus l'obstacle est réfléchissant plus l'albédo est important.

- **Rayonnement global**

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus par un objet : le rayonnement direct, le rayonnement diffus, le rayonnement réfléchi. Il peut être mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

La figure II.1 représente les différents types du rayonnement solaire.

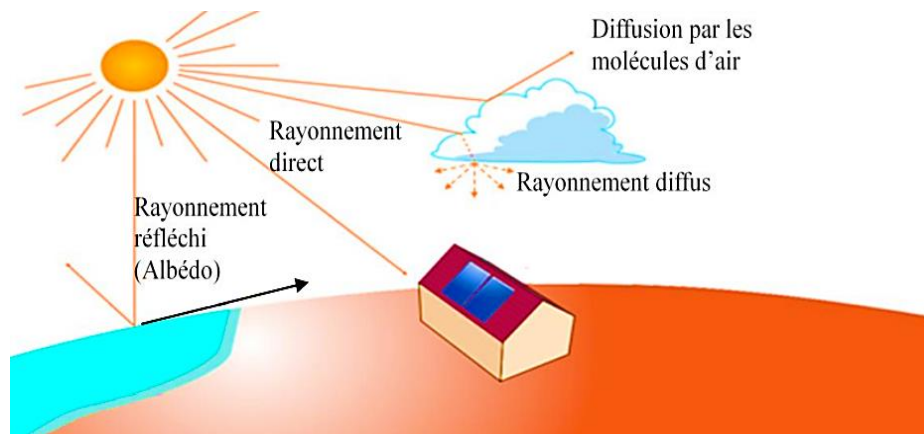


Figure II.1 : Différents types du rayonnement solaire

II.2.3. Spectre du rayonnement

Le rayonnement solaire mis par le soleil est un rayonnement électromagnétique composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde du rayon solaire λ selon la formule suivante [17] :

$$E = \frac{h \cdot C}{\lambda} \quad (\text{II.1})$$

Où :

h : Constante de Planck égale à $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s

C : Vitesse de propagation des photons (vitesse de lumière) égale à 3×10^8 m/s.

La figure II.2 représente la variation de la répartition spectrale énergétique solaire (analyse spectrale du rayonnement solaire) qui est comprise dans une bande de longueur d'onde variant de $0,2 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en [17], [33] :

- Ultraviolet (UV) : rayonnement invisible avec une longueur d'onde ($0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$) ou ($0,20 < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$) qui présente 9 % du rayonnement solaire.
- Visible avec une longueur d'onde ($0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$) ou ($0,4 \mu\text{m}$ à $0,8 \mu\text{m}$) qui présente 47 % du rayonnement solaire.
- Infrarouge (IR) (invisible) : rayonnement invisible avec une longueur d'onde ($0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$) ou ($0,8 < \lambda < 10 \mu\text{m}$) qui présente 44 % du rayonnement solaire.

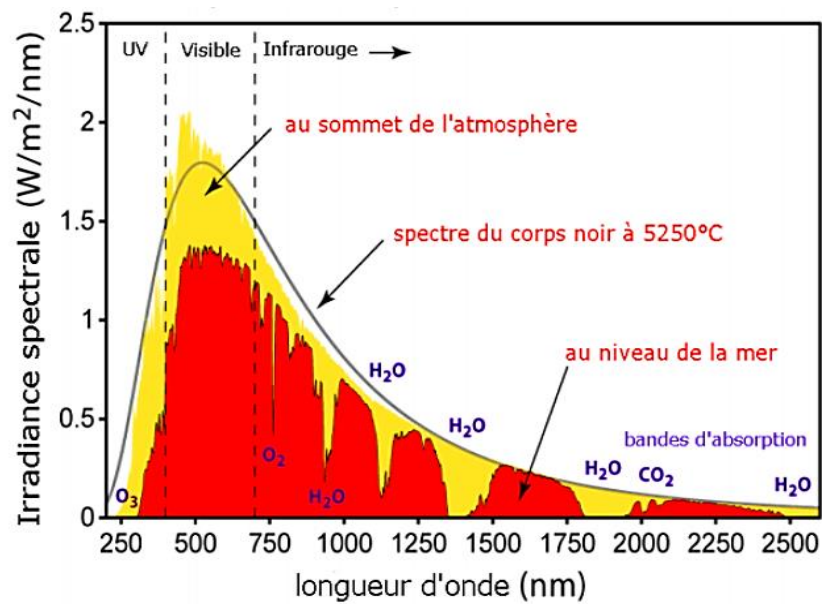


Figure II.2 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

II.2.4. Durée d'insolation ou d'ensoleillement

La durée d'ensoleillement vrai ou effectif dépend du fait que le soleil levant soit visible depuis le point d'observation ou caché par les nuages. En l'absence d'héliographe, il est possible de calculer la durée de l'éclairement du Soleil en étudiant le mouvement astronomique relatif du Soleil et de la Terre durant la journée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente, qui dépend elle-même de la période de l'année considérée [33].

II.3. Conversion photovoltaïques

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observé la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1954 que les chercheurs de la compagnie Bell Telephone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile (la cellule solaire), l'élément primaire d'un système photovoltaïque [17], [33].

II.3.1. Effet photovoltaïque et semi-conducteur

L'effet photovoltaïque est le processus de conversion de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de la cellule photovoltaïque basée sur des matériaux semi-conducteurs [17], [33]. Ces matériaux semi-conducteurs dites intrinsèques tels que le silicium, le germanium, le sulfure de gallium et l'arséniure de gallium, peuvent céder facilement un électron

parmi les 4 électrons de la couche extérieure de leurs atomes lorsque exposés à une température, une tension ou un rayonnement lumineux élevé. Le déplacement de ces électrons produit un courant électrique.

Pour augmenter le nombre des électrons libérés sous l'effet du rayon lumineux, le semi-conducteur intrinsèque est dopé soit en [17], [33] :

- introduisant dans la structure cristalline du Semi-conducteur intrinsèque des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal (ex : le phosphore), et devenir un semi-conducteur extrinsèque à dopage négatif (dopage de type N).
- insérant dans le réseau Cristallin du Semi-conducteur intrinsèque des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un trou (absence d'un électron) excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal (ex : le bore), et devenir un semi-conducteur extrinsèque à dopage positif (dopage de type P).

II.3.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un dispositif électronique qui a la particularité de produire de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière.

La cellule photovoltaïque n'est rien qu'une jonction PN, composée de la juxtaposition dans le même semi-conducteur de deux types de dopages différents (P et N) [33]. Une fois juxtaposés, les électrons excédentaires des atomes de la zone N se diffusent vers la zone P pour rejoindre les trous excédentaires des atomes de cette zone. Donc, les atomes de la zone N voisinant la zone de juxtaposition deviennent des ions positivement chargés (perte d'électrons) alors que les atomes de la zone P voisinant la zone de juxtaposition s'ionisent négativement (réception d'électrons). Ces ions de charges différents créent un champ électrique ou une barrière de potentiel dans la zone de juxtaposition du semi-conducteur. Ce champ, une fois créé, empêche la diffusion des autres électrons de la zone N vers la zone P et permet de séparer les électrons et les trous provoqués par l'absorption lumineuse dans le matériau. En reliant la zone N riche en électrons libres avec la zone P riche en trous libres par un conducteur électrique extérieure (par rapport à la jonction PN), les électrons libres de la zone N vont se déplacer via ce conducteur pour rejoindre les trous libres de la zone P. Par conséquent, un courant électrique se produit et circule de la zone P vers la zone N, dans le sens contraire de celui de déplacement des électrons (Figure II.3). Le processus continuera tant que la jonction PN est exposée aux rayons lumineux d'intensité suffisante [17].

La figure II.3 illustre le principe du fonctionnement d'une jonction P-N

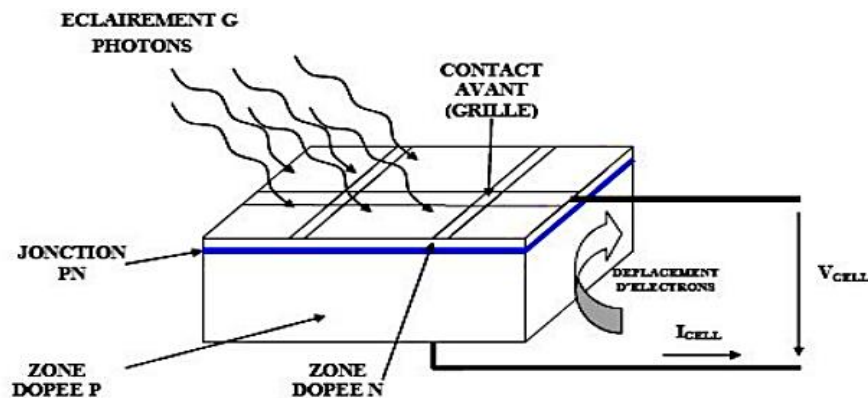


Figure II.3 : Principe de fonctionnement d'une jonction P-N photovoltaïque

II.3.3. Types des cellules photovoltaïques

La plupart des cellules solaires disponibles sur le marché mondial, sont à base de silicium, soit du type mono, poly cristallin ou amorphe [17], [33].

- **Les cellules monocristallines** : Elles ont les meilleurs rendements mais aussi le coût le plus élevé en raison de la fabrication complexe.
- **Les cellules poly-cristallin** : Leurs rendement est moindre, mais avec une conception plus simple, et un coût de fabrication moindre.
- **Les cellules amorphes** : Elles sont à base de silicium ultra-fin, peu coûteux mais peu efficace. Ils sont utilisés dans les produits de petite consommation tels que les calculatrices solaires ou les montres.

Les cellules photovoltaïques se différencient selon le matériau semi-conducteur utilisé (Silicium (Si), Germanium (Ge), Arséniure de gallium (GaAs), cuivre-indium-sélénium (CIS), Tellurure de Cadmium (CdTe)) et selon sa structure du réseau atomique (Monocristallin, Poly-cristallin et amorphe). Chaque type de cellule a son propre rendement et coût. Cependant, quel que soit son type, le rendement de la cellule photovoltaïque reste très faible : de 8 à 23 % de l'énergie solaire reçue est convertie en énergie électrique, comme indiqué dans le tableau suivant [17], [33].

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'applications
	Théorique	En laboratoire	Disponible	
Silicium monocristallin	27	24,7	14-16	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium Poly cristallin	27	19,8	12-14	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	Appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre), modules des grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de gallium GaAs	29	27,5	18-20	Système de concentrateur, espace (satellites)
CIS (cuivre-indium - sélénium)	27,5	18,2	10-12	Appareils de faibles puissances, modules des grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Gadmiun CdTe	28,5	16	9-11	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

Tableau II.1 : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

II.4. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est équivalente à une jonction semi-conducteur PN, c'est-à-dire à une diode. Il existe de nombreux phénomènes physiques intrinsèques accompagnant la conversion de l'énergie photovoltaïque (lumineuse) en énergie électrique, dont leur prise en considération ou leur négligence défini la précision du modèle mathématique équivalent. De ce fait, il existe plusieurs modèles mathématiques équivalents à une cellule photovoltaïque.

II.4.1. Modèles à une diode d'une cellule photovoltaïque

II.4.1.1. Modèle à 3 paramètres 1E3P

Une cellule photovoltaïque idéale (sans pertes) peut être représentée de manière simple, par une source idéale de courant I_{ph} (I_L) proportionnel à l'énergie de la lumière incidente en parallèle avec

une diode. Son circuit équivalent à base d'un modèle à une diode à trois paramètres est illustré dans la Figure II.4 [17], [33] :

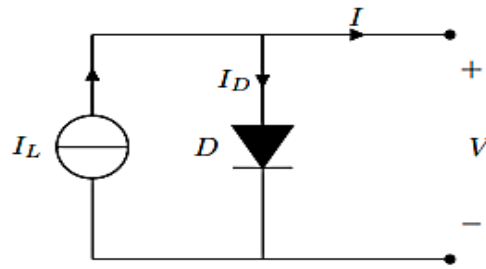


Figure II.4 : Schéma équivalent d'une cellule PV idéale avec un modèle à trois paramètres.

Les trois paramètres de ce circuit sont : Le Photo-courant ($I_L(A)$ ou $I_{ph}(A)$), Le Facteur d'idéalité (A) et Le courant de saturation inverse de la diode (I_D ou $I_0(A)$). Grâce au schéma équivalent (figure II.4) et en appliquant les lois de Kirchhoff, on obtient les équations suivantes [17], [33] :

$$I = I_L - I_D \quad (II.2)$$

Le courant de la diode idéale à l'obscurité est donné par la relation suivante :

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (II.3)$$

En combinant les deux équations précédentes, on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (II.4)$$

Avec :

I_{ph} (I_L) : Photo-courant.

I_D : courant de recombinaison dans la zone de déplétion (zone de la jonction).

I_0 : Courant de saturation de la diode

A : Facteur d'idéalité de la diode

k : Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

q : Charge électrique (d'électron) (en coulomb)

T : Température en Kelvin

II.4.1.2. Modèle à 4 paramètres 1E4P

Le modèle photovoltaïque à quatre paramètres est constitué d'une source idéale de courant (Photocourant) connecté en parallèle avec une diode, le tout en série avec une résistance série de R_s . La figure II.5 montre le circuit équivalent à quatre paramètres de la cellule photovoltaïque [17].

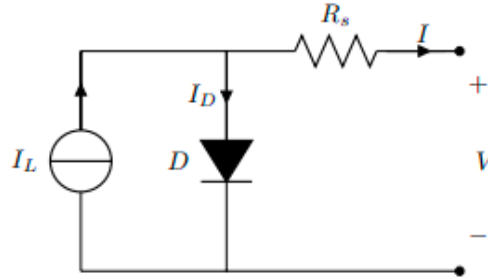


Figure II.5 : Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle à quatre paramètres 1E4P.

Ce modèle par rapport au précédent possède un quatrième paramètre en plus, qui est la résistance R_s , présentant la résistance entravant la circulation des électrons (résistance des matériaux des électrodes, des semi-conducteurs) et provoquant la chute de tension de sortie. L'équation caractéristique est dérivée directement des lois de Kirchhoff.

$$I = I_L - I_D \quad (\text{II.5})$$

Le courant de diode est donné par la formule suivante :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.6})$$

On remplace l'équation (II.6) dans l'équation (II.5) et on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.7})$$

II.4.1.3. Modèle à 5 paramètres 1E5P

Le modèle à cinq paramètres à une diode est une version complémentaire du modèle à quatre paramètres. Ce modèle contient, en plus, la résistance parallèle R_p , liée aux recombinaisons volumiques des paires électrons-trous et aux effets de bord, nécessaire pour tracer la caractéristique I-V dans la région proche du point de court-circuit (Figure II.6) [10], [11], [17], [33], [60].

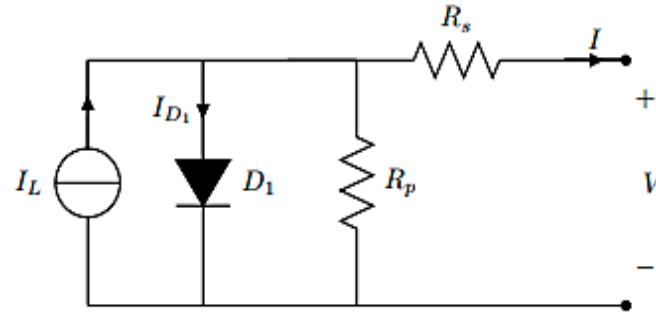


Figure II.6 : Schéma équivalent d'une cellule PV réelle avec un modèle à cinq paramètres à une diode

Grâce au schéma équivalent de la figure II.6 et en utilisant les lois de Kirchhoff, on aura les équations suivantes :

$$I = I_L - I_{sh} - I_D \quad (II.8)$$

Le courant de la diode est donné par la formule suivante :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (II.9)$$

Le courant de la résistance parallèle est donné par la relation :

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (II.10)$$

On remplace les équations (II.9) et (II.10) dans l'équation (II.8) et on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (II.11)$$

II.4.2. Modèles à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

II.4.2.1. Modèle à deux diodes avec cinq paramètres 2E5P

Ce modèle de la cellule photovoltaïque idéale est caractérisé par la mise en parallèle de la source de courant idéale (photo-courant) avec deux diodes, comme indiqué sur la figure II.7 [17], [59].

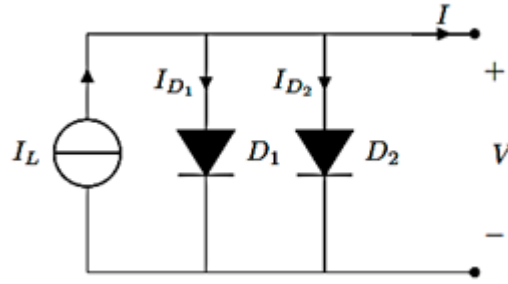


Figure II.7 : Circuit équivalent de la cellule PV idéale avec un modèle à cinq paramètres à deux diodes

Les cinq paramètres de ce circuit sont : Le Photo-courant ($I_{ph}(A)$), Le Facteur d'idéalité de diode 1 (A_1), le Facteur d'idéalité de diode 2 (A_2), le Courant de saturation inverse de la diode 1 ($I_{D1}(A_1)$ ou $I_{01}(A_1)$) et le courant de saturation inverse de la diode 2 ($I_{D2}(A_2)$ ou $I_{02}(A_2)$).

Grâce au schéma équivalent (figure II.7) et en utilisant les lois de Kirchhoff on obtient les équations suivantes :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (II.12)$$

Les diodes étant des éléments du modèle, leurs caractéristiques I - V sont données par les relations suivantes :

$$I_{D1} = I_{01} \left[\exp \left(\frac{q}{A_1 k T} \right) - 1 \right] \quad (II.13)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left[\exp \left(\frac{q}{A_2 k T} \right) - 1 \right] \quad (II.14)$$

Avec :

I_{D1} : courant de recombinaison dans la zone de déplétion (zone de la jonction).

I_{D2} : courant de recombinaison dans la zone quasi-neutre.

En remplaçant les équations (II.13) et (II.14) dans l'équation (II.12), on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q}{A_2 k T} \right) - 1 \right] \quad (II.15)$$

II.4.2.1. Modèles à 6 paramètres 2E6P

Un modèle à six paramètres à deux diodes d'une cellule photovoltaïque est composé d'une source de courant dépendante du rayonnement solaire connectée à deux diodes en parallèle ; le tout est mise en séries avec une résistance R_s . La figure II.8 montre le circuit équivalent à six paramètres d'une cellule photovoltaïque [17], [59].

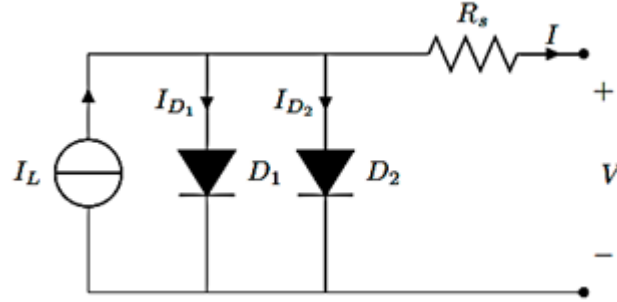


Figure II.8 : Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle à six paramètres à deux diodes 2E6P

L'équation liant les différents courants du circuit équivalent se déduit des lois de Kirchhoff :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (II.16)$$

Les diodes étant des éléments de ce modèle, leurs caractéristiques I - V sont données par les relations suivantes :

$$I_{D1} = I_{01} \left[\exp \left(\frac{q}{A_1 k T} (V + I R_s) \right) - 1 \right] \quad (II.17)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left[\exp \left(\frac{q}{A_2 k T} (V + I R_s) \right) - 1 \right] \quad (II.18)$$

On remplace les équations (II.17) et (II.18) dans l'équation (II.16) pour obtenir l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q}{A_1 k T} (V + I R_s) \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q}{A_2 k T} (V + I R_s) \right) - 1 \right] \quad (II.19)$$

II.4.2.1. Modèle à deux diodes avec sept paramètres 2E7P

Cette fois-ci le modèle équivalent de la cellule PV contient sept paramètres avec deux diodes. Le schéma du circuit équivalent de ce modèle est le suivant [17], [59] :

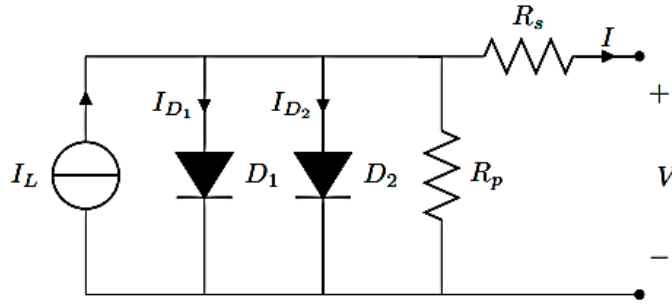


Figure II.9 : Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle à sept paramètres à deux diodes 2E7P

Les courants du circuit équivalent sont liés par l'équation suivante :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (II.20)$$

Où les courants I_{D1} et I_{D2} sont donnés par :

$$I_{D1} = I_{01} \left[\exp \left(\frac{q}{A_1 kT} (V + IR_s) \right) - 1 \right] \quad (II.21)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left[\exp \left(\frac{q}{A_2 kT} (V + IR_s) \right) - 1 \right] \quad (II.22)$$

Le courant de la résistance parallèle est donné par la relation suivante:

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (II.23)$$

En remplaçant les équations (II.21), (II.22) et (II.23) dans l'équation (II.20), on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q}{A_1 kT} (V + IR_s) \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q}{A_2 kT} (V + IR_s) \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (II.24)$$

II.4.3. Effet de conditions climatiques sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Pour généraliser les équations des modèles précédents de la cellule PV et assurer leur validité pour différentes conditions météorologiques (ensoleillement et température), l'expression du courant de court-circuit (I_{sc}) souvent considéré comme le photo-courant I_{ph} (I_L) (I_{sc} est quasiment égal au photo-courant I_{ph} (I_L)) ainsi que celle de la tension à vide d'une cellule photovoltaïque sont exprimées comme suit [17], [59] :

$$I_{sc} = (G/G_{ref}) (I_{sc_{ref}} - \mu_c (T_c - T_{ref})) \quad (II.25)$$

$$V_{oc} = V_{oc_ref} - \mu_c(T_c - T_{ref}) \quad (II.26)$$

Où :

I_{sc_ref} : Courant de court-circuit de la cellule PV dans les conditions climatiques standards (G_{ref} (ensoleillement de 1000 W/ m²) et (T_{ref} (température de 25°C))) ;

V_{oc} : Tension à vide (circuit ouvert) de la cellule PV dans les conditions climatiques standards (ensoleillement de 1000 W/ m² et température de 25°C) ;

I_{sc} : Courant de court-circuit dans les conditions climatiques instantanées données (G et T) ;

V_{oc} : Tension à vide dans les conditions climatiques instantanées données (G et T) ;

G : Eclairement instantané ;

T : Température instantanée ;

G_{ref} : Eclairement de référence ;

T_{ref} : Température de référence ;

μ_c : Facteur d'influence de la température sur le courant de court-circuit ;

μ_v : Facteur d'influence de l'éclairement sur la tension à vide.

II.5. Paramètres de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est caractérisée par son rendement de conversion, sa tension à circuit ouvert V_{oc} , son courant de court-circuit I_{sc} et son facteur de forme FF . Ces paramètres sont déterminés par la caractéristique courant-tension de la cellule PV [17], [33], [59], [61].

II.5.1. Courant de court-circuit I_{sc}

Le courant obtenu lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ($V = 0$) est appelé courant de court-circuit I_{sc} . Il augmente linéairement avec l'intensité d'éclairement de la cellule (la longueur d'onde du rayonnement) et dépend de la surface éclairée, et de la température.

II.5.2. Tension à circuit ouvert V_{oc}

Lorsque la branche contenant la cellule PV est ouverte (le courant traversant la cellule est nul), la tension entre ses bornes, dite tension de circuit ouvert V_{oc} , est obtenue. Cette dernière dépend principalement du type de cellule photovoltaïque et de la résistance shunt. Sa valeur diminue avec la température et varie légèrement avec l'intensité lumineuse.

II.5.3. Puissance caractéristique d'une cellule photovoltaïque

La puissance électrique P_{PV} disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est égale au produit du courant continu I fourni par la cellule PV et la tension entre ses bornes, obtenues dans des conditions ambiantes constantes de fonctionnement (éclairage, température).

$$P_{PV} = VI \quad (II.27)$$

II.5.4. Rendement de la cellule

Le rendement η de la cellule photovoltaïque, déterminant son efficacité de conversion d'énergie, est le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et la puissance de la lumière incidente. Il dépend du courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{EA} \quad (II.28)$$

Où

A est la surface génératrice (ensoleillée) de la cellule PV en m^2 ,

E est l'ensoleillement en W/m^2 .

II.5.5. Facteur de forme FF

Ce paramètre, lié à la caractéristique $I(V)$ de la cellule PV, est utilisé pour qualifier la qualité de la cellule PV en tant que générateur électrique. Ce paramètre, appelé facteur de remplissage ou facteur de forme, correspond au rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et la puissance formée par le produit ($V_{oc} I_{sc}$) correspondant à la puissance maximale idéale. Plus la valeur de ce facteur est élevée, plus la puissance exploitable est élevée.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (II.29)$$

II.6. Module, Panneau et champ photovoltaïques

Un module photovoltaïque est un ensemble de cellules photovoltaïques qui sont souvent placées en série et/ou en parallèle et sont recouvertes d'un panneau de verre à l'avant et d'un autre matériau étanche à l'arrière pour le protéger de l'humidité et des chocs. Afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation et pour construire un panneau photovoltaïque, les modules peuvent être connectés en série et en parallèle. De même, l'association en séries et en parallèle des panneaux

photovoltaïques produit le champ photovoltaïque. Ces associations sont réalisées avec quelques précautions, car avoir des cellules (modules ou panneaux) moins performantes et le blocage d'une ou plusieurs cellules (modules ou panneaux), dû à l'ombrage ou à la poussière par exemple, peut endommager définitivement les cellules photovoltaïques (modules ou panneaux) [17], [33], [61].

II.6.1. Association en série des cellules photovoltaïques

Les N_s cellules photovoltaïques, mise en série, sont parcourus par le même courant, alors leurs tensions s'ajoutent pour augmenter la tension résultante. Donc, la tension V_{oc} du générateur résultant est la somme des tensions V_{oc} des cellules mise en série. Le courant généré par les N_s cellules photovoltaïques en série est le même dans toute la branche. Donc, le courant I_{cc} de la cellule est égal au courant I_{cc} du générateur résultant. Il est limité par le courant des cellules de la même branche (il est limité par le courant de la cellule de plus faible courant (cellule moins ensoleillée)) [17], [33], [61]. Les caractéristiques I-V et P-V résultantes sont illustrées dans la Figure II.10.

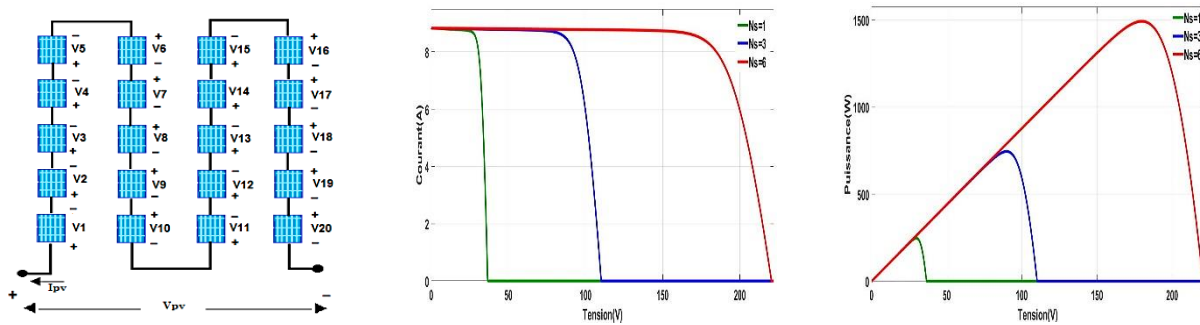


Figure II.10 : Caractéristiques I-V et P-V de l'association en série des cellules PV

Les équations (II.30) et (II.31) résument les caractéristiques électriques d'une association en série de N_s cellules.

$$I_{pv} = I_c \quad (II.30)$$

$$V_{pv} = N_s V_c \quad (II.31)$$

où:

N_s : Nombres de cellules (modules, panneaux) PV mises en série dans une seule branche.

I_c : Courant de la cellule PV,

I_{pv} : Courant du générateur PV résultant de l'association de certains nombres de cellules PV,

V_c : Tension aux bornes de la cellule PV,

V_{pv} : Tension aux bornes du générateur PV résultant de l'association de certains nombres de cellules PV.

II.6.2. Association en parallèle des cellules photovoltaïques

Dans ce cas, la tension aux bornes de chacune des cellules mises en parallèle est la même ; Donc, la tension V_{oc} de la cellule est égale à la tension V_{oc} du générateur résultant. Les courants des cellules (branches) mises en parallèles s'additionnent pour produire un courant total élevé. Donc, le courant I_{cc} du générateur résultant est la somme des courants I_{cc} des cellules mises en parallèle. Les caractéristiques I-V et P-V résultantes sont illustrées dans la Figure II.11 [17], [33], [61].

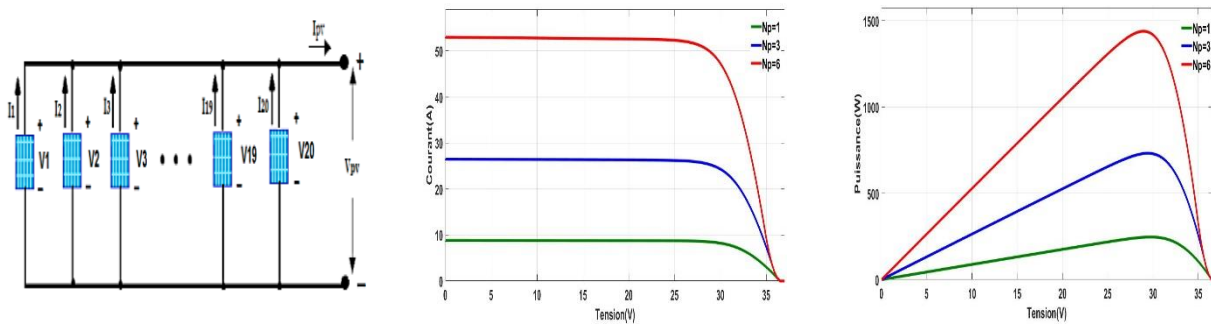


Figure II.11 : Caractéristiques I-V et P-V de l'association en parallèle des cellules PV

Les équations (II.32) et (II.33) résument les caractéristiques électriques d'une association en parallèle de N_p cellules (modules, panneaux).

$$I_{pv} = N_p I_c \quad (II.32)$$

$$V_{pv} = V_c \quad (II.33)$$

où:

N_p : Nombres de cellules (modules, panneaux) PV mises en parallèle (nombre de branches en parallèle).

I_c : Courant de la cellule PV (courant d'une branche),

I_{pv} : Courant du générateur PV résultant de l'association de certains nombres de cellules PV,

V_c : Tension aux bornes d'une cellule PV,

V_{pv} : Tension aux bornes du générateur PV résultant de l'association de certains nombres de cellules PV.

II.6.3. Connexion Série-parallèle (SP) des cellules photovoltaïques

Les cellules (modules, panneaux) PV sont réparties sur des branches en parallèle contenant chacune le même nombre des cellules (modules, panneaux) mise en série, comme illustré dans la Figure II.12. Ce type de configuration augmente la tension et le courant de sortie du générateur PV (modules, panneaux, champ).

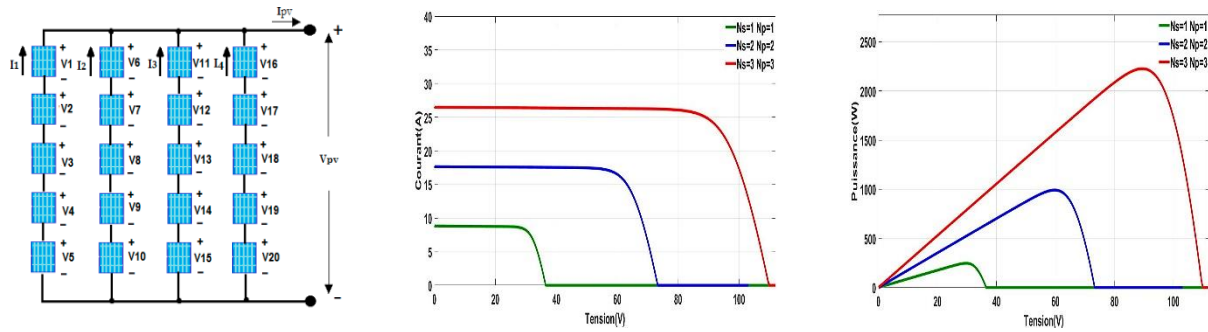


Figure II.12 : Caractéristiques I-V et P-V de l'association mixte des cellules PV

Le courant et la tension aux bornes d'un générateur PV résultant d'une association mixte des cellules (modules, panneaux) PV sont exprimés par la relation suivante [17], [33], [61] :

$$I_{pv} = N_p I_c \quad (II.34)$$

$$V_{pv} = N_s V_c \quad (II.35)$$

Où :

I_{pv} , V_{pv} : sont respectivement le courant et la tension aux bornes du générateur PV résultant.

N_p , N_s : sont respectivement le nombre des cellules connectés en parallèle (branches) et le nombre de cellules connectés en série par branche.

L'équation relative au générateur PV résultant d'une association mixte formé de N_p branches en parallèle avec N_s cellules en série par branche est donnée par [10] :

$$I = N_p I_L - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{A k T} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right) - 1 \right) - \frac{N_p}{R_p} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right) \right] \quad (II.36)$$

II.6.4. Effet des conditions climatiques sur les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

II.6.4.1. Effet de la température

Les performances des cellules (modules, panneaux et champs) photovoltaïques varient en fonction de la température de la jonction PN de la cellule. La figure II.13 montre que la tension à vide d'un module solaire diminue avec l'augmentation de la température des cellules [17], [33], [61]. L'ordre de grandeur de la chute de tension est de 23 mV par degré Celsius par cellule. D'autre part, le courant de court-circuit augmente légèrement avec la diminution de la température de la cellule [17], [33], [61]. Pour un ensoleillement uniforme des cellules (modules, panneaux et champs), la caractéristique P-V, décrivant la puissance produite par le générateur PV en fonction de la tension à ses bornes, présente une courbe non-linéaire avec un seul point maximal. Ce point de puissance maximale varie en fonction de la température (figure II.13).

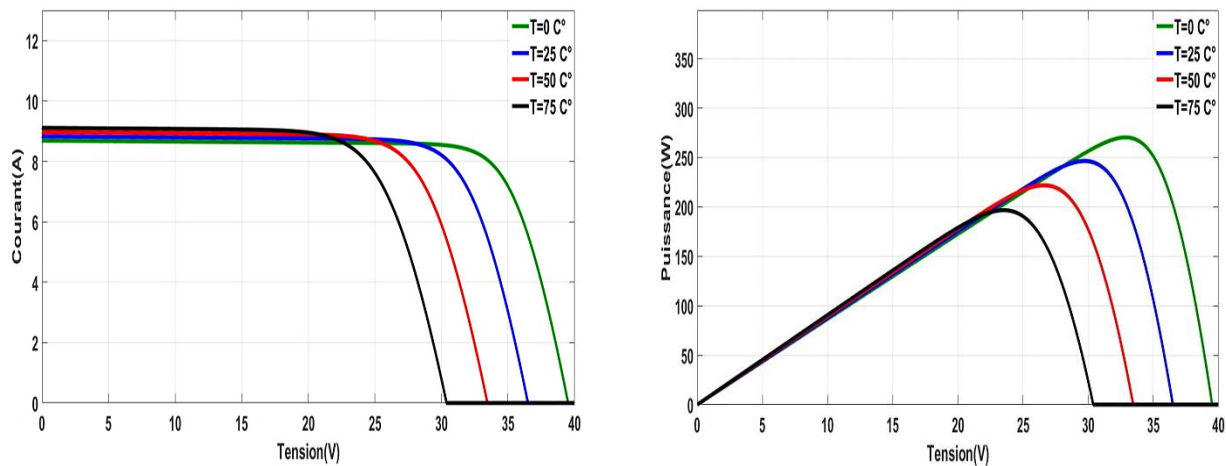


Figure II.13 : Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV

II.6.4.2. Effet de l'ensoleillement

La cellule (jonction PN), dont le rendement de conversion est très faible (de l'ordre de 15 %), est sensible à l'énergie de la lumière (ensoleillement) qu'elle reçoit. Cette puissance électrique augmente au fur et à mesure de l'augmentation de l'énergie solaire reçue par le générateur PV. Une augmentation importante du niveau de rayonnement provoque l'augmentation remarquable du courant de court-circuit avec une légère augmentation de la tension du circuit ouvert (Figures II.14). Pour un rayonnement solaire uniforme des cellules (modules, panneaux et champs), la caractéristique P-V, présente une courbe non-linéaire dont le point de puissance maximale varie en fonction de l'intensité d'ensoleillement (Figures II.14) [17], [33], [61].

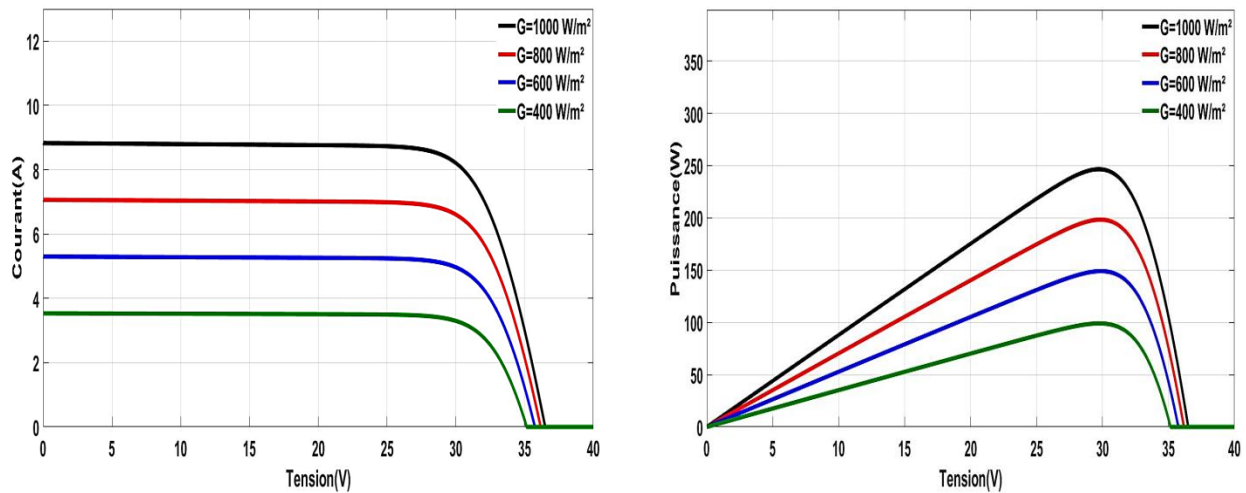


Figure II.14 : Effet de l'éclairement sur la caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV

II.6.4.3. Influence de la résistance série

Sur les figures II.15 est représentée la caractéristique $I-V$ d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de la résistance série R_s qui représente les diverses résistances de contact et de connexion. Nous constatons que cette résistance agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension (zone de la tension du circuit ouvert) [17], [33], [61].

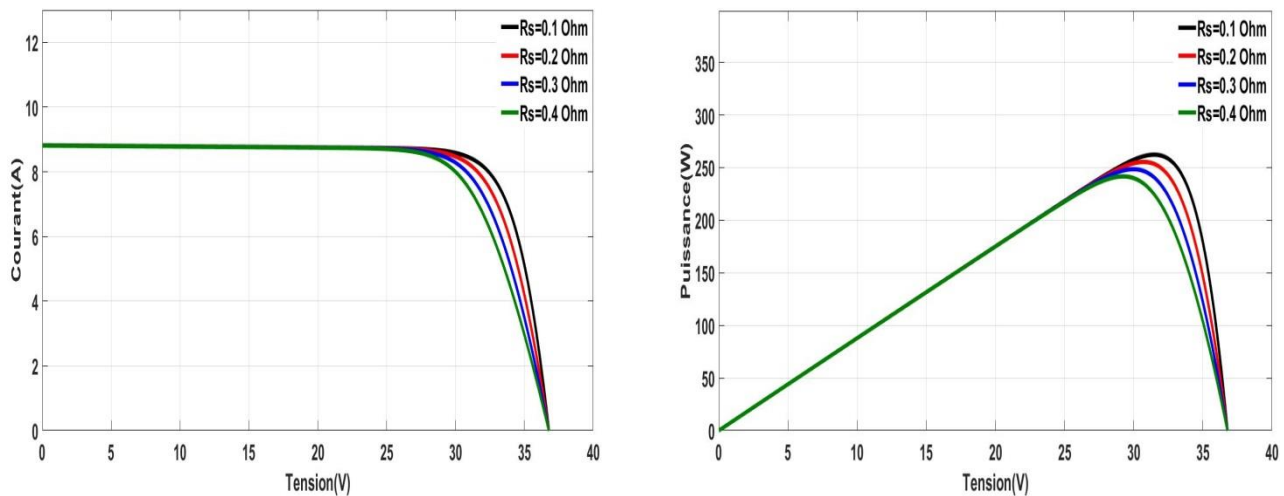


Figure II.15 : Influence de la résistance série sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV

II.6.4.4. Influence de la résistance parallèle

D'après les figures II.16, nous constatons qu'une augmentation de la valeur de la résistance parallèle R_p , qui représente tous les défauts au voisinage de la région de charge d'espace de la jonction PN ainsi que les courants de fuite dans cette jonction, provoque une augmentation de la surface de la puissance sur la caractéristique $P-V$ et une diminution de la pente négative dans la zone proche du courant de court-circuit de la caractéristique $I-V$ [17], [33], [61].

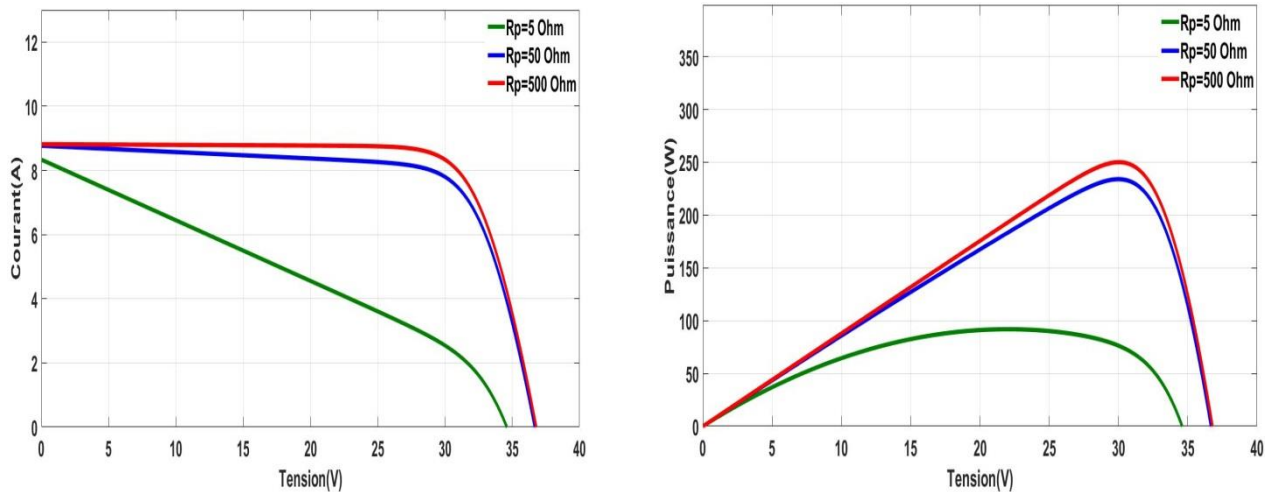


Figure II.16 : Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV

II.6.4.5. Influence du facteur d'idéalité de la diode

La variation de la valeur du facteur d'idéalisation de la diode affecte inversement le point de puissance maximale de la caractéristique P-V en affectant la zone de courbure de la caractéristique I-V (Figure II.17) [17], [33], [61].

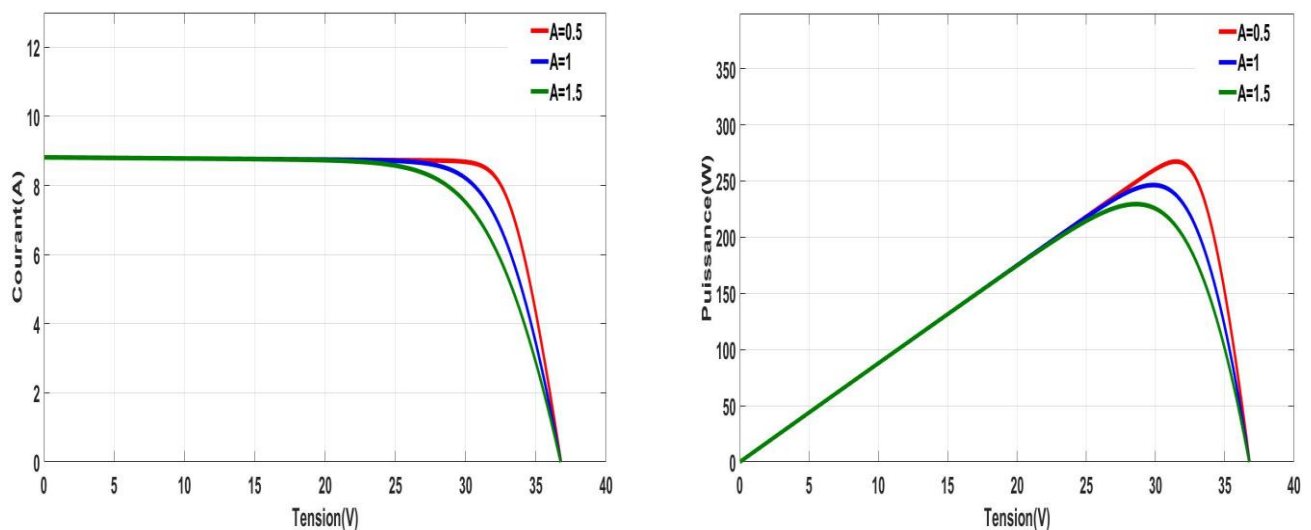


Figure II.17 : Influence du facteur de qualité sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV

II.6.5. Modélisation d'un générateur photovoltaïque soumis à un ombrage

II.6.5.1. Types d'ombrage

L'ombrage est le phénomène dans lequel la totalité de la surface ou une partie de la surface d'un générateur PV est exposée à l'absence d'ensoleillement, ce qui constitue un des problèmes auquel sont confrontés les systèmes utilisant les générateurs PV. En plus de la réduction du rendement

énergétique des systèmes PV, l'ombrage partiel provoque également les points chauds dans les générateurs PV, une des principales raisons de raccourcissement de leur durée de vie [17], [33].

Les deux types d'ombrage, l'ombrage total (uniforme) et l'ombrage partiel (non-uniforme), sont caractérisés par :

- L'ombrage complet (uniforme) empêche tout rayonnement solaire (direct et indirect) d'atteindre la surface totale du générateur photovoltaïque (Exemples : un arbre, le nuage, la neige et la poussière).
- L'ombrage partiel (non-uniforme) empêche uniquement le rayonnement solaire d'atteindre une partie du générateur photovoltaïque (Exemples : une déjection d'oiseau, une cheminée, une branche d'arbre, le nuage, la neige et la poussière) (figure II.18).

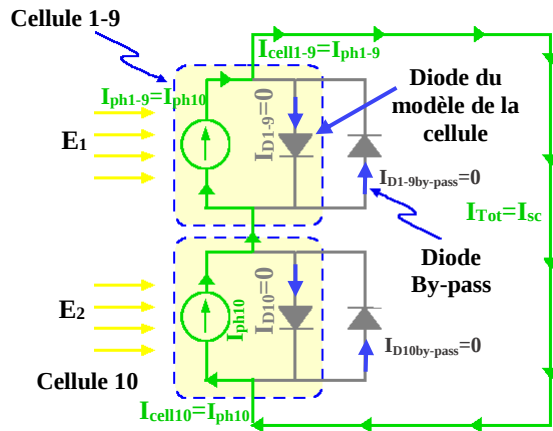
II.6.5.2. Effet d'ombrage partiel

Quand un panneau est soumis à la condition d'ombrage partiel, la cellule ombrée continue à produire sa puissance réduite sous faible ensoleillement suite à l'ombrage partiel. Dans ce cas, la cellule ombrée limite la circulation du courant dans toute sa branche et force les cellules mises en séries dans la même branche de conduire un courant faible [17].

Pour bien expliquer l'effet de l'ombrage partiel sur les grandeurs électriques du panneau (I,V et P), on adopte un exemple utilisant un module contenant par branche, 10 cellules mise en série en trois modes [17]:

- a. Mode 1 : Comportement d'une branche comportant 10 cellules mise en série et uniformément ensoleillées.
- b. Mode 2 : Comportement d'une branche comportant 10 cellules mise en série avec 9 cellules uniformément ensoleillées (non-ombrées) et 1 cellule ombrée sans diodes by-pass.
- c. Mode 3 : Comportement d'une branche comportant 10 cellules mise en série avec 9 cellules uniformément ensoleillées (non-ombrées) et 1 cellule ombrée avec diodes by-pass.

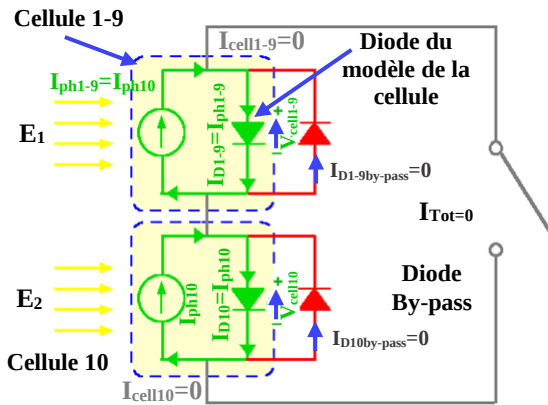
a. Mode 1 : Comportement d'une branche comportant 10 cellules mises en série et uniformément ensoleillées.



a. Cellules d'une branche uniformément ensoleillée en court-circuit

Selon la figure II.18, on remarque que :

- Avec un ensoleillement uniforme ($E_1=E_2$), les phot-courants (courant de circuit) des cellules mises en série de la même branche sont égaux ($I_{ph1-9}=I_{ph10}$) ou ($I_{sc1-9}=I_{sc10}$).
- Les courants des diodes du modèle de la cellule sont nuls ($I_{D1-9}=I_{D10}=0$).
- Les courants de cellules sont non-nuls ($I_{cell1-9}=I_{ph1-9}-I_{D1-9}=I_{ph1-9}=I_{sc1-9}$) et ($I_{cell10}=I_{ph10}-I_{D10}=I_{ph10}=I_{sc10}$) et ($I_{sc1-9}=I_{sc10}=I_{scTot}$).
- Les tensions des cellules sont nulles ($V_{cell1-9}=V_{cell10}=0$).
- Les diodes by-pass dont les tensions sont nulles ($V_{cell1-9}=V_{cell10}=0$) n'ont aucun effet.
- La tension totale de la branche est nulle ($V_{Tot}=V_{cell1-9}+V_{cell10}=0$).



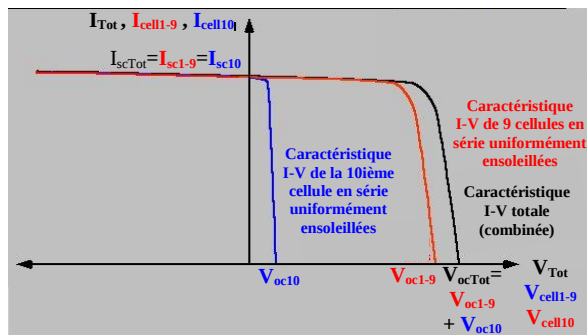
b. Cellules d'une branche uniformément ensoleillée en circuit ouvert (à vide)

Selon la figure II.18, on constate que :

- Avec un ensoleillement uniforme ($E_1=E_2$), les phot-courants (courant de circuit) des cellules mises en série de la même branche sont égaux ($I_{ph1-9}=I_{ph10}$).
- Les courants des diodes du modèle de la cellule (I_{D1-9} , I_{D10}) sont non-nuls où chaque cellule produit un photo-courant qui est égale au courant de la diode de son modèle ($I_{ph1-9}=I_{D1-9}$) et ($I_{ph10}=I_{D10}$).
- Les courants de cellules sont nuls ($I_{cell1-9}=I_{ph1-9}-I_{D1-9}=0$) et ($I_{cell10}=I_{ph10}-I_{D10}=0$).
- Le courant de la branche est nul ($I_{Tot}=I_{cell1-9}=I_{cell10}=0$).
- Les tensions des diodes des cellules sont non-nulles et positives ($V_{cell1-9}=V_{cell10}>0$ et $V_{cell1-9}=V_{oc1-9}$ et $V_{cell10}=V_{oc10}$). Les diodes des cellules sont polarisées en direct.
- Les diodes by-pass dont les tensions sont non-nulles mais négatives ($-V_{cell1-9}=-V_{cell10}<0$) sont polarisés en inverse, et donc n'ont aucun effet.
- La tension totale de la branche est non-nulle ($V_{Tot}=V_{oc}=V_{cell1-9}+V_{cell10}=V_{oc1-9}+V_{oc10}$).

$$(V_{Tot}=V_{oc}=V_{cell1-9}+V_{cell10}=V_{oc1-9}+V_{oc10}=10.V_{oc10})$$

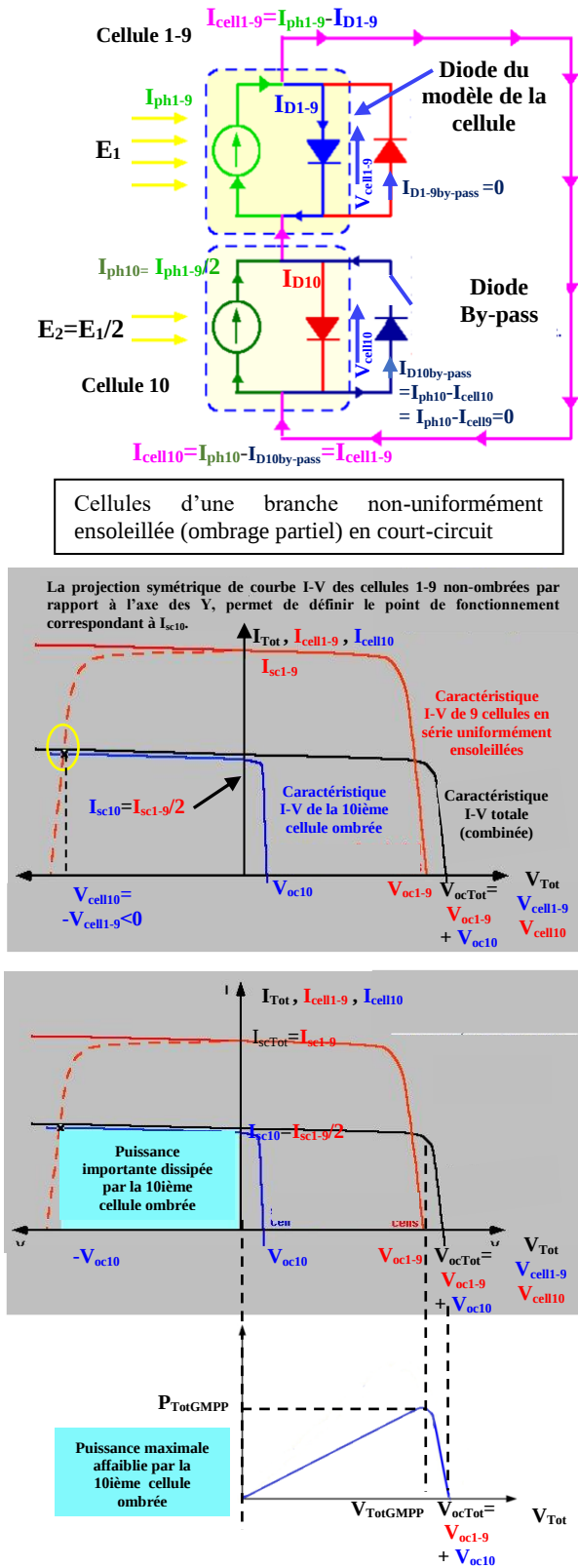
$$(I_{Tot}=I_{cell1-9}=I_{cell10})$$



- c. Caractéristiques I-V de 9 cellules en série uniformément ensoleillées, Caractéristique I-V de la 10^{ème} cellule en série uniformément ensoleillée, Caractéristique I-V totale (combiné)

Figure II.18 : Comportement des cellules uniformément ensoleillées

b. Mode 2 : Comportement d'une branche comportant 10 cellules mises en série avec 9 cellules uniformément ensoleillées (non-ombrées) et 1 cellule ombrée sans diodes by-pass.

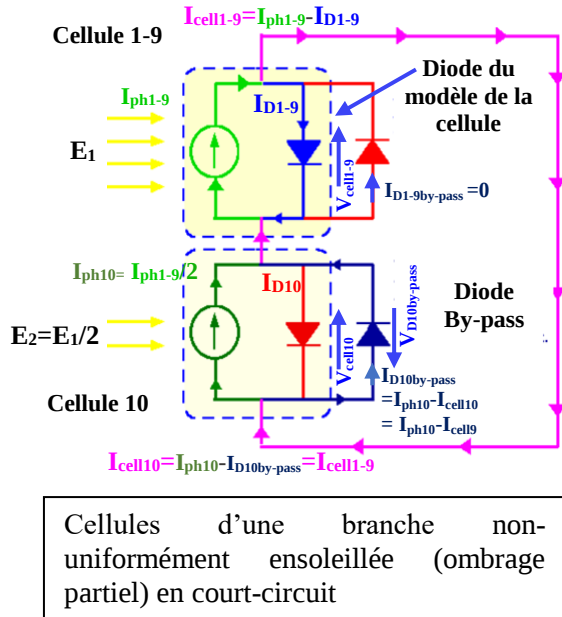


Selon la figure II.19, on note que :

- Avec un ensoleillement non-uniforme suite à un ombrage partielle de la cellule 10 ($E_2 = (1/2)E_1$), le photocourant de la cellule 10 est inférieur par rapport aux photocourants des autres cellules uniformément ensoleillées 1 à 9 qui sont mise en série dans la même branche ($I_{ph10} = (1/2)I_{ph1-9}$).
- Dans chacune des 9 cellules non-ombrées uniformément ensoleillées, une partie du photo-courant I_{ph1-9} parcourt la diode du modèle de la cellule sous forme de courant I_{D1-9} polarisant en direct la diode du modèle de la cellule créant ainsi une tension $V_{cell1-9}$ positive entre ces bornes. Le reste du photo-courant I_{ph1-9} parcourt le conducteur de circuit sous forme de courant $I_{cell1-9}$. Donc, $I_{cell1-9} = I_{ph1-9} - I_{D1-9}$.
- Dans la cellule 10 ombrée, une partie du photo-courant I_{ph10} parcourt la diode du modèle de la cellule sous forme de courant I_{D10} polarisant en direct la diode du modèle de la cellule créant ainsi une tension V_{cell10} positive entre ces bornes. Le reste du photo-courant I_{ph10} parcourt le conducteur de circuit sous forme de courant I_{cell10} . Donc, $I_{cell10} = I_{ph10} - I_{D10}$.
- Etant donné que les photocourants I_{ph10} et I_{ph1-9} sont différents ($I_{ph10} = (1/2)I_{ph1-9}$ ou $I_{ph10} < I_{ph1-9}$), les courants des cellules I_{cell10} et $I_{cell1-9}$ sont aussi différents ($I_{cell10} < I_{cell1-9}$). Donc, la cellule 10 fait circuler un courant I_{cell10} dans le conducteur de court-circuit qui est inférieur au courant $I_{cell1-9}$ que les cellules 1-9 font circuler dans le même conducteur de court-circuit ($I_{cell10} < I_{cell1-9}$ et $I_{sc10} = (1/2)I_{sc1-9} < I_{sc1-9}$). Dans ce cas la cellule 10 impose son courant ($I_{cell10} < I_{cell1-9}$ ou $I_{sc10} = (1/2)I_{sc1-9} < I_{sc1-9}$), car elle ne peut pas faire passer un courant plus qu'elle support sous un ensoleillement réduit (E_2). Donc, le courant de court-circuit parcourant le conducteur de court-circuit sera ($I_{scTot} = I_{sc10}$). Par conséquent, sa tension V_{cell10} ne sera plus positive et elle sera négative et imposée par la somme des tensions des cellules 1-9 mises en série dans la même branche ($V_{cell10} = -V_{cell1-9} < 0$). Dans ce cas, la cellule 10 ne produit pas de puissance mais elle la consomme ($P_{cell10} = V_{cell10} \times I_{cell10} = -V_{cell1-9} \times I_{cell10} < 0$). Cette puissance consommée ou dissipée sous forme de chaleur réchauffe la cellule 10 créant ce qu'on appelle le point chaud (hot spot), ce qui peut conduire à sa destruction totale.
- La tension totale de la branche est nulle ($V_{Tot} = V_{cell1-9} + V_{cell10} = V_{cell1-9} - V_{cell1-9} = 0$).
- La caractéristique puissance-tension (P-V) de la branche, dans ce cas (sans isolation de la cellule 10 ombrée), possède un seul maximum avec une puissance maximale $P_{TotGMPP}$ affaiblie par la 10ème cellule ombrée pour une tension $V_{TotGMPP}$.

Figure II.19 : Comportement des cellules non-uniformément ensoleillées (ombrage partiel) sans diodes by-pass (en court-circuit)

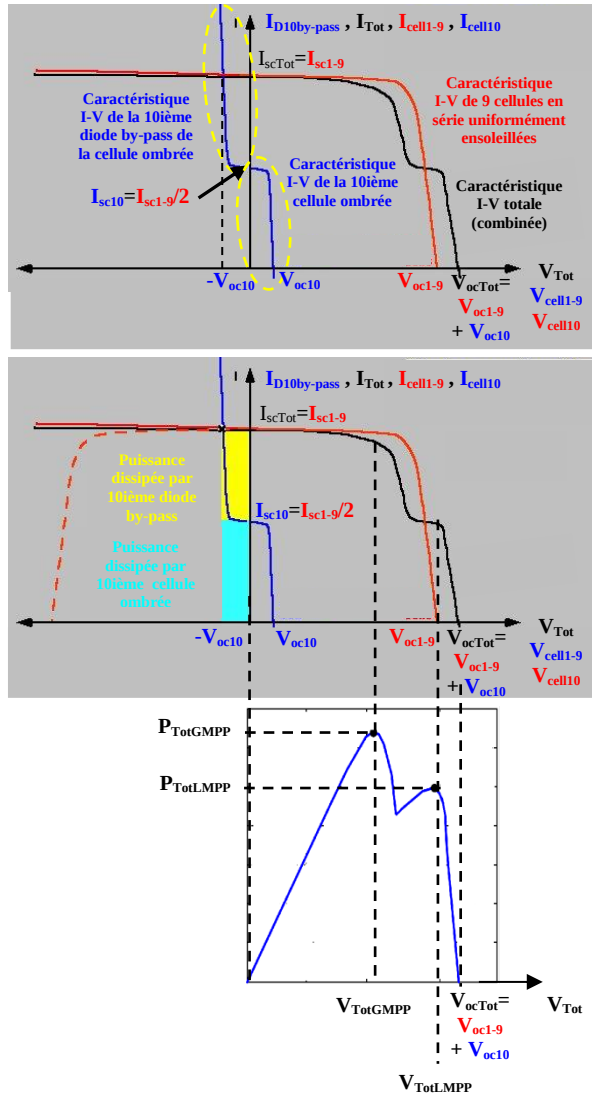
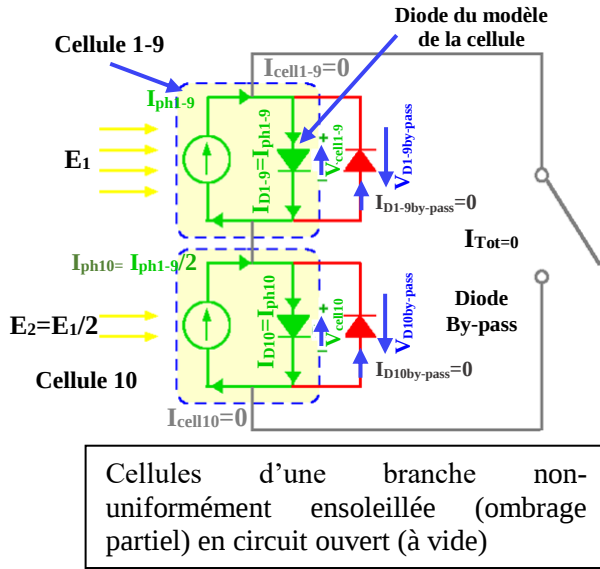
c. Mode 3 : Comportement d'une branche comportant 10 cellules mises en série avec 9 cellules uniformément ensoleillées (non-ombrées) et 1 cellule ombrée avec diodes by-pass.



Selon la figure II.20, on note que :

- Avec un ensoleillement non-uniforme suite à un ombrage partiel de la cellule 10 ($E_2=(1/2)E_1$), le phot-courant de la cellule 10 est inférieur par rapport aux photo-courants des autres cellules uniformément ensoleillées 1 à 9 qui sont mise en série dans la même branche ($I_{ph10}=(1/2)I_{ph1-9}$).
- Dans chacune des 9 cellules non-ombrées uniformément ensoleillées, une partie du photo-courant I_{ph1-9} parcourt la diode du modèle de la cellule sous forme de courant I_{D1-9} polarisant en direct la diode du modèle de la cellule créant ainsi une tension $V_{cell1-9}$ positive entre ces bornes. Le reste du photo-courant I_{ph1-9} parcourt le conducteur de circuit sous forme de courant $I_{cell1-9}$. Donc, $I_{cell1-9}=I_{ph1-9}-I_{D1-9}$.
- La tension $V_{cell1-9}$ crée une tension positive aux bornes de la diode by-pass de la cellule 10 partiellement ombrée ($(V_{cell1-9}+V_{cell10}=V_{cell1-9}-V_{D10by-pass}=0) \rightarrow (V_{D10by-pass}=-V_{cell10}=V_{cell1-9}>0)$), et la polarise en direct ce qui lui permet de conduire un courant $I_{D10by-pass}=I_{cell10}-I_{ph10}=I_{cell1-9}-I_{ph10}$; sous une tension de conduction entre ses bornes qui vaut ($V_{D10by-pass}=0.7\text{ V}$), ce qui limite la tension inverse de la cellule ombrée 10 à ($V_{cell10}=-V_{D10by-pass}=-0.7\text{ V}$).
- Le courant de court-circuit parcourant le conducteur de court-circuit sera ($I_{scTot}=I_{cell1-9}=I_{cell10}=I_{sc1-9}$).
- Les diodes by-pass des cellules 1 à 9 polarisées en inverse ($-V_{cell1-9}<0$) n'ont aucun effet.
- Le courant I_{D10} de la diode du modèle de la cellule ombrée 10 est nul (la diode du modèle de la cellule ombrée 10 n'a aucun effet), car son faible photo-courant I_{ph10} ne peut pas polariser en direct cette diode pour conduire un courant I_{D10} non nul. La tension aux bornes de cette diode est négative et imposée par la tension des cellules 1 à 9 ($(V_{cell1-9}+V_{cell10}=V_{cell1-9}-V_{D10by-pass}=0) \rightarrow (V_{cell10}=-V_{D10by-pass}=-V_{cell1-9}<0)$).
- La tension totale de la branche est nulle ($V_{Tot}=V_{cell1-9}+V_{cell10}=0$).

Figure II.20 : Comportement des cellules non-uniformément ensoleillées (ombrage partiel) avec diodes by-pass (en court-circuit)



Selon la figure II.21, on remarque que :

- Avec un ensoleillement non-uniforme suite à un ombrage partiel de la cellule 10 ($E_2 = E_1/2$), le phot-courant de la cellule 10 est inférieur par rapport aux photo-courants des autres cellules uniformément ensoleillées 1 à 9 qui sont mise en série dans la même branche ($I_{ph10} = (1/2)I_{ph1-9}$).
- Dans chacune des 9 cellules non-ombrées uniformément ensoleillées, le photo-courant I_{ph1-9} parcourt la diode du modèle de la cellule sous forme de courant $I_{D1-9} = I_{ph1-9}$, polarisant en direct la diode du modèle de la cellule (1-9) créant ainsi une tension ($V_{cell1-9}$) positive entre ces bornes et une tension ($V_{D1-9by-pass} = -V_{cell1-9}$ et $V_{D1-9by-passoc} = -V_{oc1-9}$) négative aux bornes de la diode by-pass (1-9). Le reste du photo-courant I_{ph1-9} parcourant le conducteur du circuit sous forme de courant $I_{cell1-9}$ est nul. Donc, $I_{D1-9} = I_{ph1-9}$ et $I_{cell1-9} = 0$.
- Dans la cellule ombrée 10, le photo-courant ($I_{ph10} = (1/2)I_{ph1-9}$) parcourt la diode du modèle de la cellule sous forme de courant ($I_{D10} = I_{ph10} = (1/2)I_{ph1-9}$), polarisant en direct la diode du modèle de la cellule 10 créant ainsi une tension (V_{cell10} ou V_{oc10}) positive entre ces bornes et une tension ($V_{D10by-pass} = -V_{cell10} = -V_{oc10}$) négative aux bornes de la diode by-pass (10). Le reste du photo-courant I_{ph10} parcourant le conducteur de circuit sous forme de courant I_{cell10} est nul. Donc, $I_{D10} = I_{ph10} = (1/2)I_{ph1-9}$ et $I_{cell10} = 0$.
- Les diodes by-pass des cellules 1 à 9 polarisées en inverse ($V_{D1-9by-pass} = -V_{cell1-9} < 0$) n'ont aucun effet ($I_{D1-9by-pass} = 0$).
- La diode by-pass de la cellule 10 polarisée en inverse ($V_{D10by-pass} = -V_{cell10} < 0$) n'a aucun effet ($I_{D10by-pass} = 0$).
- La tension totale de la branche est non-nulle ($V_{Tot} = V_{oc} = V_{cell1-9} + V_{cell10} = V_{oc1-9} + V_{oc10}$).
- Grâce à la diode by-pass 10, pour un courant de court-circuit (I_{sc10}), la cellule ombrée présente un nouveau point de fonctionnement avec une faible tension ($-V_{oc10}$ au lieu de $-V_{oc1-9} = 9 \times (-V_{oc10})$) et une faible puissance dissipée ($I_{sc10} \times (-V_{oc10}) = -I_{sc10} \times V_{oc10}$) au lieu de ($I_{sc10} \times (-V_{oc1-9}) = -9 \times I_{sc10} \times V_{oc10}$).
- La diode by-pass 10 dissipe elle-même une faible puissance qui vaut $((I_{sc1-9} - I_{sc10}) \times (-V_{oc10}) = -V_{oc10} \times (I_{sc1-9} - I_{sc10}))$.
- La caractéristique puissance-tension (P-V) de la branche, dans ce cas (après isolation de la cellule 10 par la diode by-pass 10), possède deux maximums ; un maximum local avec une puissance $P_{TotLMPP}$ pour une tension $V_{TotLMPP}$ et un maximum global avec une puissance $P_{TotGMPP}$ pour une tension $V_{TotGMPP}$.

Figure II.21 : Comportement des cellules non-uniformément ensoleillées (ombrage partiel) avec diodes by-pass (à vide ou à court-circuit)

On peut résumer les effets d'ombrage partiel (ensoleillement non-uniforme) d'un générateur photovoltaïque en deux effets principaux :

- Effet du point chaud : Si l'une des cellules connectées en série est partiellement ombrée, son photo-courant I_{ph} devient beaucoup plus faible que les autres cellules. Donc, cette cellule va agir comme une charge pour les autres cellules et devient polarisée en inverse ; ce qui l'amène à dissiper la puissance plutôt que de la générer et à augmenter sa température et peut l'endommager entièrement. C'est ce qu'on appelle le problème du point chaud. Pour réduire cet effet, on place une diode by-pass en antiparallèle avec la cellule ombrée pour empêcher sa polarisation en inverse, car cette diode by-pass sera polarisée en direct et court-circuite la cellule ombrée et participe à la conduction du courant de la branche contenant la cellule ombrée [17], [33].
- Déformation des caractéristiques $I-V$ et $P-V$ du générateur en réduisant la valeur de la puissance maximale et en créant une caractéristique $P-V$ avec un seul point maximum global parmi plusieurs points maximums locaux (figure II.19) [17]. La maximisation de la puissance à extraire du générateur PV dont la caractéristique $P-V$ présente plusieurs maximums devient très compliquée.

La figure II.22 représente les différents types d'ombrage auxquels peut être soumis un générateur PV.

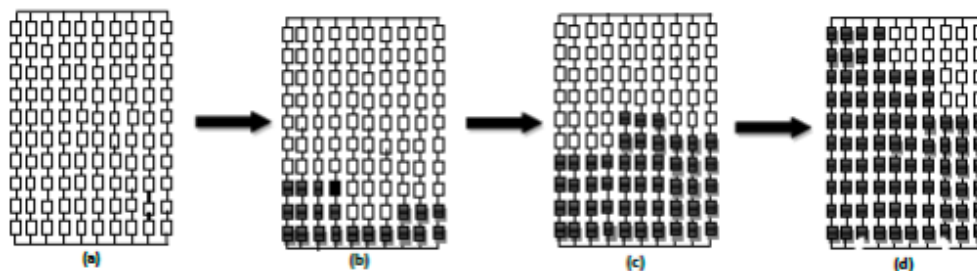


Figure II.22 : Différents types d'ombrage: (a) irradiation uniforme (sans ombrage), (b) ombrage léger, (c) ombrage moyen, (d) ombrage sévère

La figure II.23 représente l'allure des caractéristiques $I-V$ et $P-V$ d'un générateur photovoltaïque soumis à un ombrage partiel.

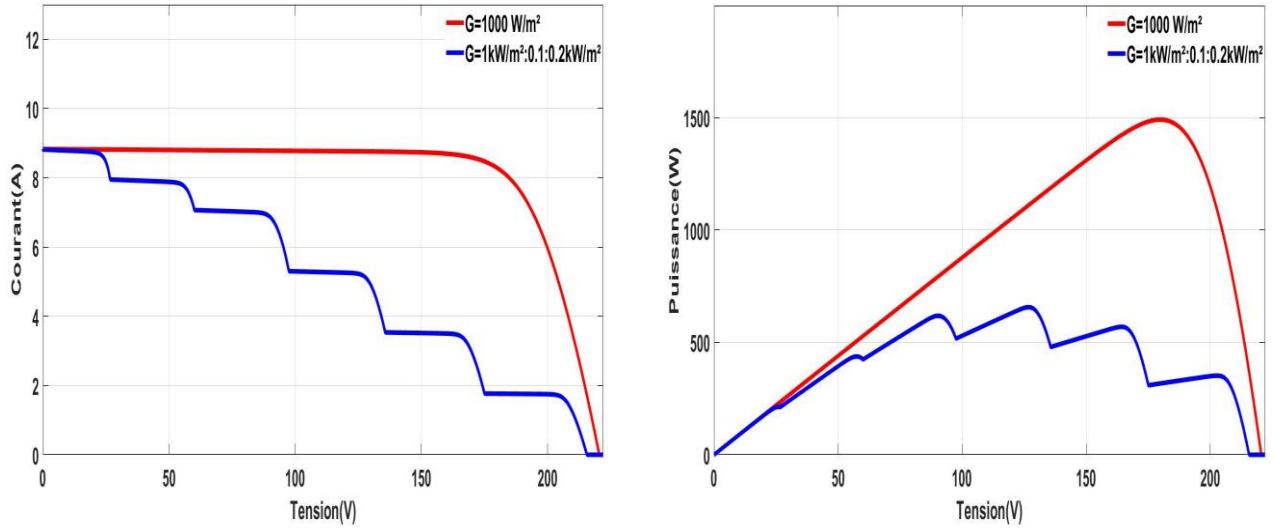


Figure II.23 : Effet de l'ombrage partiel sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV

Afin de calculer la chute de tension exacte dans un générateur *PV*, on peut considérer ce qui suit [17] :

$$V_{sh} = V_{n-1} - (R_p + R_s)I \quad (II.37)$$

Où :

V_{sh} : est la tension aux bornes de la cellule ombrée.

On peut écrire la tension totale de $(n-1)$ cellules non-ombrées sous la forme :

$$V_{n-1} = \left(\frac{n-1}{n}\right)V \quad (II.38)$$

Où :

n : est le nombre des cellules et V : est la tension totale de sortie.

En remplaçant (II.38) dans (II.37), on obtient :

$$V_{sh} = \left(\frac{n-1}{n}\right)V - (R_p + R_s)I \quad (II.39)$$

En utilisant l'équation ci-dessus, nous pouvons calculer la chute de tension pour une seule cellule ombrée de la manière suivante :

$$\Delta V = V - V_{sh} = V - \left[\left(\frac{n-1}{n}\right)V - (R_p + R_s)I\right] \quad (II.40)$$

$$\Delta V = V_n + (R_p + R_s)I \quad (\text{II.41})$$

II.6. Rendement d'un panneau PV :

Le rendement optimal d'un générateur PV est défini par la relation suivante :

$$\eta = (P_{pvmax}/S_m)/P_{sol} \quad (\text{II.42})$$

$$\eta = (V_{pvopt} * I_{pvopt}/S_m)/P_{sol} \quad (\text{II.43})$$

Où

P_{pvmax} : Puissance crête électrique fournie par le générateur PV.

S_m : Surface ensoleillée du générateur PV.

P_{sol} : Puissance d'ensoleillement reçu par le générateur PV.

Le rendement du générateur PV (cellule PV) peut-être également exprimé par l'expression suivante [17]:

$$\eta = \eta_{cellule} * \eta_{connexion} * \eta_{encapsulation} * \eta_{diodes} \quad (\text{II.44})$$

Où :

$\eta_{cellule}$: Rendement d'une cellule PV.

$\eta_{connexion}$: Rendement des connexions électriques.

$\eta_{encapsulation}$: Rendement des matériaux de capsulage (dépend de degré de transparence des matériaux de capsulage).

η_{diodes} : Rendement des diodes d'anti-retour de protection.

Selon les équations (II.42) et (II.43), pour maximiser le rendement du générateur PV, qui est généralement de faible valeur, il faut imposer une tension (V_{pvopt}) aux bornes du générateur PV permettant de maximiser la puissance électrique extraite du générateur PV (P_{pvmax}). Selon la figure II.19, la caractéristique P - V du générateur PV sous ombrage partiel présente une forme de courbe non-linéaire avec un pont maximal global parmi plusieurs points maximum locaux. Dans ce cas, la maximisation de la puissance électrique à extraite du générateur PV est très compliquée.

II.7. Conclusion

Dans cette partie, nous avons rappelés quelques notions de base sur le rayonnement solaire et ses applications dans le domaine photovoltaïque. Ensuite, nous avons exposé le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs principales caractéristiques ainsi que les facteurs et les paramètres qui affectent leurs performances. Puis, nous avons présenté en détail les différents modèles équivalents de la cellule (module, panneau et champ) photovoltaïque, tout en exposant l'effet de l'éclairement et de température sur les caractéristiques I-V et P-V des générateurs PV. Enfin, on a présenté l'effet de l'ombrage total et l'ombrage partiel sur les caractéristiques I-V et P-V des générateurs PV. On a démontré que la caractéristique P-V du générateur PV partiellement ombré est une caractéristique non-linéaire multi-maximum, ce qui complique la maximisation de la puissance extraite du générateur PV. Donc, afin d'optimiser l'exploitation du générateur PV par maximisation de sa puissance électrique, il est indispensable d'utiliser les techniques de recherche de point de puissance maximale (en anglais : Maximum Power Point Tracking (MPPT)). Dans la partie suivante, on présentera le principe de la technique de recherche de point de puissance maximale ainsi que les différentes méthodes utilisées pour ce but.