

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière Electrotechnique

Spécialité Commande Electrique

Thème :

*Estimation des pertes de puissance dans
les systèmes photovoltaïques sous un
ensoleillement non homogène*

Présenter par :

- BOUSEKINE Lyes
- HIDJA Adel

Encadré par :

- Mr MOHAMMEDI Ahmed

Année universitaire : 2021/2022

Remercîment :

Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers Dieu, le clément et le miséricordieux, lequel nous a accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous voulons exprimer notre gratitude à notre encadreur Monsieur Ahmed MOHAMEDDI, Enseignant à l'Université de Bejaia pour avoir dirigé ce travail, Son soutien, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de cette recherche.

Nous saisissons cette occasion pour remercier tous les enseignants de l'université d'Abderrahmane Mira - Bejaia.

Enfin nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, apporté aide et encouragement.

Dédicace :

*Je souhaite de tout mon cœur, avec l'aide de dieux tout puissant que ce travail
soit à la hauteur.*

Je dédie ce travaille comme signe de reconnaissance :

*En premier à mes parents qui m'ont guidé durant les moments les plus
pénibles, de ce long chemin.*

A ma cher grande mère,

A mon cher frère.

*A tous mes oncles et tantes, ainsi qu'as mes cousins et cousines, sans oublié
tous mes amis.*

Et mes ami(e)s de promotion (2017/2022).

Liste des symboles :

E : Eclairement (W/m^2).).

E_g : Energie de la bande interdite (eV).

FF : Facteur de forme.

G : L'éclairement de référence ($1000 \text{ W}/\text{m}^2$).

I_{cc} : Courant de court-circuit (A)

I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).

I_{max}: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

I_{opt} : Courant optimum (A).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

K : coefficient de Boltzman ($1.38.10^{-23} \text{ J} / \text{K}$)

MPP : le point de puissance maximal .

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

R_p : Résistances parallèle shunt. (Ω) : Courant de saturation (A).

R_S : Résistance série (Ω).

S : Surface du module photovoltaïque (m^2)

T_{amb}: Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)

T_c : Température de jonction ($^{\circ}\text{K}$).

T_c : Température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$)

V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).

V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).

V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

V_{opt} : Tension optimale (V).

Sommaire :

Introduction générale:

Chapitre 1 : Energie solaire photovoltaïque:

1. Introduction.....	2
1.1. Énergies renouvelables	2
1.1.1. Énergies renouvelables en Algérie	2
1.1.1.1. Potentiel éolien	3
1.1.1.2. Potentiel solaire	3
1.1.2. Energie solaire photovoltaïque	4
1.1.2.1. Historique	4
1.1.2.2. Effet photovoltaïque.....	5
1.1.2.3. Technologie des cellules solaires	5
1.1.2.3.1. Cellules multi-jonction.....	5
1.1.2.3.2. Cellules monocristalline.....	6
1.1.2.3.3. Cellules poly cristalline.....	6
1.1.2.3.4. Cellules silicium amorphe en couches minces	6
1.1.3. Caractéristique électrique.....	6
1.1.3.1. Le courant de court-circuit (I_{cc})	6
1.1.3.2. La tension en court-circuit (V_{co}).....	7
1.1.3.3. Le facteur de forme (FF)	7
1.1.3.4. Le rendement.....	7
1.1.3.5. La réponse spectrale	8
1.1.3.6. La photoluminescence	9
1.1.4. Influence d'éclairement et de température	9
1.1.4.1. Influence de l'éclairement	9
1.1.4.2. Influence de la température	10

1.1.5.	Association de cellule solaire	10
1.1.5.1.	Association série	11
1.1.5.2.	Association parallèle	11
1.1.6.	Différent configuration photovoltaïque.....	12
1.1.6.1.	Système autonomes	12
1.1.6.1.1.	Système autonome sans stockage.....	13
1.1.6.1.2.	Système autonome avec stockage	13
1.1.6.2.	Système raccordé au réseau (11)	13
1.1.7.	Avantages et inconvénient de l'énergie solaire photovoltaïque.....	14
1.1.7.1.	Avantage	14
1.1.7.2.	Inconvénient	14
1.2.	Conclusion.....	15

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les modèles mathématique de générateur photovoltaïque:

2.	Introduction	16
2.1.	Modèles mathématiques du générateur photovoltaïque	16
2.1.1.	Modèles mathématiques (électriques)	16
2.1.1.1.	Modèle idéal de la cellule PV.....	16
2.1.1.2.	Modèle à deux paramètres (explicites)	17
2.1.1.3.	Modèle à une diode.....	18
2.1.1.4.	Modèle à deux diodes	20
2.1.2.	Modèles Mathématiques de puissance	20
2.1.2.1.	Modèle de borowy et salameh (Modèle 1)	20
2.1.2.2.	Modèle de Sandia (Modèle 2)	21
2.1.2.3.	Modèle de Jones et Underwood (Modèle 3)	22
2.1.2.4.	Modèle de benchmark (Modèle 4)	23

2.1.2.5.	Modèle de Cenerg (Modèle 5)	23
2.1.2.6.	Modèle de Bishop (Modèle 6)	24
2.2.	Simulation du modèle à deux paramètres	24
2.3.	Comportement du générateur photovoltaïque.....	27
2.3.1.	Influence de la température et de l'ensoleillement sur le rendement	27
2.3.2.	Influence de la température	27
2.3.2.1.	Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)	27
2.3.3.	Influence de l'ensoleillement	29
2.3.3.1.	Influence de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V).....	29
2.4.	Conclusion	30

Chapitre 3 : Estimation des pertes de puissance dans un générateur photovoltaïque sous condition non homogène :

3.	Introduction	31
3.1.	Ombre dans les installations photovoltaïques	31
3.1.1.	Différents types d'ombrage	32
3.1.2.	Problèmes causés par l'ensoleillement non homogène.....	32
3.1.2.1.	Le Mismatch.....	32
3.1.2.2.	Le Point chaud	33
3.2.	Moyens de protection.....	33
3.2.1.	Diodes By-pass	34
3.2.2.	Diodes Anti-retour.....	35
3.3.	Estimation des pertes de puissance sous ensoleillement non homogène :.....	35
3.3.1.	Différentes connexions des modules photovoltaïques	36
3.3.1.1.	Modules en série.....	36
3.3.1.2.	Module en parallèle	38

3.4. Analyse des résultats.....	43
3.5. Conclusion	44

Conclusion générale :

Références bibliographiques :	48
--	-----------

Liste des tableaux :

Chapitre 2: Etat de l'art sur les modèles mathématiques du générateur photovoltaïque.

Tableau 2. 1: Paramètres du module pris de la fiche technique..... 25

Chapitre 3 : default des systèmes photovoltaïques et estimation des pertes de puissance.

Tableau 3. 1 : Résumé des performances du générateur sous différents cas d'ensoleillement non homogène 40

Tableau 3. 2 : Valeurs des pertes de puissance..... 42

Figure 2 . 8: Caractéristiques P-V du module SHARP (175W) sous les conditions STC.....	27
Figure 2 . 9: Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000W/m^2$	28
Figure 2 . 10: Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000W/m^2$	28
Figure 2 . 11 : Courbes I(V) d'un générateur PV pour différents niveaux d'éclairement.....	29
Figure 2 . 12: Courbes P(V) d'un générateur PV pour différents niveaux d'éclairement.....	29

Chapitre 3 : Défaits des systèmes photovoltaïques et estimation des pertes de puissance.

Figure 3 . 1: Types d'ombrage (ensoleillement non homogène).	32
Figure 3 . 2 : Exemples des points-chaud d'une cellule photovoltaïque.	33
Figure 3 . 3: Montage des diodes by-pass.	34
Figure 3 . 4: Montage des diodes anti-retour.	35
Figure 3 . 5: Montage du générateur PV en longueur.	36
Figure 3 . 6: Montage du générateur PV en largeur.	36
Figure 3 . 7: schéma synoptique des cas 1, 2, 3 et 4 de gauche à droite respectivement (Montage en série).....	37
Figure 3 . 8: Evolution de la caractéristique (P-V) pour différent cas d'ombrage en série. ..	38
Figure 3 . 9: Evolution de la caractéristique (I-V) pour différent cas d'ombrage en série. ..	38
Figure 3 . 10: schéma synoptique des cas a, b, c et d de haut en bas respectivement.....	39
Figure 3 . 11: Evolution de la caractéristique (P-V) pour différent cas d'ombrage en parallèle	39
Figure 3 . 12 : Evolution de la caractéristique (I-V) pour différent cas d'ombrage en parallèle.	40
Figure 3 . 13: Evolution la puissance PV générée pour différents cas d'ombrage envisagés. 41	
Figure 3 . 14: Evolution du courant et de la tension générée pour différents cas d'ombrage envisagés.	41
Figure 3 . 15: La comparaison entre le facteur de forme des différents cas d'ombrage étudiés.	42
Figure 3 . 16: Pertes de puissance entre différents cas de la configuration série et parallèle. 43	
Figure 3 . 17 : Pourcentage d'amélioration de puissance entre différents cas.	43

Introduction Générale

Introduction générale

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. à la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, elles se présentent comme des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole, les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquent développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre, qui réduit l'émission de gaz à effet de serre, en effet, le développement des systèmes de conversion sont rentables et économiquement viables, passe nécessairement par la compréhension des différents composants du système à leur tête le panneau solaire, ce dernier voit ces performances se dégrader en fonctionnant sous des conditions climatiques non homogènes.

Dans notre travail nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'effet d'ombrage sur la puissance des modules photovoltaïque, afin d'estimer la perte causée par ce phénomène.

Le mémoire est structuré en trois chapitres détaillés comme suit :

- Le premier chapitre portera sur les différentes généralités indispensables à une bonne assimilation des principes du solaire photovoltaïque.
- Le second chapitre est consacré pour un état de l'art sur les différents modèles mathématiques de la cellule solaire, et a la simulation de notre module photovoltaïque.
- Enfin le dernier chapitre est consacré à la description de l'effet d'ombrage l'estimation des dégradations de certaines performances du générateur.

On termine notre travail par une conclusion

Chapitre 1 :
Energie solaire photovoltaïque

1. Introduction

Les énergies renouvelables commencent à prendre une part de plus en plus importante dans la réflexion sur l'avenir énergétique de la planète, même si les sources fossiles et nucléaires sont des fournisseurs d'énergies qui peuvent subvenir à nos besoins. Vu l'augmentation des prix du pétrole, et le réchauffement climatique, on commence à s'intéresser à d'autres alternatives telles que les énergies renouvelables. Dans ce chapitre, nous allons rappeler quelques généralités sur les énergies nouvelles notamment dans notre pays l'Algérie et leur potentiel, on s'intéressera précisément sur l'énergie solaire photovoltaïque qui est notre principal sujet.

1.1. Énergies renouvelables

Une énergie renouvelable provient d'une source naturelle, que la nature renouvelle en permanence [1], elles proviennent de deux sources naturelles qui sont : la terre et le soleil.

Exemples :

- Énergie solaire : elle se compose de deux types d'énergies : énergie solaire thermique et énergie solaire photovoltaïque ;
- Énergie hydraulique : elle se compose de 5 types d'énergies : énergies des vagues, énergies marémotrices, énergies hydrolienne, énergie thermique des mers et énergie osmotique ;
- Énergie éolienne ;
- Énergie géothermique ;
- Biomasse.

1.1.1. Énergies renouvelables en Algérie

Dans notre pays la production de l'électricité est principalement basée sur les combustibles fossiles, parce que les ressources d'énergies fossiles sont encore considérables, 40 ans pétrole, 60 ans pour le gaz. L'Algérie possède un énorme potentiel en matière d'énergie renouvelables, sous ces différentes formes : mécanique, thermique ou gazeuse, qu'on obtient : de la transformation des rayonnements solaires, de l'énergie du vent, de la géothermie, des déchets organiques, de l'énergie hydraulique, de la technique d'utilisation de la biomasse [2].

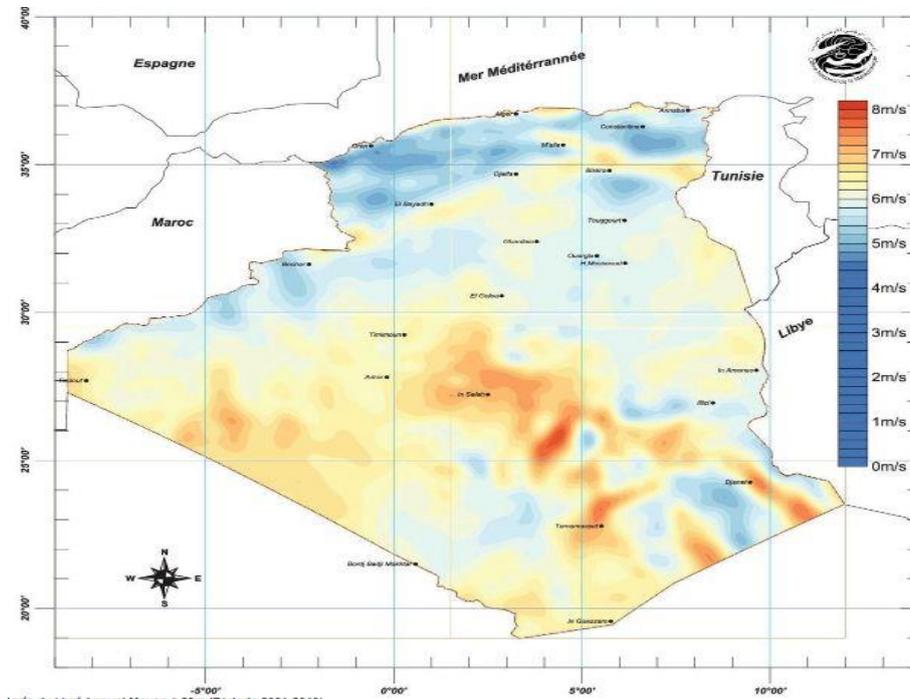
L'Algérie a manifesté un intérêt qui ne date pas d'hier, au développement de ces énergies, mais les efforts consentis n'ont pas abouti, elle dispose d'un énorme potentiel qui est techniquement exploitable, pour cela des investissements rentables peuvent être envisagés, pour leur développement, deux raisons incitent à un tel développement :

CHAPITRE 1 : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

- Les énergies renouvelables constituent une solution économique fiable qui peut avoir des retombés positifs en matière de création d'emplois, et fournir des services énergétiques aux populations isolées dans le sud ;
- Les énergies renouvelables permettent un développement durable, du fait que leur source est inépuisable et pratiquement n'ont aucun impact sur l'environnement.

1.1.1.1. Potentiel éolien

Les ressources éoliennes en Algérie varient d'un endroit à un autre, notre pays est divisé en deux grandes zones : le sud qui se caractérise par un climat saharien, où la vitesse du vent peut atteindre des vitesses supérieures à 4 km/h, et qui peut dépasser les 6 km/h dans certaines régions.



1.1.1.2. Potentiel solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire au cours d'une période, dans un endroit. L'Algérie dispose d'un gisement solaire des plus élevés au monde. La durée d'insolation moyenne dépasse les 2000 h annuellement, et peut atteindre 3900 dans les hauts plateaux, et le Sahara.

L'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est de $7 \frac{\text{Kwh}}{\text{m}^2} \text{ jour}$, $7.2 \frac{\text{Kwh}}{\text{m}^2} \text{ jour}$ au sud, $5.6 \frac{\text{Kwh}}{\text{m}^2} \text{ jour}$ dans le nord du pays.

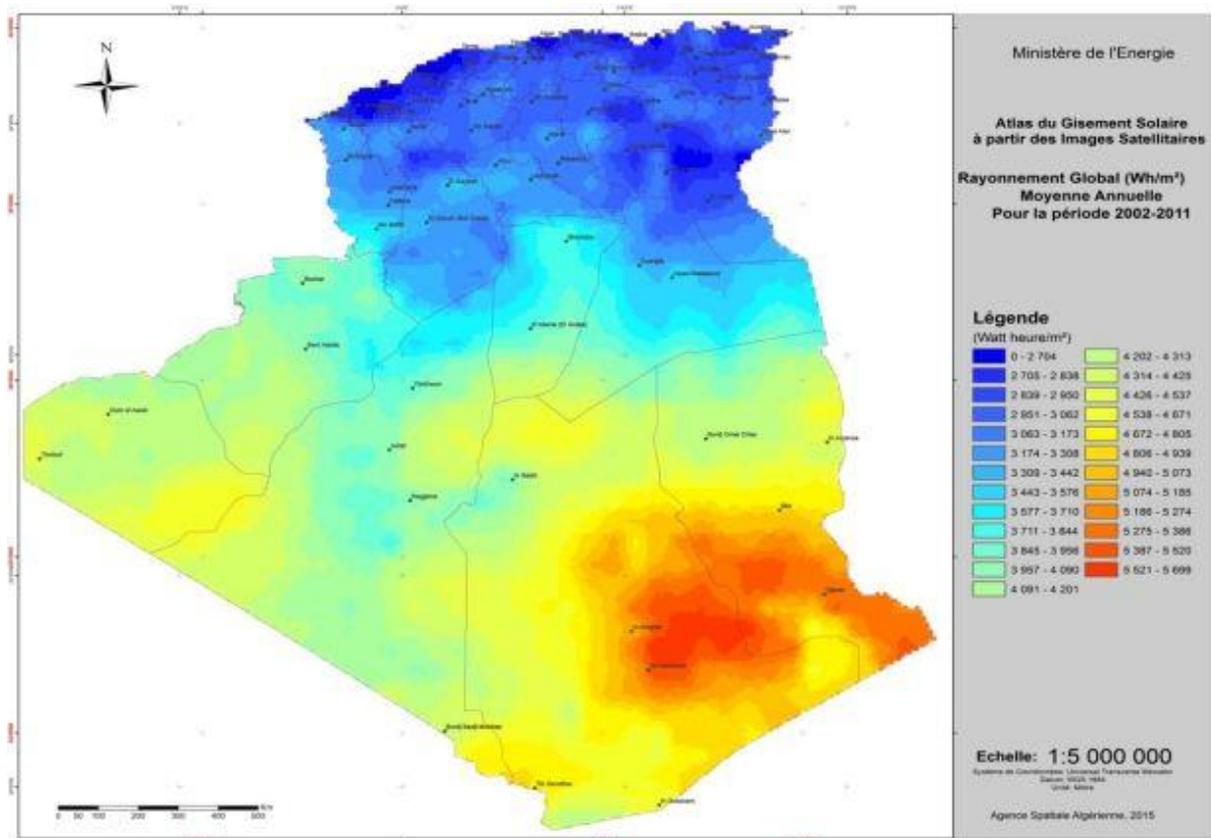


Figure 1.2 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur surface horizontale [2].

1.1.2. Energie solaire photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » vient du grec, il est composé de deux parties : « photo » qui veut dire lumière, « volta » qui est le nom de (Alessandro volta) le physicien italien qui a inventé la pile électrique en 1800, et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique le volt.

1.1.2.1. Historique

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839, par le physicien français Antoine Becquerel, il consiste à transformer l'énergie lumineuse en électricité, ce principe permet d'utiliser les photons pour libérer les électrons, et crée une différence de potentiel entre les bornes de la cellule, qui génère un courant continu. Ensuite en 1877 vient la découverte de l'effet du sélénium photovoltaïque, en 1930 l'apparition de l'hélium électricité, ce n'est qu'en 1955 que les chercheurs de Bell Téléphone aux États-Unis ont réalisé les premières cellules photovoltaïques en silicium, c'est à partir de cette année-là qu'on entrevoit la possibilité de produire de l'énergie avec les cellules photovoltaïques.

CHAPITRE 1 : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

Au cours des années 80, les technologies photovoltaïques ne cessent de se développer, elle commence par l'installation de plusieurs centrales de quelques mégawatts, elle se familiarise avec le consommateur à travers des produits de faibles puissances tels que : Calculatrices, balises radio, montres. Ce n'est qu'à partir des années 90 que l'humanité a réussi à entraîner une augmentation des volumes de productions et une baisse des prix. On compte parmi les pays qui produisent ces modules photovoltaïques : Chine (près de «32% production mondiale»), Japon, Etats-Unis, Allemagne, l'Europe et l'Inde, la production mondiale de ces modules photovoltaïques est passée de 5 mégawatts en 1982 à 18 gigawatts en 2013, grâce à de grandes compagnies telles que : Yingli Green Energy, First Solar, Suntech Power.

1.1.2.2. Effet photovoltaïque

C'est-à-dire la production de l'électricité à partir de la lumière, elle permet de convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique avec des cellules à base de silicium. Le matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés sont bombardés par les photons qui constituent la lumière, les électrons des couches électroniques supérieures ont tendance à être arrachés.

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau, l'énergie cinétique est transformée en énergie thermique. Par contre si une partie des électrons ne revient pas à son état initial, les électrons créent une tension continue faible, une partie de l'énergie cinétique des photons est transformée en énergie électrique [3].

1.1.2.3. Technologie des cellules solaires

Ce sont des composants électroniques semi-conducteurs, qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité, elle est considérée étant l'unité de base d'un système photovoltaïque. On distingue cinq types de cellules solaires : cellules multi-jonction, cellules monocristallines, cellules polycristallines, cellules silicium amorphes en couches minces et cellules sans silicium en couches amorphes. Chaque type a son propre rendement et un coût qui lui est propre. Cependant tel que soit le type le rendement varie entre 15% à 47%.

1.1.2.3.1. Cellules multi-jonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire, elles ont été développées pour des applications spatiales, ces cellules ont un rendement élevé qui est de 47%.

1.1.2.3.2. Cellules monocristalline

Sont très proches du modèle théorique, elles sont composées d'un seul cristal, divisé en deux couches, permettent d'obtenir des rendements élevés de 15% à 22%, son coût est très élevé à cause de la méthode de production qui est laborieuse et difficile [4].

1.1.2.3.3. Cellules polycristalline

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux, qui ont un aspect bleuté, elles ont un rendement de 13% à 20%.

1.1.2.3.4. Cellules silicium amorphe en couches minces

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz qui est projeté sur une feuille en verre. De couleur gris foncé ou marron, c'est la cellule de la calculatrice et montre solaire, elles ont un rendement de 5% à 14% [5].

1.1.3. Caractéristique électrique

Les paramètres de la cellule solaire sous un éclairage, sont représentés par une courbe courant-tension (figure 1.3) [6], à partir de cette caractéristique on peut déduire différents paramètres qui caractérisent la cellule tel que : différents types de résistances, facteur de forme et le rendement. Le courant est mesuré en fonction de la tension sous obscurité et ensoleillement, ce courant photoélectrique provoque la production d'énergie.

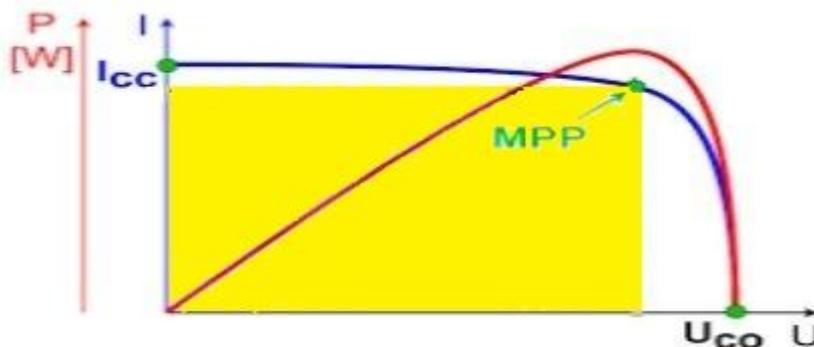


Figure 1.3: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

1.1.3.1. Le courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle, lorsque la tension est nulle, la puissance fournie par la cellule est nulle [7].

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left[1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right]} \quad (1.1)$$

I_{cc} : Courant de court-circuit [A].

I_{ph} : Photo-courant [A].

R_s : Résistance série [Ω].

R_{sh} : Résistance shunte [Ω].

1.1.3.2. La tension en circuit ouvert (V_{co})

C'est la tension pour laquelle, le courant donné par le générateur photovoltaïque est nul [7].

$$V_{co} = V_t \ln\left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1\right] \quad (1.2)$$

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (1.3)$$

V_{co} : Tension circuit ouvert [v].

V_t : Potentiel thermodynamique [v].

K : Constante de Boltzmann [$J K^{-1}$] = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

T : Température absolue [K].

q : charge de l'électron [C] = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

I_{ph} : Photo-courant [A].

I_{sat} : Courant de saturation [A].

1.1.3.3. Le facteur de forme (FF)

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule, est la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$ (**Figure 1.4**) il est compris entre 0 et 1, il nous permet de définir la qualité de la cellule [7].

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.4)$$

P_m : Puissance maximale [W].

FF : facteur de forme.

1.1.3.4. Le rendement

C'est le rapport entre la puissance maximal et la puissance du rayonnement solaire [7].

$$\eta = \frac{P_m}{P_o} \quad (1.5)$$

η : Le rendement.

P_o : Puissance incident.

$$P_m = FF * V_{co} * I_{cc} \quad (1.6)$$

$$P_o = E * S \quad (1.7)$$

E : Eclairement [$\frac{W}{m^2}$].

S : Surface [m^2].

1.1.3.5. La réponse spectrale

Elle permet d'apporter des informations sur la capacité de la cellule à produire un photocourant en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident.

La réponse spectrale est la valeur du courant de court-circuit de la cellule par unité de flux monochromatique incident [8].

$$R_s(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_g(\lambda)} \quad (1.8)$$

$R_s(\lambda)$: Réponse spectrale [A/W].

$P_g(\lambda)$: L'éclairement monochromatique globale [$\frac{W}{m^2}$].

$I_{cc}(\lambda)$: Courant de court-circuit [$\frac{A}{cm^2}$].

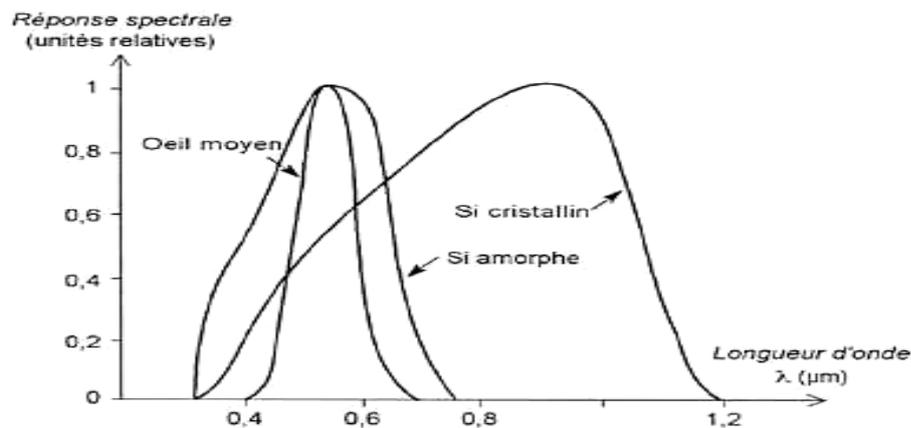


Figure 1 . 5: La réponse spectrale d'une cellule amorphe et cristalline.

1.1.3.6. La photoluminescence

Peut être définie comme la radiation photonique, produite par un semi-conducteur suite à une excitation lumineuse. C'est un processus par lequel une substance absorbe des photons et émet des photons.

1.1.4. Influence d'éclairement et de température

1.1.4.1. Influence de l'éclairement

Lors d'un fort éclairement, l'ensoleillement augmente, le courant photovoltaïque augmente, ce qui permet au module de produire une puissance plus importante, quand à la tension elle augmente légèrement, l'augmentation du courant est due à l'absorption de rayonnement grâce à la forte irradiation.

Lors d'un faible éclairement, l'ensoleillement diminue, le courant photovoltaïque diminue, ce qui signifie que la puissance produite est moins importante, par contre la tension décroît légèrement lors d'un faible éclairement.

Le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que la fonction de la tension est une fonction logarithmique.

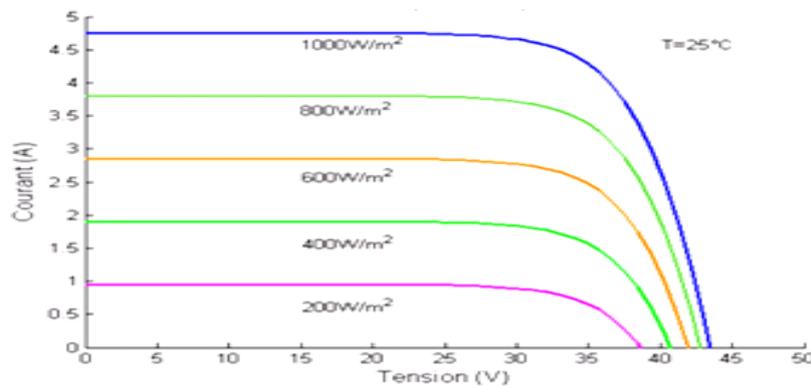


Figure 1 . 6 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ [9].

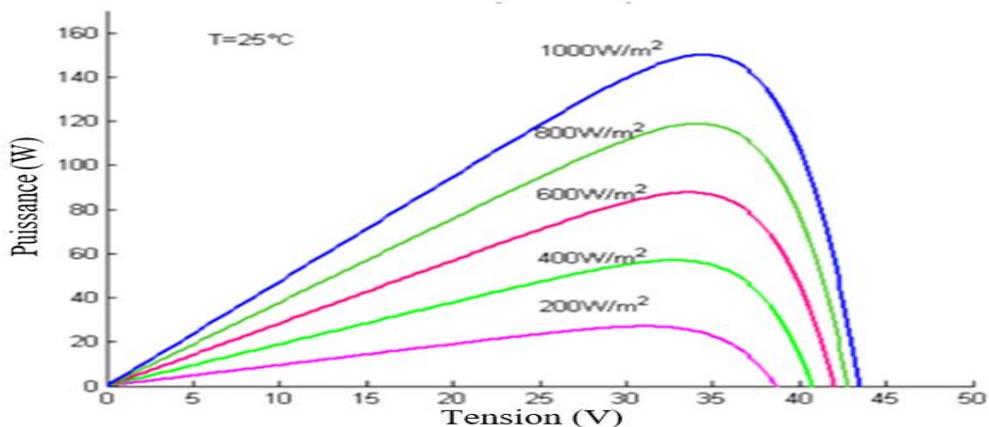


Figure 1 . 7: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ [9].

1.1.4.2. Influence de la température

Le courant augmente légèrement en intensité lorsque la température augmente, et engendre une diminution de la tension du circuit-ouvert, Par conséquent lors qu'augmente la température, la puissance produite diminue.

Pour les basses températures, le courant diminue en intensité lorsque la température diminue, et engendre une croissance de tension de circuit-ouvert, ce qui donne une variation des courbes de puissances moins importante.

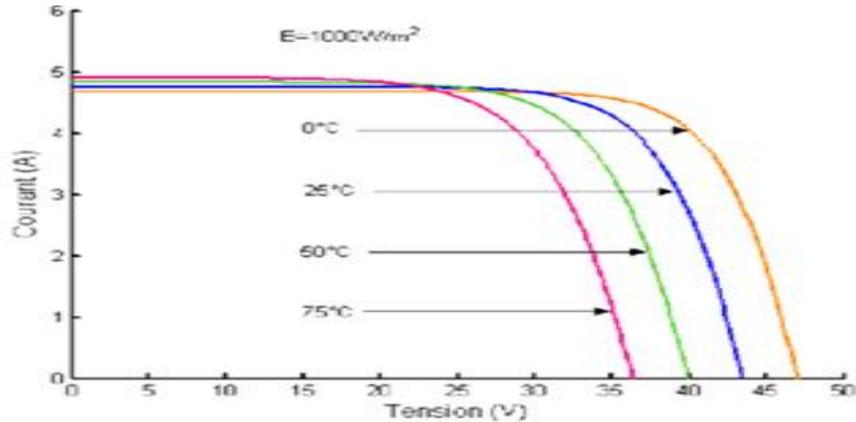


Figure 1 . 8 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ [9].

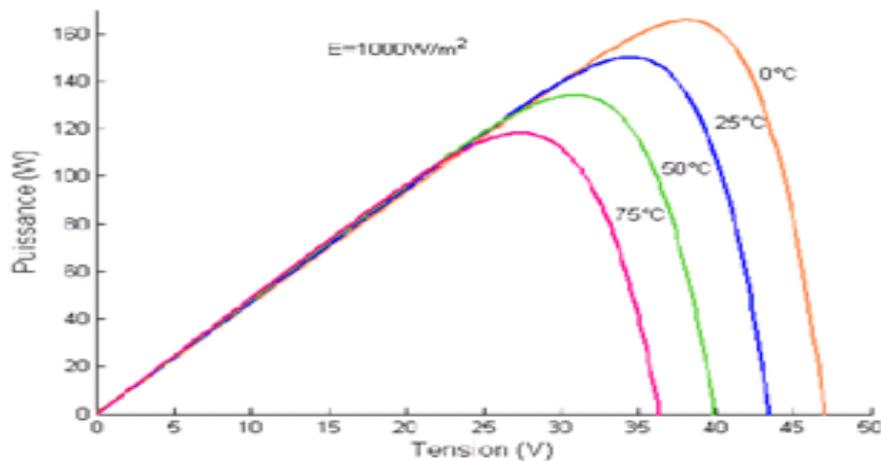


Figure 1 . 9 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ [9].

1.1.5. Association de cellule solaire

La puissance fournie par une cellule solaire est très faible, l'association de plusieurs cellules en série ou en parallèle engendre des puissances élevés.

L'association des cellules solaires ne se fait pas de la même manière pour un module au silicium cristallin et pour un module en couche minces [10].

1.1.5.1. Association série

L'association des cellules en série engendre une augmentation de tension, la tension délivrée est la somme de tension de N_s cellules, par contre le courant fourni est le même qu'une seule cellule. Voir la figure (1. 9).

$$V_{co}(N_s \text{ Cellules}) = V_{co} * N_s \tag{1.9}$$

$$I_{cc}(N_s \text{ cellules}) = I_{cc} \tag{1.10}$$

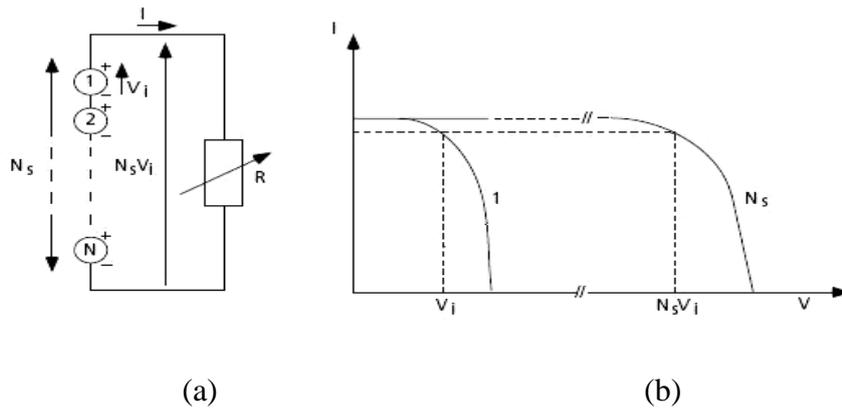


Figure 1 . 10 : (a) : Schéma d'un module formé d'un groupement des cellules en série.

(b) : Caractéristique I (v) d'un groupement des cellules en série.

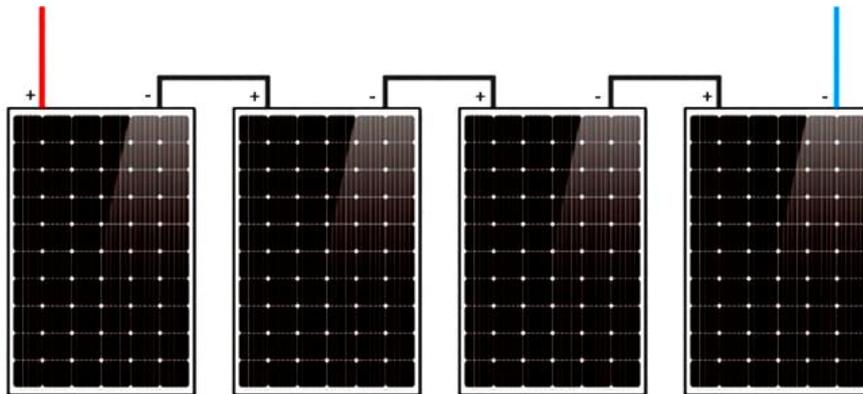


Figure 1 . 11: Branchement en série des panneaux photovoltaïque.

1.1.5.2. Association parallèle

L'association des cellules en parallèle engendre une augmentation de courant, le courant délivré est la somme des courants de N_p cellules, par contre la tension fournie est la même qu'une seule cellule. Voir la figure (1.11).

$$I_{cc}(N_p \text{ cellules}) = I_{cc} * N_p \tag{1.11}$$

$$V_{co}(N_p \text{ cellules}) = V_{co} \tag{1.12}$$

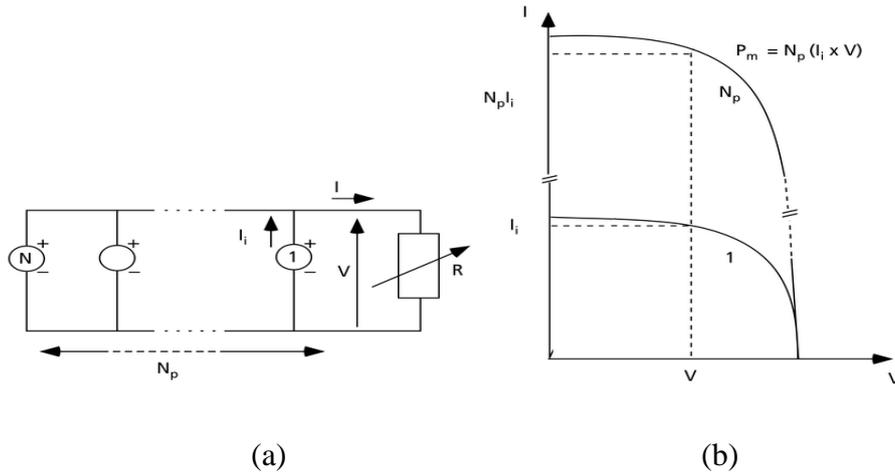


Figure 1 . 12 : (a) : Schéma d'un module formé d'un groupement des cellules en parallèle.
 (b) : Caractéristique $I (v)$ d'un groupement des cellules en parallèle.

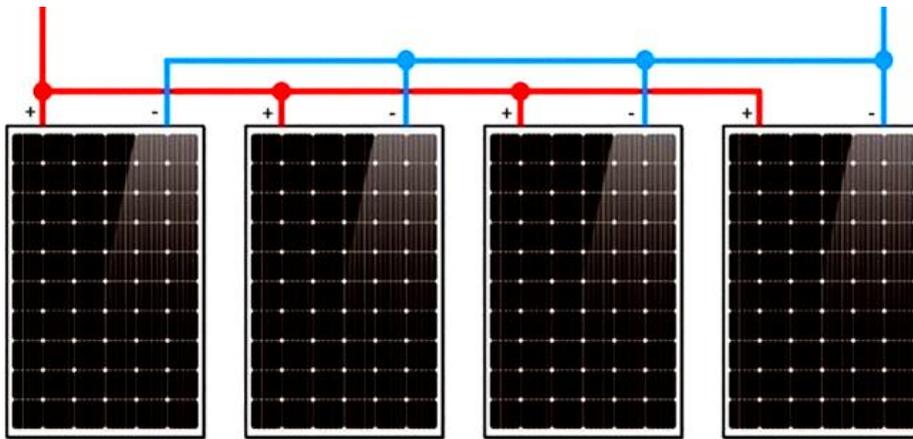


Figure 1 . 13: branchement en parallèle des panneaux photovoltaïque.

1.1.6. Différent configuration photovoltaïque

Nous distinguons trois types de configuration photovoltaïque :

- Système autonomes ;
- Système raccordé au réseau ;
- Système hybride.

Le type de configuration choisi dépend de besoin, de l'emplacement et du budget.

1.1.6.1. Système autonomes

Ce sont des systèmes complètement indépendants d'autre source d'énergie, ils sont utilisés pour alimenter différentes constructions tel que : des maisons, chalets, dans des endroits isolés ou l'accès et difficile est coûteux. On peut classer ce type en deux modes :

1.1.6.1.1. Système autonome sans stockage

Dans ce cas, l'appareille alimenté ne fonctionnera qu'on présence d'un éclairment solaire suffisant pour le démarrage, lors d'absence d'éclairment notre système ne fonctionnera pas, il faut dimensionner le générateur photovoltaïque d'une manière à fonctionner dans un éclairment faible.

1.1.6.1.2. Système autonome avec stockage

Le générateur photovoltaïque produit de l'énergie électrique pendant la journée, puis elle est emmagasinée dans des batteries, le stockage se fait dans des batteries électrochimiques, pour assurer le fonctionnement dans des périodes d'éclairment et dans les périodes nocturnes, c'est la configuration la plus courante [11].

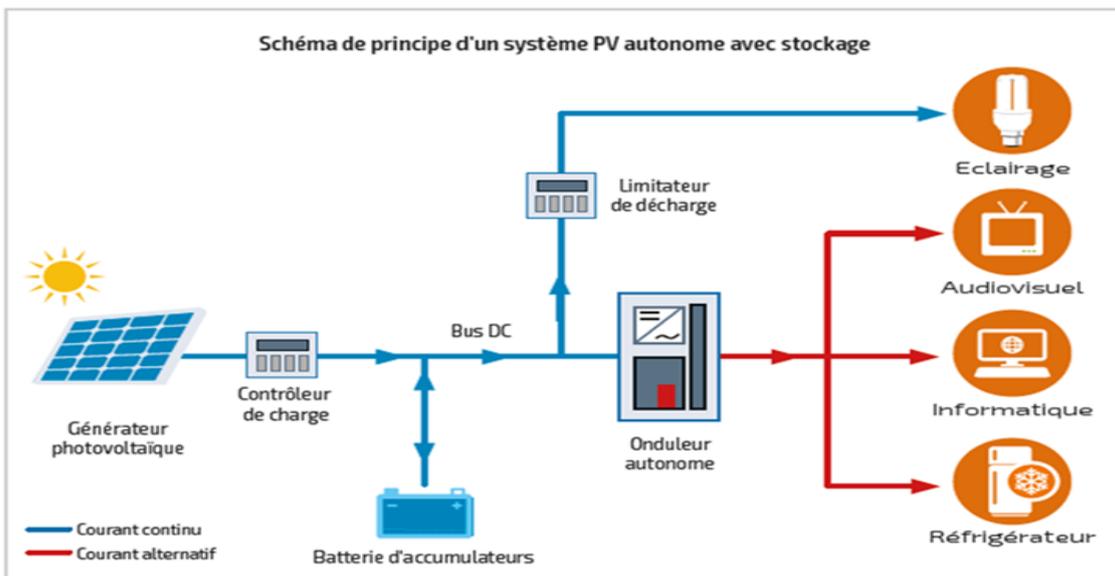


Figure 1 . 14: Exemple système autonome avec stockage (batterie) [11].

1.1.6.2. Système raccordé au réseau

Ce système permet d'injecter un surplus de la puissance produite par le générateur photovoltaïque, et de réduire la consommation d'énergie venant du réseau électrique, dans certain cas on peut renvoyer l'énergie excédentaire.

Peut être raccordé au réseau avec batterie de stockage ou sans batterie, utilisé généralement dans des habitations et entreprises qui souhaitent recourir à une énergie photovoltaïque [12].

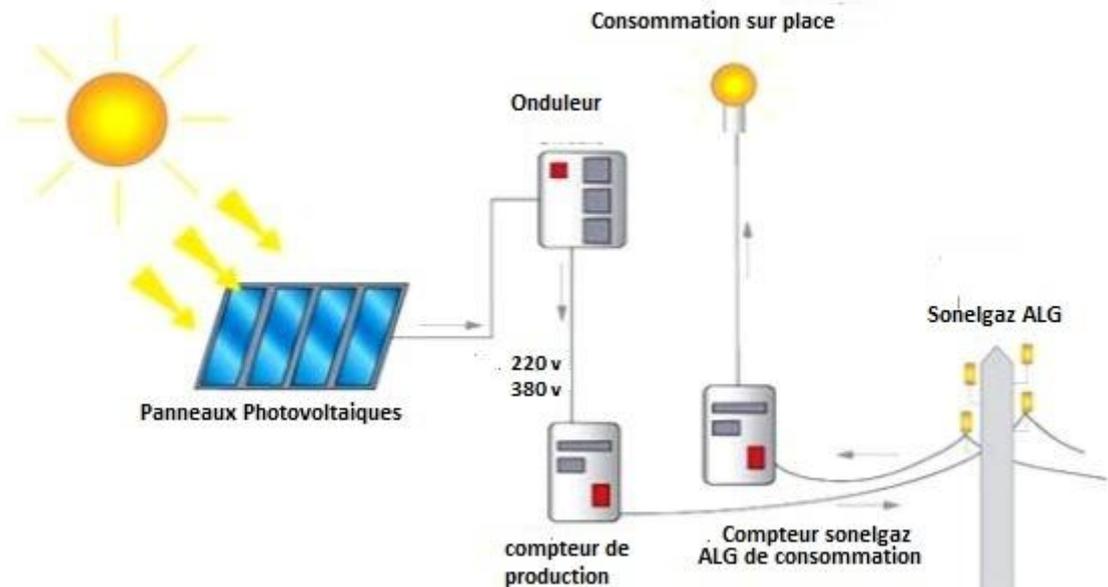


Figure 1 . 15 : Exemple Système raccordé au réseau [12].

1.1.7. Avantages et inconvénient de l'énergie solaire photovoltaïque

1.1.7.1. Avantage

- L'énergie photovoltaïque est inépuisable, vue qu'elle est renouvelable et gratuite ;
- Ce système est non polluant, il ne générant pas de déchet, et n'émet pas de gaz à effet de serre ;
- C'est une énergie qui ne nécessite pas un entretien ;
- Production d'énergie comprise entre milliwatt et mégawatt ;
- Peut se combiner avec d'autre source d'énergie ;
- L'électricité est produite près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur ;
- Les matériaux utilisés (verre, aluminium) résistent à la condition climatique de n'importe quel environnement ;
- Duré de vie très importante ;
- Ces systèmes sont silencieux, et n'entraîne pas aucune perturbation des milieux.

1.1.7.2. Inconvénient

- La fabrication de ces modules relève de la haute technologie, et requiert des investissements de cout élevé ;
- Le rendement de ces modules est limité d'ordre de 10% à 15% ;
- Le stockage de l'énergie électrique pose de nombreux problèmes ;

- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas aussi robustes par rapport aux générateurs diesel ;
- Le recyclage de ces modules présente un souci pour l'environnement.

1.2. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les développements actuels du Photovoltaïque et le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (L'effet photovoltaïque). Ensuite on a vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, présente un point de puissance maximal (MPP) caractérisé par un courant (I_{max}) et une tension (V_{max}) et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple. Enfin on a présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique.

Le chapitre suivant fera l'objet d'une modélisation des modèles de la cellule photovoltaïque.

Chapitre 2 :

Etat de l'art sur les modèles mathématiques du générateur photovoltaïque

2. Introduction

La modélisation est utilisé pour approximer la sortie du générateur photovoltaïque (tension, courant), en fonction de deux paramètres qui sont la température, et l'éclairement reçu par le générateur. La modélisation nécessite un ensemble d'équation caractérisant tous les éléments du module photovoltaïque, la modélisation s'impose comme une étape importante, et conduit à une diversification dans les modèles proposés par les chercheurs, leur différences se situe dans le nombre de diodes.

Il existe plusieurs modèles mathématiques du panneau photovoltaïque, par exemple : le modèle a une diode, et à deux diodes, ils ont été développés dans le but d'obtenir la caractéristique tension-courant, pour pouvoir analyser et évaluer les performances de notre système.

Dans ce chapitre nous allons présenter différents modèles mathématiques, et faire une simulation pour notre panneau avec le modèle a deux paramètres (explicites), et enfin on pourra voir l'influence de l'éclairement, et de la température, grâce à la simulation qu'on a effectuée avec Matlab-Simulink.

2.1. Modèles mathématiques du générateur photovoltaïque

Pour décrire le fonctionnement, et le comportement du générateur photovoltaïque, il existe plusieurs modèles mathématiques, qui diffèrent entre eux par la procédure, et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension, et courant final du générateur photovoltaïque.

2.1.1. Modèles mathématiques (électriques)

2.1.1.1. Modèle idéal de la cellule PV

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque peut être schématisé ci-dessous [13] :

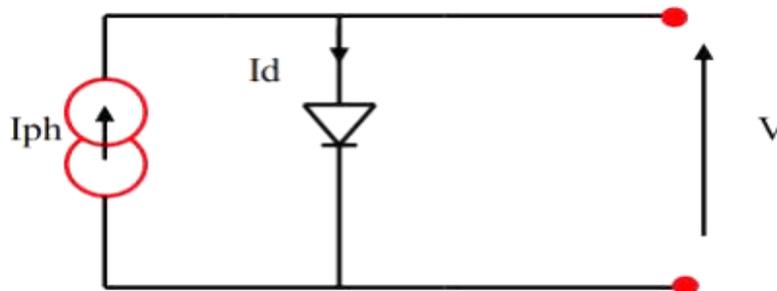


Figure 2 . 1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [13].

L'équation caractéristique résultant de ce modèle idéale est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (2.1)$$

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART SUR LES MODELS MATHEMATIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

I_{pv} : Courant fournie par la cellule [A] ;

I_{ph} : Courant produit par la photopile, ce courant est proportionnel au flux lumineux ;

I_d : Courant de diode.

Où :

$$I_{ph} = I_{cc} \frac{\phi}{\phi_{ref}} (\mu I_{cc} ((T_C - T_{ref}) + 1)) \quad (2.2)$$

I_{cc} : Courant de court-circuit mesuré aux conditions STC ;

ϕ_{ref} : Flux lumineux de référence 1000[W/m²] ;

μI_{cc} : Température de référence 298.1 [A/K] ;

T_C : Température de la cellule [K] ;

T_{ref} : Coefficient de température de court-circuit de la cellule [K].

La température de la cellule peut être calculée comme suit :

$$T_C = T_a + \phi \left(\frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (2.3)$$

T_a : Température ambiante ;

ϕ : Flux lumineux ;

N_{oct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule donnée par le constructeur.

Et :

$$I_d = I_s (e^{\frac{qV}{AkT}} - 1) \quad (2.4)$$

I_s : Courant de saturation de la diode [μA] ;

q : Charge de l'électron = 1,602. 10⁻¹⁹ [Coulomb] ;

V : Tension fournis par la cellule ;

A : Facteur de qualité de la diode ;

K : Constante de Boltzmann = 1,38. 10⁻²³ [J/K] ;

T : Température absolue,

2.1.1.2. Modèle à deux paramètres (explicites)

Ce modèle est proposé par Borowy et Salameh en 1996, Les formules pour calculer le point optimum de tension et le courant sous des conditions arbitraires sont montrées comme suit [14][15] :

$$I_{max} = I_{cc} \left(1 - C_1 \cdot \left(e^{\frac{V_{max}}{C_2 \cdot V_{co}}} - 1 \right) \right) + \Delta I \quad (2.5)$$

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART SUR LES MODELS MATHEMATIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

I_{max} : Le courant maximum correspondant au point de fonctionnement du module ;

I_{cc} : Le courant de court-circuit du module ;

V_{co} : La tension du circuit ouvert du module.

C_1 et C_2 sont des paramètres qui peuvent être calculés par l'équation (2.6) et (2.7)

Respectivement.

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{cc}}\right) \cdot e^{\frac{-V_{mp}}{C_2 \cdot V_{co}}} \quad (2.6)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{mp}}{V_{co}-1}}{\ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{cc}}\right)} \quad (2.7)$$

V_{mp} : La tension maximale du module sous conditions standards.

I_{mp} : Le courant maximal sous conditions standards ($G=1000W/m^2$, $T=25^\circ C$)

V_{max} : La tension maximale du module sous conditions standards.

$$V_{max} = V_{mp} \left(1 + 0.0539 \cdot \ln \frac{G}{G_0}\right) + \beta_0 \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \quad (2.7)$$

G : Éclairement solaire incident sur un plan incliné (W/m^2) ;

G_0 : Le coefficient de la tension en fonction de la température ($V/^\circ C$) ;

β_0 : L'irradiation solaire de référence sous conditions standards, ($1000W/m^2$).

ΔI : Dépend de la différence de température et de l'éclairement solaire.

$$\Delta I = \alpha_0 \cdot \left(\frac{G}{G_0}\right) \cdot \Delta T + \left(\frac{G}{G_0} - 1\right) \cdot I_{cc} \quad (2.8)$$

$$\Delta T = T_c - T_o \quad (2.9)$$

T_o : La température de cellule à la condition de référence ;

T_c : Température de la cellule.

$$T_c = T_a + \left(\frac{N_{OCT} - 20}{800}\right) \cdot G \quad (2.10)$$

T_a : Température ambiante ;

N_{OCT} : Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

2.1.1.3. Modèle à une diode

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est modélisé par le circuit équivalent de la figure (2. 2), ce modèle est établie par Shokley, il est composé d'un générateur de courant, dont la valeur dépend de l'éclairement reçu sur la surface de la cellule photovoltaïque, la diode représente la jonction PN, est une résistance série qui représente les pertes ohmiques, et une résistance shunt qui représente les courants de fuites [16] [17].

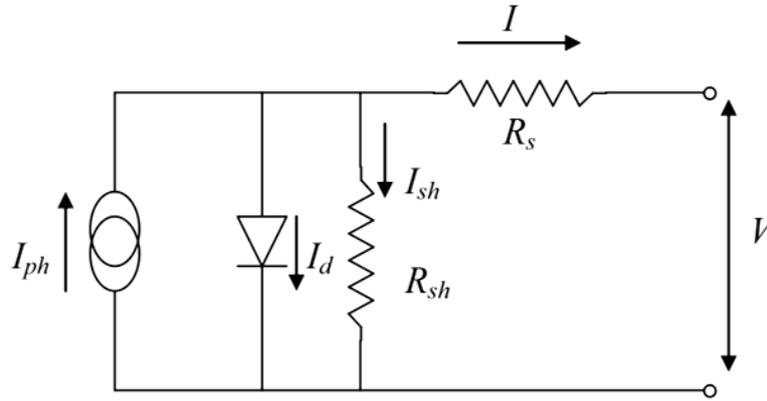


Figure 2 . 2: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.

D'après Kirchoff (loi des nœuds), le courant délivré par la cellule PV est donné par
L'expression ci-après :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.12)$$

I_d : Le courant de la diode ;

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V+I.R_s}{n.V_t}} - 1 \right) \quad (2.14)$$

I_{sh} : Le courant aux bornes de la résistance shunt ;

$$I_{sh} = \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (2.15)$$

L'équation caractéristique de la cellule PV sera donc donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+I.R_s}{n.V_t}} - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (2.16)$$

I_{ph} : Courant photovoltaïque (A) ;

n : Facteur d'idéalité de la diode ;

R_s : Résistance série ;

R_{sh} : Résistance shunt ;

V_t : Tension thermique ($J.C^{-1}$).

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.17)$$

k : Constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23} J.K^{-1}$) ;

T : Température de la cellule en degré Kelvin (K).

q : Charge de l'électron ($q = 1.302.10^{-19} C$).

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression suivante :

$$I_0 = I_{0ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{ref}}\right)^3 \cdot e^{\left[\left(\frac{q \cdot E q}{A k}\right) \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c}\right)\right]} \quad (2.18)$$

I_{0ref} : Courant de saturation référence [nA].

Le courant de saturation est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible.

2.1.1.4. Modèle à deux diodes

Ce modèle se distingue du précédent du fait qu'il se compose de deux diodes, le premier modélise les pertes par diffusion dans la jonction, tandis que l'autre modélise les pertes par recombinaison, comme le montre la figure suivante [16][17]:

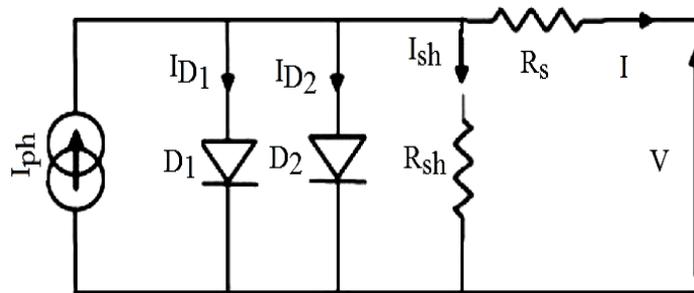


Figure 2 . 3: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diode

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

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+I R_s}{n_1 \cdot V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+I R_s}{n_2 \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V+I R_s}{R_{sh}} \quad (2.19)$$

n_1 : Facteur d'idéalité de la première diode.

n_2 : Facteur d'idéalité de la deuxième diode.

2.1.2. Modèles Mathématiques de puissance

Il existe plusieurs modèles de puissances on citera six modèles.

2.1.2.1. Modèle de borowy et salameh (Modèle 1)

Borowy et salameh ont proposé un modèle en 1996, Permettant de calculer la puissance électrique maximale, aux bornes d'un capteur photovoltaïque, le circuit de ce modèle est similaire au circuit du modèle a une diode.

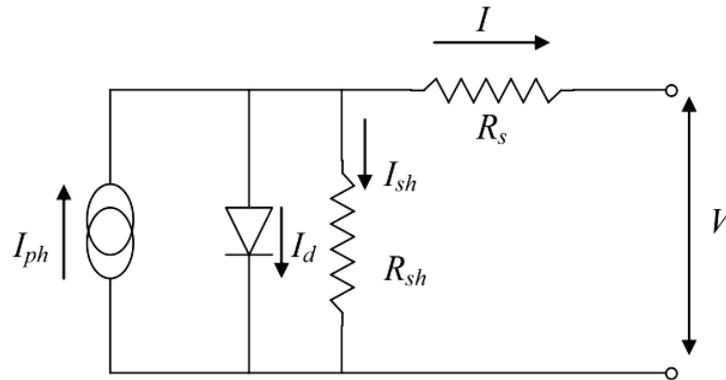


Figure 2 . 4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.

Ce modèle permet de calculer facilement la puissance produite par les modules photovoltaïques, grâce aux paramètres des modules offerts par les fabricants.

La puissance optimale à la sortie est déterminé par :

$$P_{max1} = I_{max1} \cdot V_{max1} \quad (2.20)$$

Pour un nombre de modules série N_s , N_p parallèle, la puissance maximale produite est déterminé par :

$$P_{max1} = N_s \cdot N_p \cdot I_{max1} \cdot V_{max1} \quad (2.21)$$

2.1.2.2. Modèle de Sandia (Modèle 2)

Le Sandia National Laboratory (Albuquerque, USA) a élaboré un modèle de module PV, Permet à la fois de tester des modules, ainsi que d'estimer leur productivité. Les principaux avantages du modèle sont les suivants [18]:

- Il prend en charge, la variation du spectre solaire en fonction de la position du soleil dans le ciel, et son influence sur le rendement photovoltaïque.
- Le modèle prend aussi en compte l'angle d'incidence du rayonnement direct sur le module PV. La face avant du module PV étant en général composée d'une vitre, celle-ci ne laisse pas passer le rayonnement de la même manière, suivant l'angle d'incidence du rayonnement. Ce phénomène apparaît dès que l'angle d'incidence (par rapport à la normale au module PV) dépasse 60°.
- Le modèle peut s'appliquer à la caractérisation d'un module PV constitué de plusieurs modules.

Les équations déterminantes sont les suivantes :

$$I_{sc} = \frac{\phi}{\phi_{ref}} \cdot f_1(AM) \cdot f_2(\beta) \cdot (I_{scr} + \mu I_{sc}(T_c - T_{ref})) \quad (2.22)$$

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART SUR LES MODELS MATHEMATIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

$$I_{MP} = C_o + \frac{I_{SC}}{I_{SCr}} (I_{MPr} + \mu I_{MP} (T_c - T_{ref})) \quad (2.23)$$

$$V_{oc} = V_{ocr} + C_1 \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_{SCr}} \right) + \mu I_{sc} (T_c - T_{ref}) \quad (2.24)$$

$$V_{MP} = V_{MPr} + C_2 \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_{SCr}} \right) + C_3 \left[\ln \left(\frac{I_{SC}}{I_{SCr}} \right) \right]^2 \quad (2.25)$$

Avec :

\emptyset : Rayonnement incident [W/m²] ;

T_c : Température de la cellule [K] ;

AM : Nombre d'air-masse ;

β : Angle d'incidence entre le rayonnement direct du soleil et la normale au plan du module PV ;

\emptyset_{ref} : Rayonnement de référence [W/m²] ;

T_{ref} : Température de référence de la cellule [K] ;

f_1 : Fonction du nombre d'air-masse ;

f_2 : Fonction de l'angle d'incidence du rayonnement sur le module PV ;

I_{SCr} : Courant de court-circuit de référence [A] ;

V_{ocr} : Tension de circuit-ouvert de référence [V] ;

V_{MPr} : Tension du point de puissance maximal de référence [V] ;

I_{MPr} : Courant du point de puissance maximal de référence [A].

μI_{SC} : Coefficient de dépendance en température du courant de court-circuit [A/K].

μI_{MP} : Coefficient de dépendance en température du courant de puissance maximal [A/K].

C_o, C_1, C_2, C_3 : Coefficients déterminés expérimentalement.

2.1.2.3. Modèle de Jones et Underwood (Modèle 3)

Ce modèle a été développé par Jones et Underwood en 2000, ce modèle nous permet de calculer la puissance maximale aux bornes d'un capteur photovoltaïque [18].

La puissance maximale est donnée par la relation suivante :

$$P_{max3} = FF \cdot \left(I_{cc} \frac{G}{G_o} \right) \left(V_{co} \frac{\ln(K_1 \cdot G)}{\ln(K_1 \cdot G_o)} \right) \frac{T_0}{T_c} \quad (2.26)$$

K_1 : Coefficient constant, qui peut être calculé par la formule suivante :

$$K = \frac{I_{cc}}{G_o} \quad (2.27)$$

FF : facteur de forme, qui est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir un module photovoltaïque et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir.

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{CO} \cdot I_{CC}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (2.28)$$

P_{mp} : La puissance maximale sous conditions météorologiques standards ($G=1000W/m^2$, $T=25^\circ C$).

2.1.2.4. Modèle de benchmark (Modèle 4)

Ce modèle a été élaboré en 2004, par Lu Lin, il nous permet de déterminer la puissance maximale fournie par le module photovoltaïque, pour un ensoleillement et température du module donné, ce modèle se compose de quatre paramètres, a, b, c et d, ces constantes positives peuvent être obtenues expérimentalement, et se compose d'un système d'équation simple à résoudre, résultant un point de mesure [18].

$$P_m = (a \cdot G + b) \cdot T_c + c \cdot G + d \quad (2.29)$$

P_m : Puissance maximale [w].

a, b, c, d : Constante positive obtenue expérimentalement.

T_c : Température du module [K].

$$T_c = T_a \frac{(N_{OCT} - 20)}{800} \quad (2.30)$$

T_a : Température ambiante [K].

N_{OCT} : La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal Operating cell Temperature), définie comme la température de la cellule quand le module est sous certaines conditions (irradiation solaire : $800W/m^2$, distribution spectrale : AM1.5, température ambiante : $20^\circ C$ vitesse de vent >1 m/s) dans un circuit ouvert.

G : L'irradiation solaire sur un plan incliné (W/m^2).

2.1.2.5. Modèle de Cenerg (Modèle 5)

Le modèle développé par le centre énergétique (Cenreg 2) se base sur le modèle à une diode [19].

Un bilan électrique sur ce schéma permet d'établir une expression donnant le courant I en fonction de la tension V disponible aux bornes du générateur PV :

$$I = P_1 \cdot G \left(1 + P_2 (\phi - \phi_{ref}) + P_3 (T_c - T_{ref}) \right) - \left(P_4 T_c^2 \cdot \exp \left(-\frac{E_q}{k \cdot T_c} \right) \right) \left(\exp \left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.31)$$

Les coefficients P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , R_s , et R_{sh} sont déterminés expérimentalement. Le calcul de la puissance électrique P disponible aux bornes du capteur se fait en multipliant la tension V et l'intensité I calculé avec l'équation (2.31). Les paramètres expérimentaux permettent une

caractérisation plus fiable du système PV, mais cela nécessite une phase des mesures relativement lourde.

2.1.2.6. Modèle de Bishop (Modèle 6)

Le modèle de Madison de la cellule solaire n'est pas suffisant pour résoudre le problème de la cellule photovoltaïque sous ombrage (cas d'une cellule réceptrice) [20]. Par contre le modèle de Bishop nous permet d'obtenir une caractéristique complète de la cellule (réceptrice et génératrice), l'équation de ce modèle est comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V+R_s I)}{A.n.k.T_c} \right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \left[1 + k \left(1 - \frac{V+I.R_s}{V_b} \right)^{-nb} \right] \quad (2.32)$$

Ou :

k : Coefficient de réglage de Bishop (3.4 à 4).

nb : Coefficient de réglage de Bishop (0.1).

V_b : Tension de claquage de la cellule (-10 V à -40 V).

2.2. Simulation du modèle à deux paramètres

Avant l'exécution du modèle mathématique, le choix du module est porté sur le module SHARP (175W) présenté sur la figure (2.5), ce module est constitué de 36 cellules solaires, de Silicium monocristallines, formé de deux groupes de 18 cellules connecté en série, chaque groupe à une diode by-pass. Le module fournit une puissance nominale de 175W.



Figure 2 . 5: Module SHARP (175W).

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART SUR LES MODELS MATHEMATIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

Le tableau (2.1) résume les caractéristiques électriques du module SHARP (175w) :

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_m	175 W
Courant au point de puissance maximale I_{pm}	4.95 A
Tension au point de puissance maximale V_{pm}	35.4 V
Courant de court-circuit I_{sc}	5.4 A
Tension de circuit ouvert V_{oc}	44.4 V
Coefficient d'incrément de la tension V_{oc} (β_{oc})	-156 mV /C°
Coefficient d'incrément de courant I_{sc} (α_{sc})	0.053 mA /C°

Tableau 2. 1: Paramètres du module pris de la fiche technique.

Dans ce chapitre, on retient le modèle mathématique à deux paramètres décrit dans ce chapitre. En effet, pour tracer la caractéristique I-V du module, on doit résoudre les équations (2.5) et (2.7).

Le schéma bloc du modèle à deux paramètres de la cellule photovoltaïque sous Matlab est présenté sur la figure.

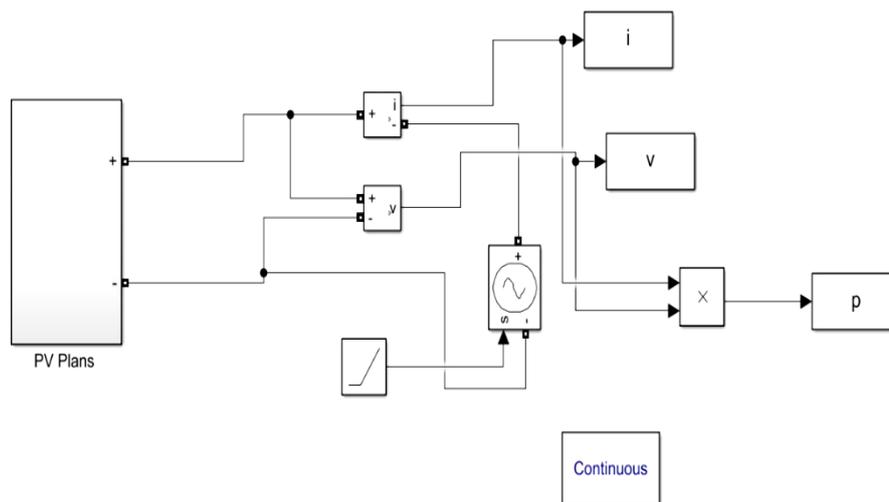


Figure 2 . 6: Schéma bloc du modèle à deux paramètres de la cellule photovoltaïque sous Matlab.

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART SUR LES MODELS MATHEMATIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

La caractéristique courant-tension (I-V) illustrée dans la figure (2.7) décrit le comportement du Générateur photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques spécifiques (niveau d'éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$ et température ambiante $T=25^\circ\text{C}$).

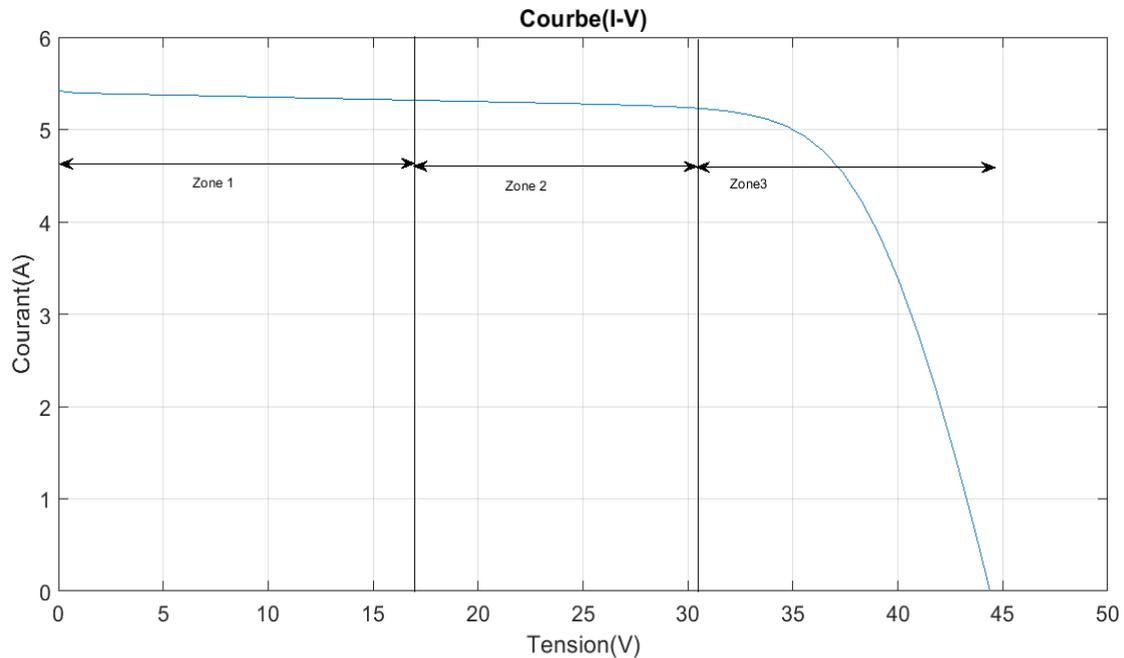


Figure 2 . 7: Caractéristiques I-V du module SHARP (175W) sous les conditions STC.

- **Zone (1) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension. Dans cette zone, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **Zone (2) :** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **Zone (3) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est similaire à un générateur de tension.

La caractéristique puissance-tension (P-V) illustrée dans la figure (2.8) décrit le comportement du Générateur photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques spécifiques (niveau d'éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$ et température ambiante $T=25^\circ\text{C}$).

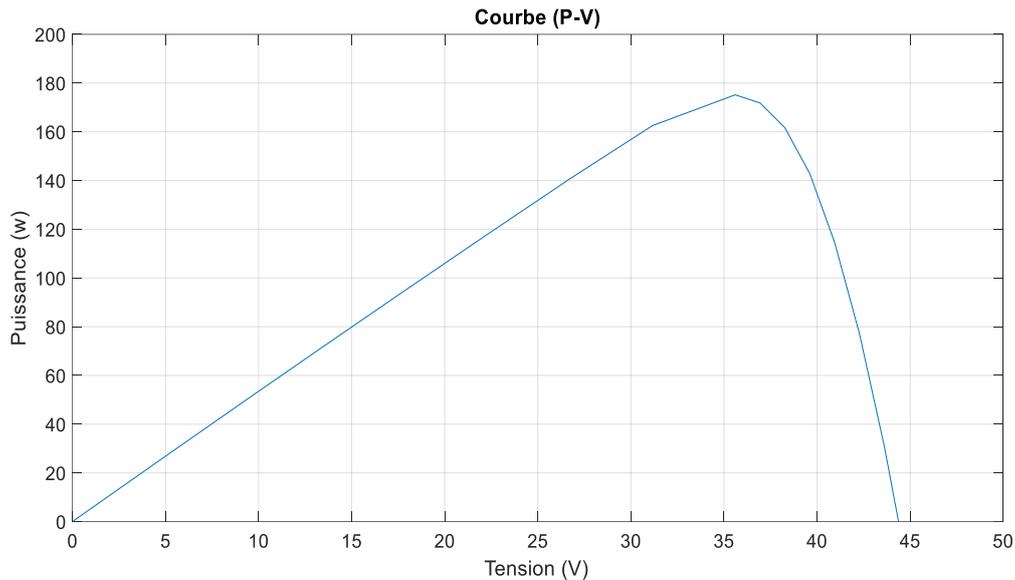


Figure 2 . 8: Caractéristiques P-V du module SHARP (175W) sous les conditions STC.

2.3. Comportement du générateur photovoltaïque

De par sa constitution, un générateur PV aura un comportement plus ou moins optimisé, et pourra ainsi produire plus ou moins de puissance.

2.3.1. Influence de la température et de l'ensoleillement sur le rendement

On peut remarquer que la caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'insolation et de la température. Ceci devient très évident en évaluant l'équation (2.7) pour des valeurs choisies de la température, et de l'insolation et en traçant les résultats.

2.3.2. Influence de la température

On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température, par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV.

2.3.2.1. Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)

La caractéristique d'une cellule photovoltaïque, est dépendente de l'éclairement, et de la température. Nous allons effectuer 3 essais, en faisant varier la valeur de la température ($T=25C^{\circ}$, $T=50C^{\circ}$, $T=75C^{\circ}$), en maintenant la valeur de l'irradiation solaire constante $E_s=1000W/m^2$.

Les figures (2.9), (2.10) présente des courbes I(V) et P(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART SUR LES MODELS MATHEMATIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

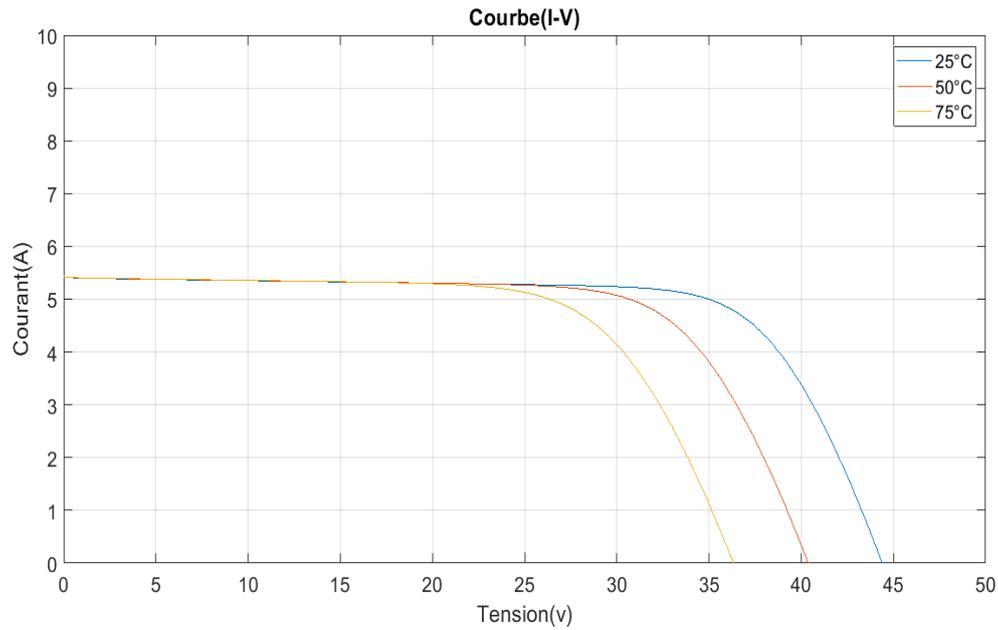


Figure 2.9 : Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000W/m^2$

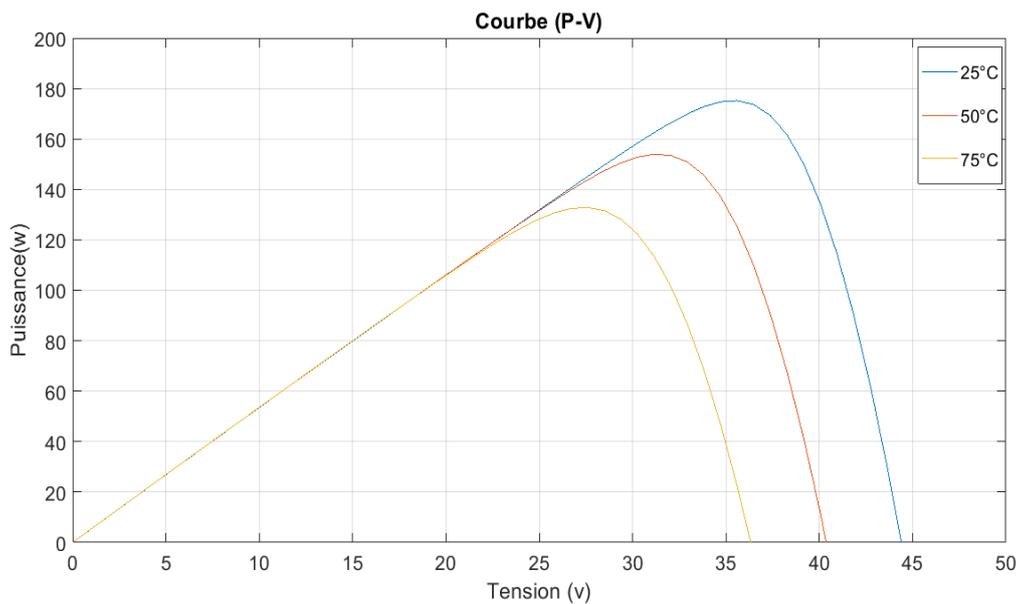


Figure 2.10 : Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000W/m^2$.

En faisant varier la température de ($25C^{\circ}$ à $75C^{\circ}$), nous remarquons que le courant de court-circuit et la puissance maximale, sont légèrement dépendants de la température.

La tension de circuit ouvert diminue légèrement lorsque la température augmente, la puissance maximale diminue légèrement lorsque la température augmente, on constate que la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert et la puissance maximale.

2.3.3. Influence de l'ensoleillement

Il y'a une baisse du courant solaire proportionnelle à la variation de l'irradiation solaire, accompagnée d'une très légère diminution de la tension, et donc un décalage de la puissance maximale du panneau solaire vers les puissances inférieures.

2.3.3.1. Influence de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V)

Les simulations ont été faites pour différentes valeurs d'ensoleillement ($G=500,1000,1500,2000\text{w/m}^2$), en maintenant la température constante ($T=25^\circ\text{C}$). Pour chaque ensoleillement nous déterminons la caractéristique courant-tension (I-V) ainsi que pour la caractéristique puissance-tension (P-V).

Les figures (2.11), (2.12) présente des courbes I(V) et P(V) pour différentes irradiances solaires de fonctionnement du module photovoltaïque à une température constante.

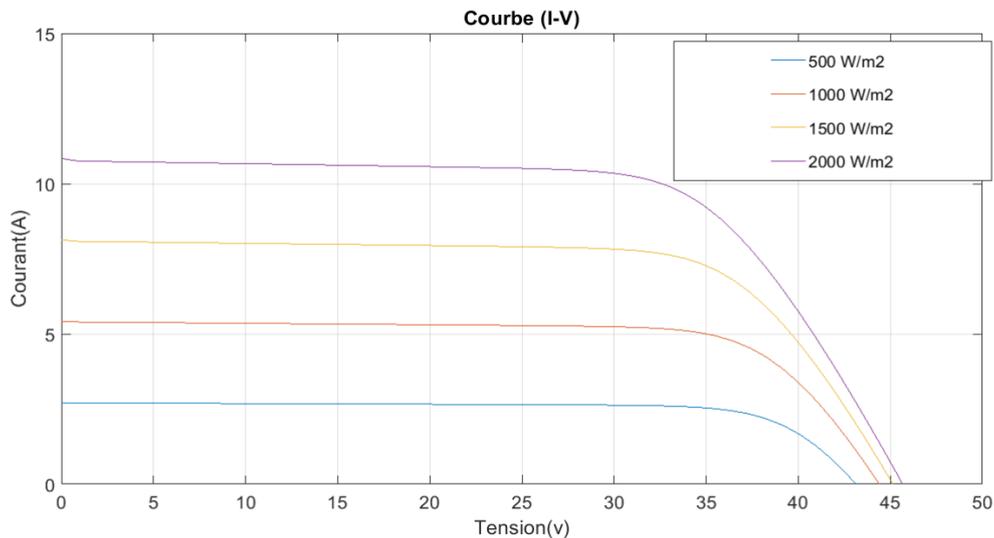


Figure 2.11 : Courbes I(V) d'un générateur PV pour différents niveaux d'éclairement

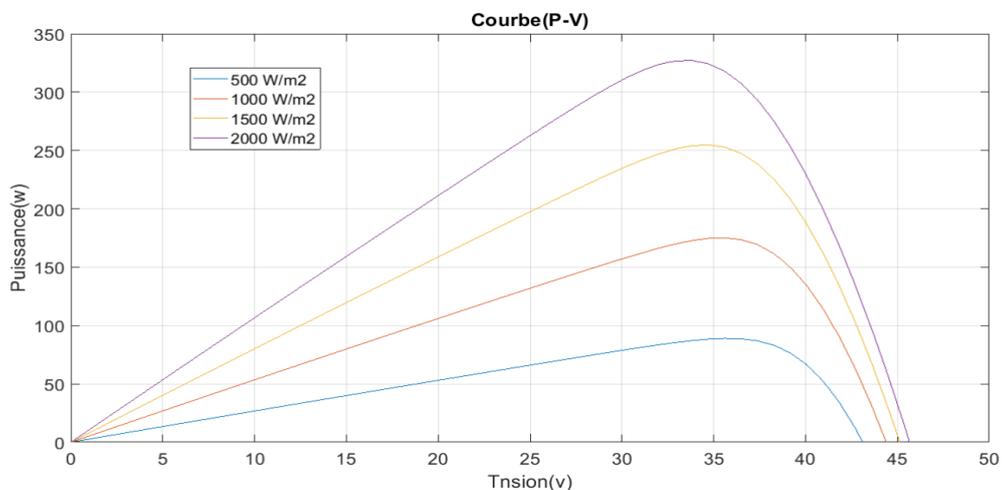


Figure 2.12: Courbes P(V) d'un générateur PV pour différents niveaux d'éclairement

La valeur du courant de court-circuit et la puissance, sont directement proportionnelle à l'irradiation solaire G . Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement, et peuvent être considéré comme une constante pour une installation donné.

Ceci implique :

- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension ;
- La puissance optimale de la cellule est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.

2.4. Conclusion

Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module. Nous avons opté pour le modèle à deux paramètres pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'irradiation et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation de notre panneau photovoltaïque SHARP (175w). Nous avons commencé par décrire les différents modèles mathématiques (modèle à une diode, modèle à deux diodes et le modèle explicite,...), puis nous avons procédé à la simulation des caractéristiques courant/tension et puissance/tension du module photovoltaïque dans différentes conditions météorologiques. Pour finaliser nous avons parlé de l'influence de l'éclairement et de la température.

Dans ce qui suit nous allons estimer les pertes de puissance générées par le générateur photovoltaïque sous différents montage en présence d'ombrage partiel.

Chapitre 3 :

**Estimation des pertes de puissance dans
un générateur photovoltaïque sous
conditions non homogènes.**

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES

3. Introduction

Le secteur du bâtiment de nos jours consomme 40% de l'énergie produite, il est responsable de 30% des émissions de gaz à effet de serre, face aux changements climatiques qui menace notre planète, il est plus nécessaire de se tourner vers les énergies renouvelables, pour cela il faut moderniser et concevoir nos bâtiments en intégrant une démarche de qualité environnementale.

Il est donc impératif de développer dans le bâtiment des solutions énergétiques fonctionnant avec des énergies renouvelables, et en particulier l'énergie photovoltaïque. L'intégration aux bâtiments des capteurs photovoltaïque est confronté aux problèmes d'ombrage, ce phénomène d'ombrage peut causer plusieurs dysfonctionnements parmi lesquels, on cite : l'effet extrinsèque provoquant la réduction de l'irradiation solaire, ce qui veut dire une réduction de production énergétique ,ensuit l'effet intrinsèque qui est la répartition non homogène de l'irradiation sur le plan des modules photovoltaïques , cela peut causer des pertes électrique par Mismatch , voir le problème de Hot spot signifiant la destruction des cellules du module.

Dans ce chapitre, on va étudier le comportement du générateur PV, en présence d'ensoleillement non homogène, nous allons estimer les dégradations causées par cette anomalie de fonctionnement pour des scénarios envisagés bien déterminer.

3.1. Ombrage dans les installations photovoltaïques

L'effet ombrage intéresse beaucoup les scientifiques qui travaillent dans le domaine de l'énergie PV, puisque il est l'ennemi imprévisible du bon fonctionnement d'un panneau photovoltaïque. La cellule ombragée devient réceptrice d'énergie au lieu d'être productrice d'énergie, l'énergie se transforme en chaleur, et crée un risque de dégradation pour la cellule. De ce fait le courant de l'ensemble de la chaîne de cellule devient limité.

Une ombre sur les capteurs photovoltaïque entraîne une perte de production d'énergie, cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité de l'obstacle, qui peut être un bâtiment, arbre, un nuage, il vaut mieux quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre la pose de ces panneaux photovoltaïque, et il est indispensable d'identifier précisément les zones d'ombrage pour déterminer la dimension.

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES

3.1.1. Différents types d'ombrage

L'ombrage sur les modules photovoltaïques peut se manifester sous plusieurs formes avec des sensibilités différentes, on peut distinguer deux types d'ombrage :

- ombrage global : il ne laisse passer aucun rayonnement solaire, qu'il soit (direct ou indirect) d'atteindre la cellule du module photovoltaïque. on prend comme exemples : (Couverture, éjections d'oiseaux, morceaux de nylon ou carton.....) ;
- ombrage partiel : il ne laisse pas passer que le rayonnement direct pour atteindre la cellule du module PV, sa peut être un nuage, des cheminés, arbre, bâtiments.....

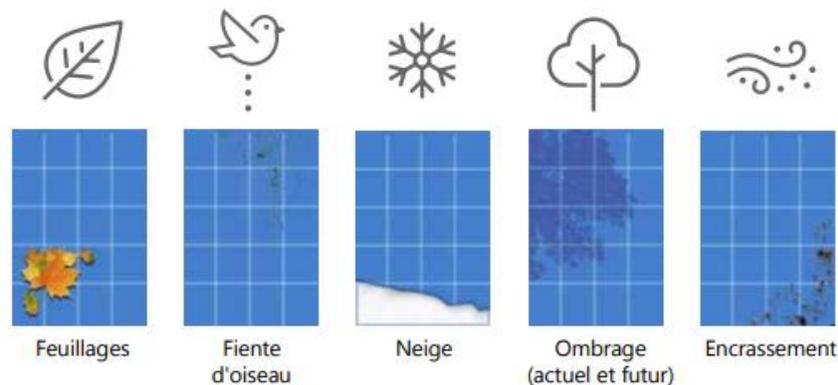


Figure 3 . 1: Types d'ombrage (ensoleillement non homogène).

3.1.2. Problèmes causés par l'ensoleillement non homogène

Une ombre signifie qu'un obstacle empêche l'arrivée de l'énergie lumineuse sur les cellules PV. Si une cellule est ombragée, sa production de courant sera dégradée. Les cellules PV d'un panneau solaire sont connectées en série, et la cellule qui produit le moins impose son courant à toutes les cellules de la branche.

Des effets affectant de manière durable le niveau de production de l'installation PV ou portant atteinte à la sécurité des installations PV peuvent se produire (citons le point chaud, Mismatch) [21] .

3.1.2.1. Le Mismatch

Le default MISMATCH est causé par l'association des cellules photovoltaïques, qui ne sont pas homogènes ou mal assorties (cellule ne possède pas les mêmes caractéristiques) ce déséquilibre dégrade le point de puissance maximale, et conduit à une baisse de production du module photovoltaïque on doit s'assurer à ce que les paramètres de l'équation soient identiques pour toutes les cellules.

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES

Le défaut d'ombrage est un cas particulier du défaut MISMATCH, son impact provoquera une diminution de l'énergie reçu par les différentes cellules. Une légère variation des caractéristiques des cellules photovoltaïques à la fabrication, peut être à l'origine des pertes par mismatch [22].

3.1.2.2. Le Point chaud

Dans un module photovoltaïque, les points chauds peuvent se produire par n'importe quelle combinaison ; une défaillance d'une cellule, de l'interconnexion, d'un ombrage partiel et une variation du courant généré d'une cellule à l'autre (mis-match). Ils peuvent aussi résulter d'une diode anti-retour inadéquate ou à cause d'une cellule craquée à l'intérieur du module. Selon, la gravité de la craquelure, une cellule peut potentiellement produire moins de courant que les autres cellules de la série. Il suffit d'un ombrage ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant produit par le module photovoltaïque. Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule défectueuse ou faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et elle se compose en récepteur. Ainsi, elle se trouve en siège d'une dissipation thermique relativement élevée pouvant conduire à sa destruction totale : c'est le phénomène du point chaud ou hot-spot ; ce facteur peut avoir une conséquence majeure sur la dégradation des modules [8][23].



Figure 3 . 2 : Exemples des points-chaud d'une cellule photovoltaïque.

3.2. Moyens de protection

Une installation photovoltaïque est destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années, il est important de protéger notre système pour éviter les pannes destructrices qui

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES

peuvent endommager notre système. Pour éviter ces pannes destructrices, deux types de protection classique sont utilisés.

3.2.1. Diodes By-pass

Celle-ci se trouve dans le boîtier de connexion à l'arrière des modules, ces diodes sont disposées dans la direction du courant continu, dans les conditions normales la diode se comporte comme un circuit ouvert, est si un courant inverse est créé, la diode empêche le passage tout en continuant à autoriser le courant continu quand un des modules est ombré, cette partie doit être polarisée en inverse, et ne se comporte pas comme une génératrice (générateur électrique), mais devient comme un récepteur qui dissipe une certaine puissance, sous forme de chaleur ce qui provoque l'échauffement de la zone ombrée.

Pour assurer une meilleure efficacité, il faut utiliser une diode pour chaque cellule dans le cas où un module se trouve à proximité d'un objet qui lui fournit de l'ombre, sa caractéristique est améliorée par la diode by-pass sans cette diode le courant du module serait déterminé par celui de la chaîne ombrée [24].

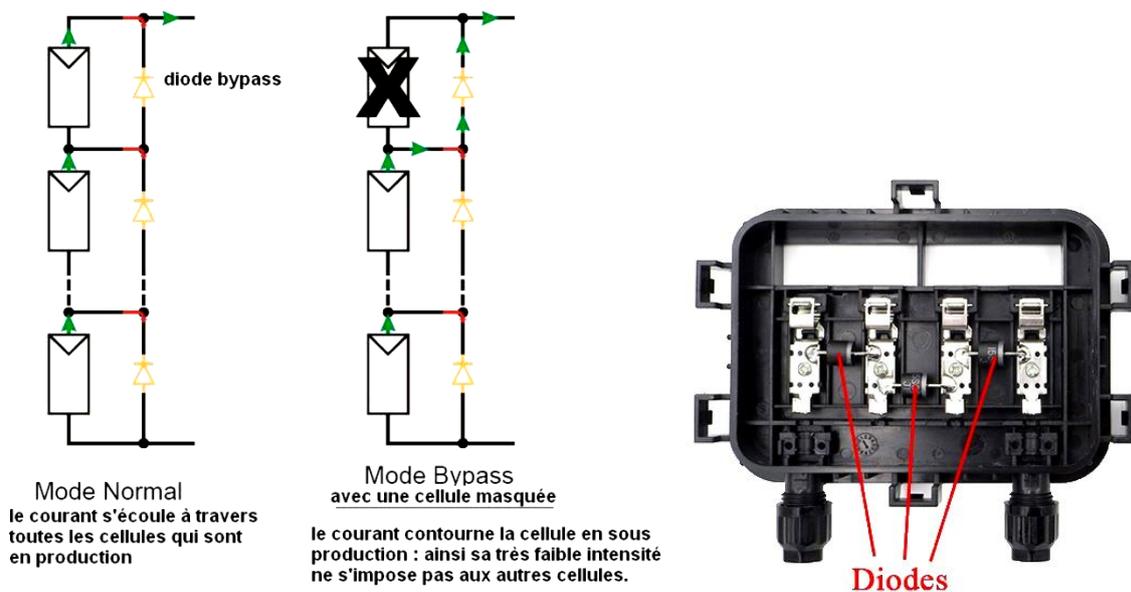


Figure 3 . 3: Montage des diodes by-pass.

Le rôle de la diode est double :

- Protéger les cellules contre le phénomène du pont chaud ;
- Améliorer les performances des modules soumis à l'ombrage ;
- Pour augmenter la durée de vie du panneau.

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES

3.2.2. Diodes Anti-retour

Lorsque le soleil brille, la tension par les panneaux est supérieur à celle de la batterie donc la batterie se charge. Cependant dans la nuit, lorsque les panneaux ne produit pas d'énergie, la tension de la batterie ferait circuler un courant dans la direction opposé à travers les panneaux, et ce phénomène peut apparaitre lorsque plusieurs modules sont connecté en parallèle.

Le choix de l'un de ces deux diodes, réside donc entre la tolérance, et la perte en fonction normale, pour le cas d'utilisation de la diode anti-retour, la perte causé par le courant inverse, on met un fusible, qui doit être dimensionné afin que les composantes du string (module, câble, connecteur) puissent supporter l'intensité du courant inverse [25].

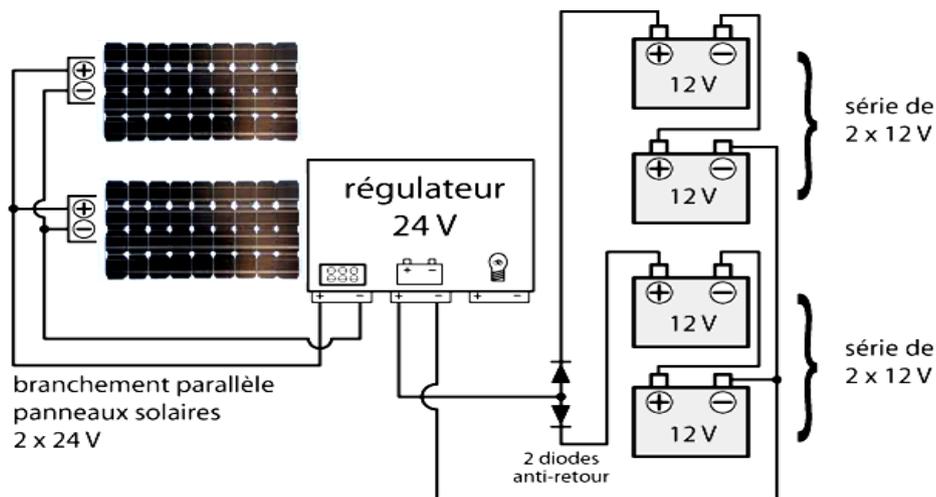


Figure 3 . 4: Montage des diodes anti-retour.

3.3. Estimation des pertes de puissance sous ensoleillement non homogène :

Dans le but d'évaluer les pertes dus à l'effet de l'ombrage, il faudra faire la schématisation électrique de ce phénomène en modélisent le générateur photovoltaïque et la variation d'ensoleillement, nous examinerons différentes connexions des modules photovoltaïques (série et parallèle) et pour les deux montages possibles sur le toit de la maison, soit un montage en longueur, soit en largeur).

L'installation comprend six panneaux de type Sharp de 175 W chacun. Les figures suivantes représentent les cas de montage envisagés :

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGÈNES

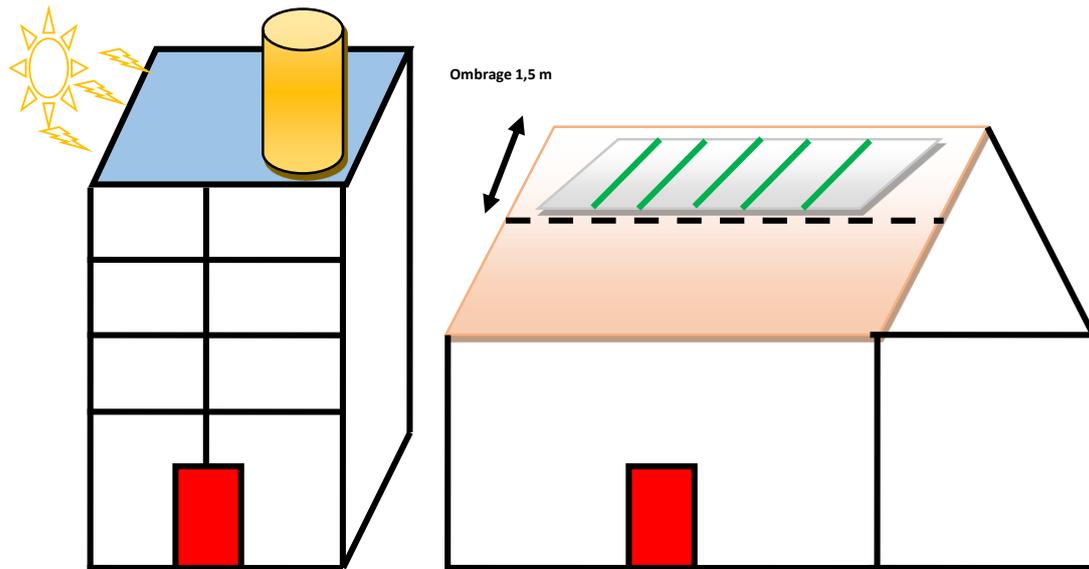


Figure 3 . 5: Montage du générateur PV en longueur.

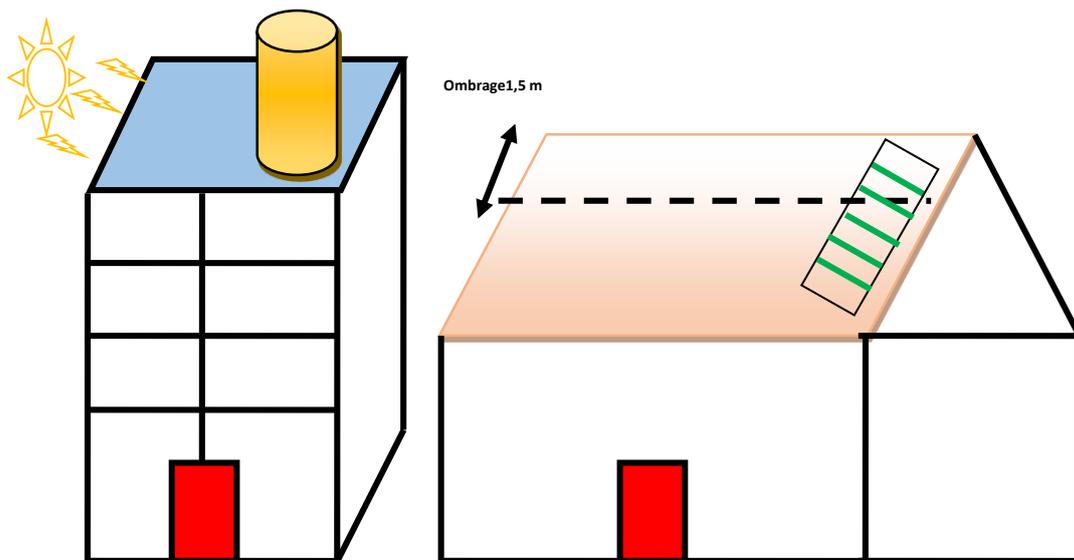


Figure 3 . 6: Montage du générateur PV en largeur.

3.3.1. Différentes connexions des modules photovoltaïques

3.3.1.1. Modules en série

Cette architecture représente l'assemblage de plusieurs générateurs photovoltaïques en série, la borne négative est relié à la borne positive du deuxième générateur, les modules sont connectés en parallèle avec la diode By-pass, celle-ci protège notre système des courants inverses, pour mesurer la tension aux bornes du générateur on introduit un voltmètre, le courant produit par les générateurs est mesuré par un ampèremètre introduit en série avec les générateurs, ceux-ci nous permettront de calculer la puissance produite par l'ensemble.

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES

Ce teste a été fait avec 6 modules connecté en série, on suppose de placer ces modules sur le toit d'une maison, pendant la journée ces modules reçoivent de l'ombre qui vient d'une bâtisse qui est construite à coté de cette maison, cette bâtisse est doté d'une cheminé, qui elle aussi fournit de l'ombre à notre générateur photovoltaïques pendant certaines heurs de la journée, les caractéristiques de cet ombre sont évoquer ci-dessous:

- ☞ **Cas 1 et a** : les six panneaux sont sain et fonctionne à ensoleillement homogène de 850 W/m^2 ;
- ☞ **Cas 2 et b** : Deux panneaux sont ombragés (montage en largeur) reçoivent 650 W/m^2 et les quatre restant fonctionnent normalement à 850 W/m^2 ;
- ☞ **Cas 3 et c** : Deux panneaux sont ombragés (montage en largeur) reçoivent 650 W/m^2 , un panneau reçoit 450 W/m^2 (intervention de la cheminé) et les trois restant fonctionnent normalement à 850 W/m^2 ;
- ☞ **Cas 4 et d** : les six panneaux sont ombragés (montage en longueur) et fonctionne à ensoleillement de 650 W/m^2 .

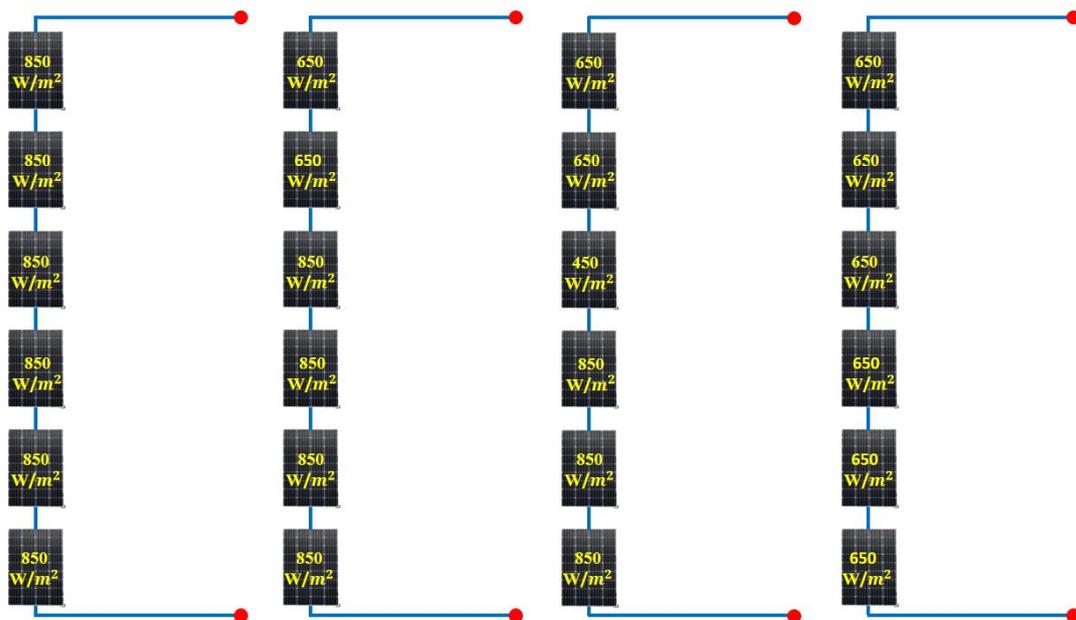


Figure 3 . 7: schéma synoptique des cas 1, 2, 3 et 4 de gauche à droite respectivement (Montage en série).

- ❖ Nous supposons que l'ombrage couvre 1,5 mètre sur la longueur du toit (toute la surface du générateur sera couverte en longueur (cas 4 et d) et 2 panneaux seront masqués en largeur (cas 2 et b), le cas 3 et c imitent l'effet de la cheminé.

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES

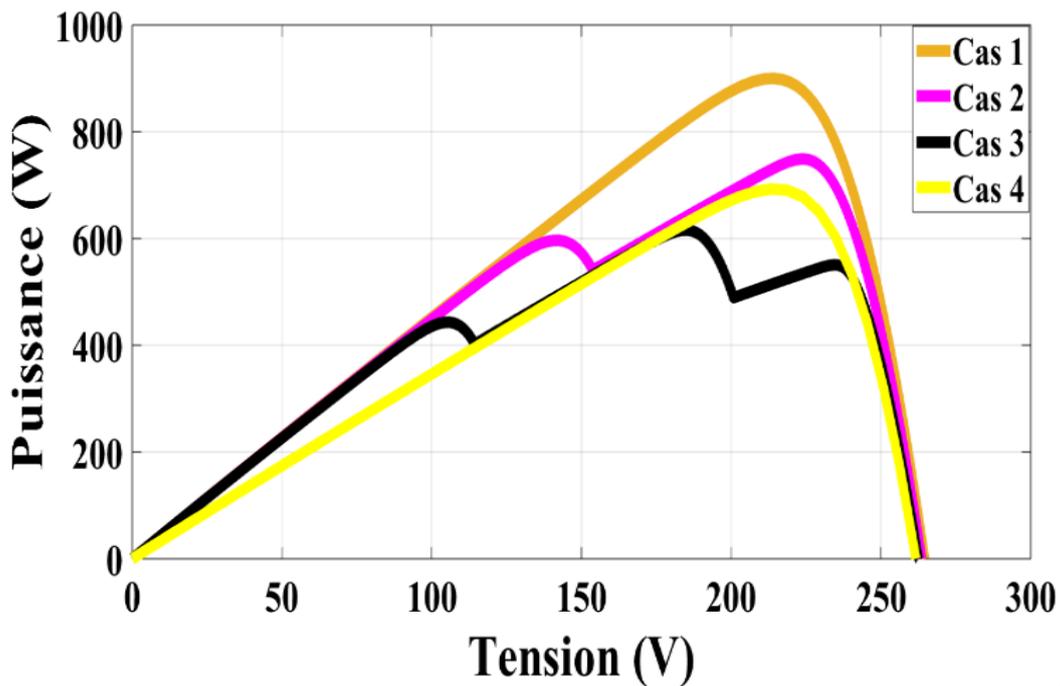


Figure 3 . 8: Evolution de la caractéristique (P-V) pour différent cas d'ombrage en série.

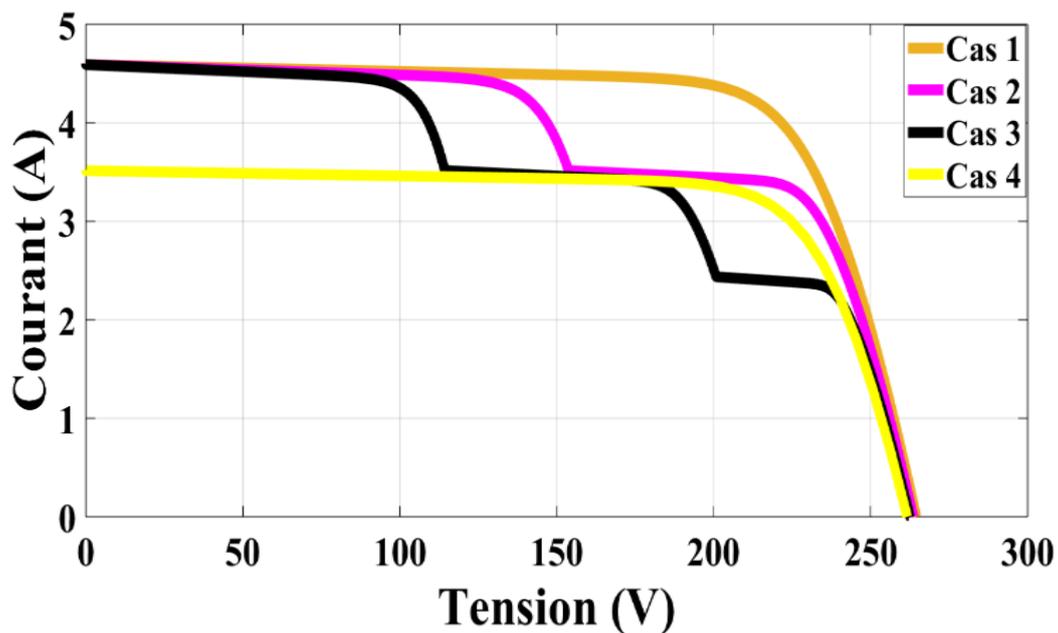


Figure 3 . 9: Evolution de la caractéristique (I-V) pour différent cas d'ombrage en série.

3.3.1.2. Module en parallèle

Cette architecture représente l'assemblage de plusieurs générateurs photovoltaïques en parallèle, la borne négative est relié à la borne négative du deuxième générateur, la borne positive est connecté à la borne positive, les modules sont connecte en parallèle avec la diode By-pass.

**CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN
GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES**

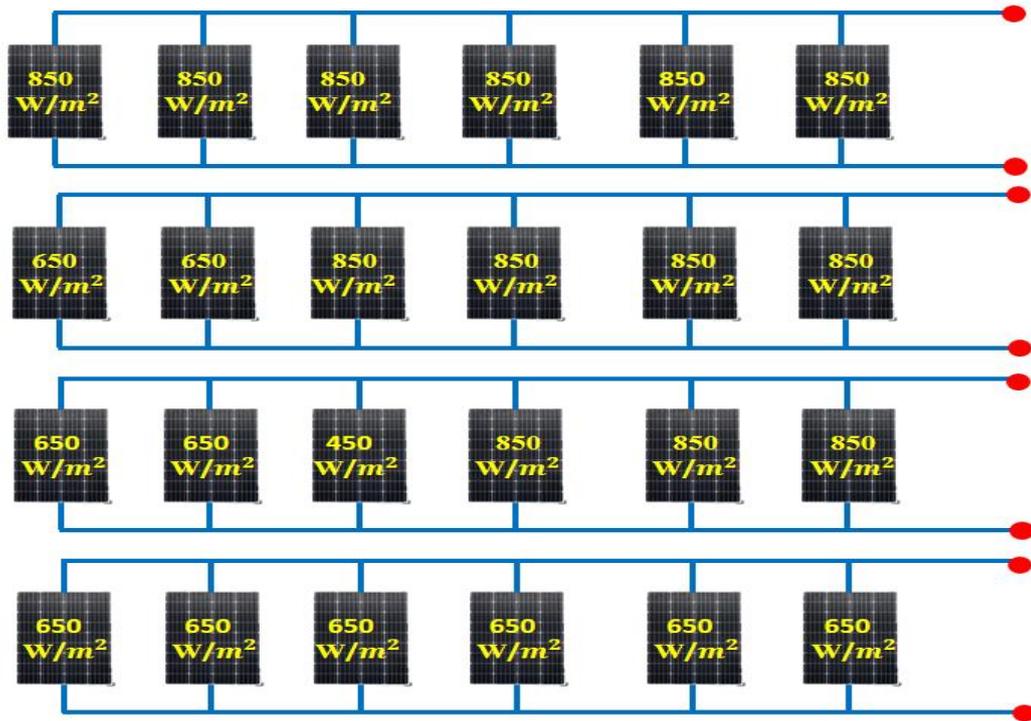


Figure 3 . 10: schéma synoptique des cas a, b, c et d de haut en bas respectivement
(Montage en parallèle).

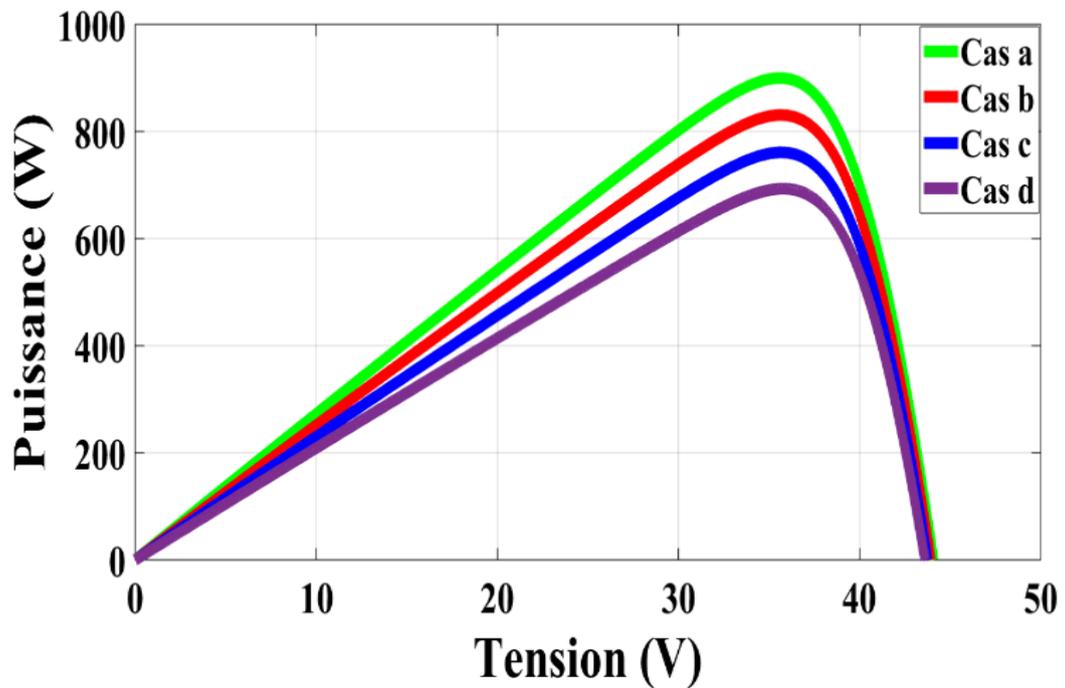


Figure 3 . 11: Evolution de la caractéristique (P-V) pour différents cas d'ombrage en parallèle

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES

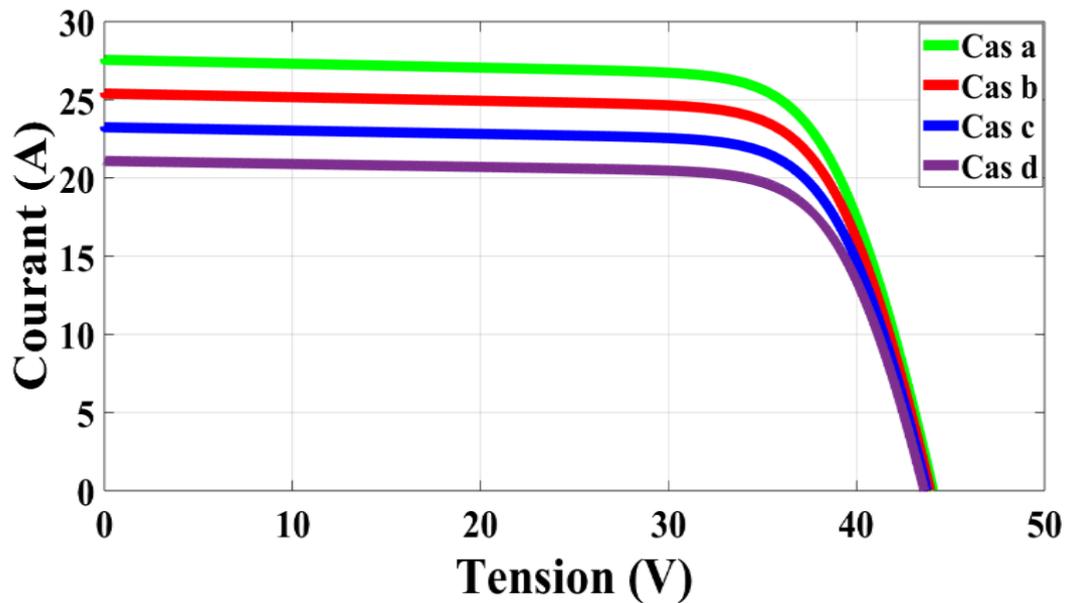


Figure 3 . 12 : Evolution de la caractéristique (I-V) pour différent cas d’ombrage en parallèle.

En exploitant les résultats des figures précédentes, les valeurs maximales de la puissance, tension et courant sont résumé dans le tableau suivant, pour les deux cas de connexion série et parallèle, dans le but de calculer les différentes performances :

	Configuration en Série				Configuration en Parallèle			
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas a	Cas b	Cas c	Cas d
Puissance (W)	900	747.9	615.8	692.8	900	830.9	761.1	693.1
Tension (V)	214.2	225.8	185.3	213.4	35.81	35.2	35.6	35.7
Courant (A)	4.20	3.31	3.32	3.24	25.13	23.60	21.37	19.41
Facteur de fourme	62.56%	51.99%	42.80%	48.15%	62.56%	57.76%	52.92%	48.18%

Tableau 3. 1 : Résumé des performances du générateur sous différents cas d’ensoleillement non homogène

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES

Les graphes de la figure suivante représentent l'évolution de la puissance, pour différents cas d'ombrage réalisés en faisant varier les scénarios d'ombrage.

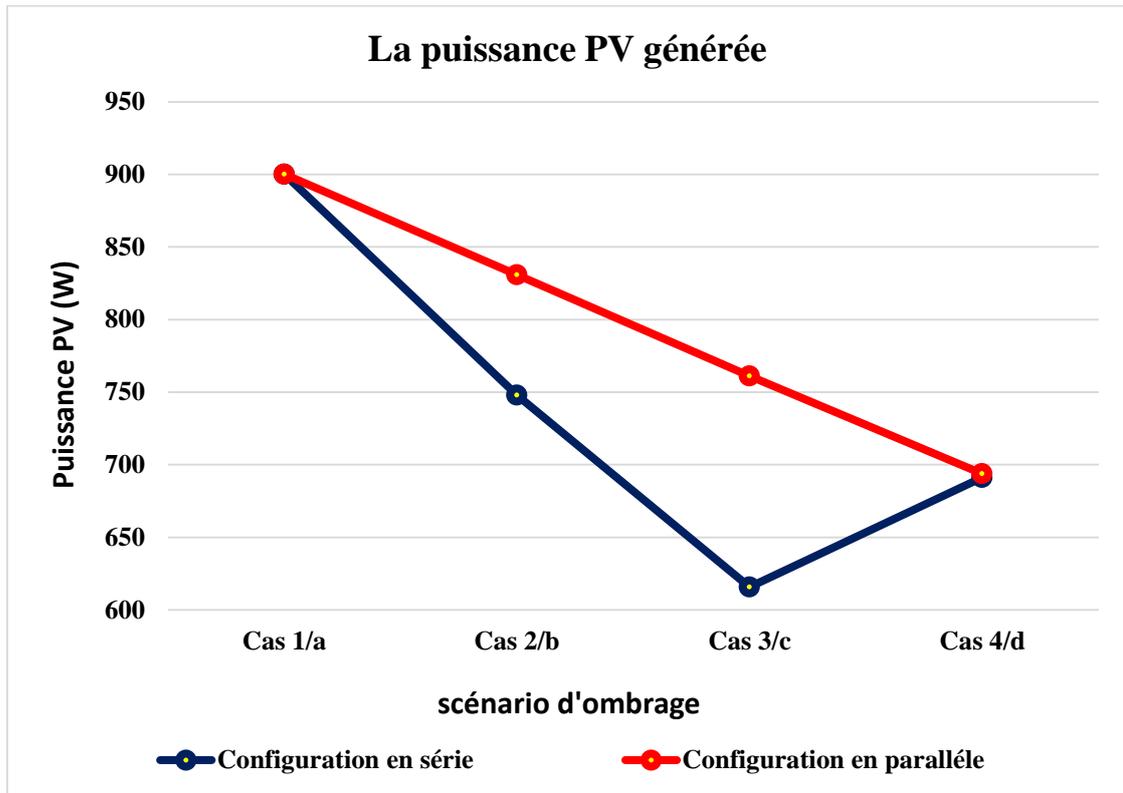


Figure 3 . 13: Evolution la puissance PV générée pour différents cas d'ombrage envisagés.

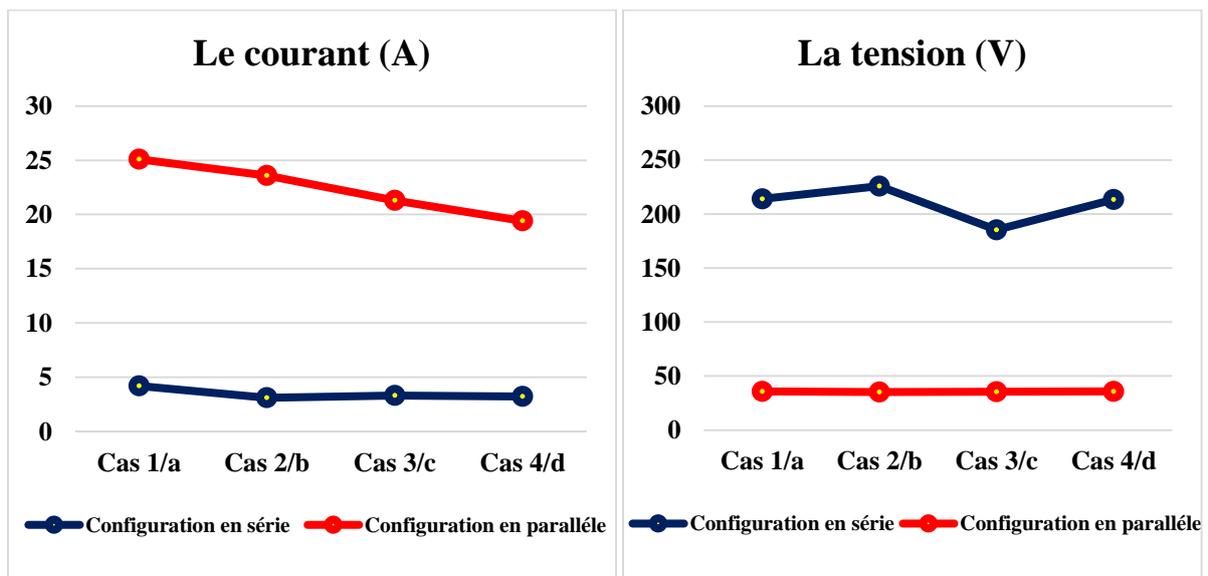


Figure 3 . 14: Evolution du courant et de la tension générée pour différents cas d'ombrage envisagés.

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGÈNES

La figure (3.15) représente la comparaison entre le facteur de forme du générateur PV série, et celui parallèle, pour différents cas d'ombrage réalisés.

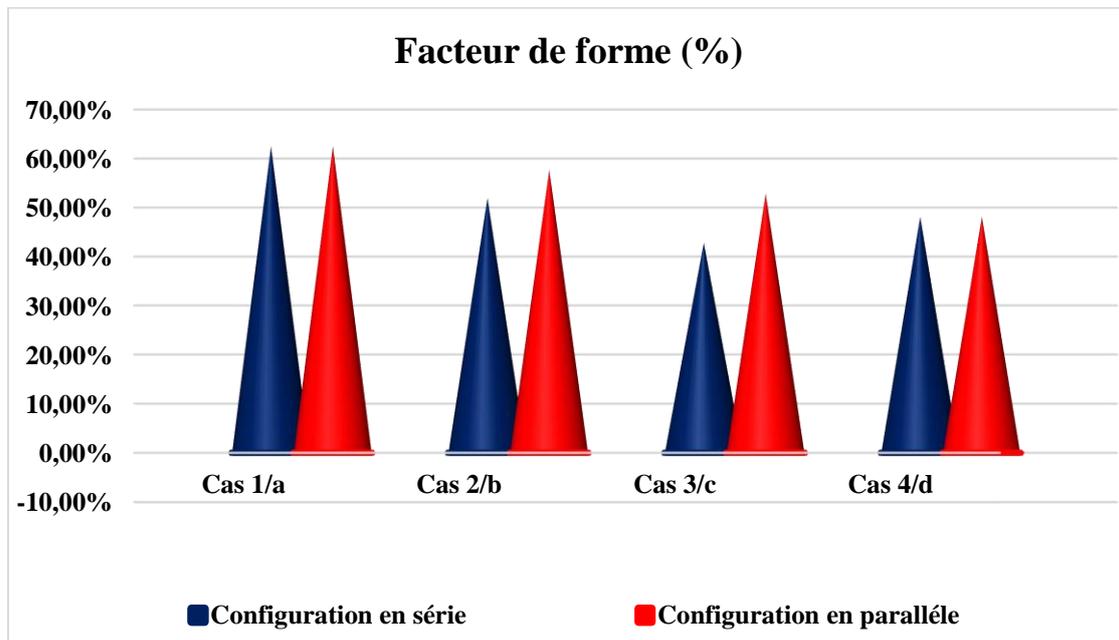


Figure 3 . 15: La comparaison entre le facteur de forme des différents cas d'ombrage étudiés.

En exploitant les résultats du tableau (3.1), on a pu calculer les pertes de puissances donnée par le tableau (3.2) suivant :

	Configuration en Série			Configuration en Parallèle		
	1/2	1/3	1/4	a/b	a/c	a/d
Les pertes de puissance	16.90%	31.57%	23.02%	07.67%	15.43%	22.97%

Tableau 3. 2 : Valeurs des pertes de puissance.

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGÈNES

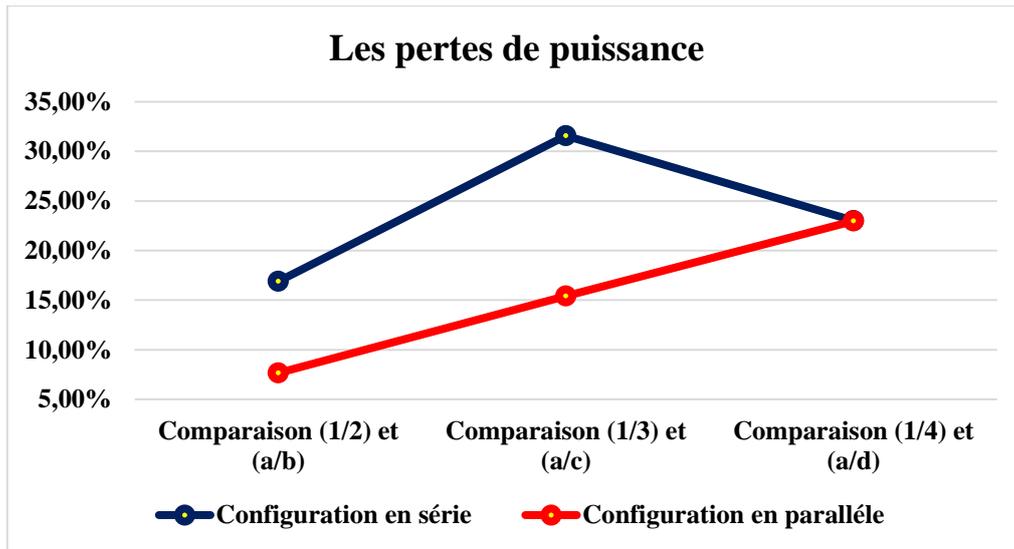


Figure 3 . 16: Pertes de puissance entre différents cas de la configuration série et parallèle.

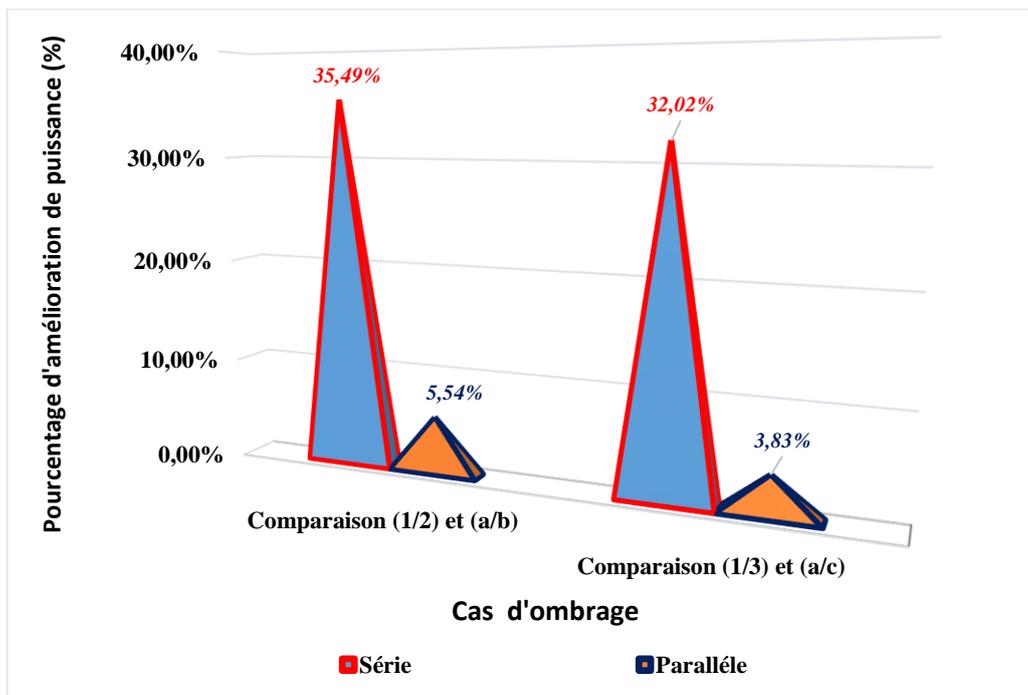


Figure 3 . 17 : Pourcentage d'amélioration de puissance entre différents cas.

3.4. Analyse des résultats

D'après les résultats ci-dessus (pour un générateur d'une seule branche en série), on a pu remarquer qu'avec un ombre de 1,5 mètre la surface du générateur est totalement ombrée pour les montages en longueur (série et parallèle), c'est pour cela que les résultats du cas 4 et d sont identiques (même chute de puissance près de 23%). Concernant les montages en largeur l'ombre impacte que 2 panneaux (un tiers de la surface) la différence apparaît entre le

CHAPITRE 3 : ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE SOUS CONDITIONS NON HOMOGENES

montage série et parallèle soit 17% de perte en série et 7% en parallèle, cela est due à la limitation de toute la branche par les panneaux ombragé contrairement dans le cas en parallèle ou juste les deux modules qui sont impacté le reste est sain et fonctionnent normalement.

Le cas le plus défavorable est le cas 3 ou la cheminé va encore masquer un panneau induisant une perte d'un tiers (31%) de la puissance de base (à l'état sain).

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on à parler de l'impact de l'ombrage, on a cité ces différents types, et différentes configurations, ensuite nous avons vu les différents problèmes causées par l'ombrage, ces causes, et les éléments de protection contre ces problèmes, on a terminé par faire une étude sur les estimations de perte de puissance sous un ensoleillement non homogène, sur le panneau photovoltaïque de type SHARP 175W, pour différents états, et selon les différents niveaux d'ensoleillement, le but de cette étude est de voir l'influence de l'impact d'ombrage sur le rendement, et la puissance débitée du générateur photovoltaïque.

De cette étude nous avons conclu que l'ombrage affecte directement le rendement de notre système, et les pertes de puissances augmentent progressivement avec l'augmentation de nombre de modules ombragée.

Conclusion Générale :

Conclusion générale :

Pour accroître la viabilité économique des systèmes photovoltaïques et pour une meilleure intégration de ce système, le problème de l'ombre sur les générateurs photovoltaïques devrait être pris en considération. La plupart des modules sont désormais équipés de diodes de by-pass et anti retour pour réduire au minimum l'effet de l'ombre (et protéger les cellules), mais ces effets sont significatifs.

Nous avons entamé ce mémoire par des généralités sur les énergies renouvelables qui se présente comme une solution idéal afin de diminuer le réchauffement climatique qui est un problème majeur sur l'écosystème de la planète terre. Dans cette partie initiale, nous avons donné une description générale sur l'énergie renouvelable, le concept de l'énergie solaire photovoltaïque, les caractéristiques des cellules et les principes technologies des cellules solaires.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation de notre panneau photovoltaïque SHARP (175w), nous avons décrie les différents modèles mathématiques (modèle à une diode, modèle à deux diodes et le modèle explicite,...), puis nous avons procédé à la simulation des caractéristiques courant/tension et puissance/tension du module photovoltaïque dans différentes conditions météorologiques.

D'après l'analyse des différents résultats nous a permis de constater l'influence de l'éclairement et de la température sur la puissance pouvant être délivrée par un panneau PV qui sont importantes. Lorsque l'éclairement varie pour une température donnée, le courant de court-circuit varie proportionnellement à l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert varie très peu. Par contre, si la température croît à éclairement constant, la tension de circuit ouvert décroît alors que le courant de court-circuit croît légèrement.

Le troisième chapitre nous avons parlé sur les différents problèmes rencontrées dans les installations photovoltaïques, car dans la technologie photovoltaïque il est clair que les modules ne maintiennent pas obligatoirement leur performances initial au fur et à mesure de leurs fonctionnements, si ce système photovoltaïque présente des avantages, il présente aussi quelques inconvénients .on notera par ses inconvénients sa sensibilités aux différentes anomalies au cours de son fonctionnement ce qui conduit par la suite à une baisse de la performance du système et voire à son indispensabilité total , ensuit on as soumis notre générateur a différents cas d'ombrages pour estimer les pertes de puissances du a cet ombre.

L'ombrage impacte de manière fondamentale la production globale d'un système photovoltaïque. Son influence est difficile à modéliser car il dépend de nombreux paramètres tels que : La puissance instantanée du rayonnement solaire, le taux de masquage des cellules ombragées (% de la surface), La zone ombragée du module (influence des diodes by-pass), Le taux d'ombrage relatif (différence d'ensoleillement entre zone ombragée et exposée), De la configuration du champ photovoltaïque (arrangement série/parallèle).

L'ombrage est souvent inévitable car dans certain condition, on ne peut pas garantir une Irradiation homogène sur la totalité de GPV. Dans cette optique d'ombrage, les cellules qui ne reçoivent pas le même niveau d'ensoleillement, provoquant ainsi un déséquilibre important lors de la délivrance de puissance. Plus que l'ombrage occupe un espace ou une surface importante plus la puissance fournie est faible.

Références bibliographiques :

- [1]. **Said ,Mohamed Islem.** Dimensionnement et expirimentation d'un module photovoltaieue sous forte concentration (HCPV),Université Alger USTHB : Thèse doctorat, 2020.
- [2]. MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES. [En ligne] [Citation : 14 09 2022.]
<https://www.energy.gov.dz/>
- [3]. **Mambrini, Thomas.** Caractérisation depanneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. UNIVERSITE PARIS-SUD : THÈSE DE DOCTORAT, 2017.
- [4]. **Bensalem, Salaheddine.** Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires . université FERHAT ABBAS – SETIF : s.n., 2011.
- [5]. **Kintz, Harold.** Réalisation de couches minces nano composites par un procédé original couplant la pyrolyse laser et la pulvérisation magnétron : application aux cellules solaires tout silicium de troisième génération . Université Paris : Thèse de doctorat.
- [6]. **Trung, Dang Minh.** Elaboration de cellules solaires photovoltaïques a base de polymères conjugués, études des systèmes reticulables. Université de Bordeaux 1 : Thèse de doctorat, 2009.
- [7]. **G.N. Tiwari, S.Dubey,.** Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their applications. Cambridge : s.n., 2010. G. N. Tiwari, S. Dubey, Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their applications, Cambridge, 2010..
- [8]. **Mambrini, Thomas.** Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Université Paris-Sud : Thèse de doctorat, 2014.
- [9]. **Fahad, Maoulida.** Modélisation d'un module photovoltaïque de type bp sx 150 pour la génération d'énergie électrique. 2010.
- [10]. **Salaheddine, MANSOUR.** Etude de Dimensionnement optimal d'une station solaire autonome en site isolé. Université Abou-Bakr Belkaide de Tlemcen : Memoire Master , 2014.
- [11]. **Grim Naima, Cheruf Farida.** Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, Université Tizi-Ouzou,Mémoire Magister , 2018.

- [12]. **Stephane Veghetti**. Système photovoltaïque recordée au reseau (choix et dimensionnement des etages de conversion), Université de Grenoble , Thèse doctorat, 2010
- [13]. **Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho**. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays.. 10th Brazilian Power Electronics : s.n., 2009.
- [14]. **Wahiba, BELMELIANI Mohammed Réda et YOUCEF**. Modélisation d'un système photovoltaïque relié au réseau : Contrôle des puissances active et réactive . Université Mascara : s.n., 2017.
- [15]. **Picault, D**. Reduction of Mismatch Losses in Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Alternative Topologies. Université de Grenoble, : s.n., 2010.
- [16]. **Y.Pankow**. Etude de l'intégration décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque. Ecole centrale de Lille : Thèse de doctorat, 2004.
- [17]. **O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed**. Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models. Montréal : 7th International ELECTRIMACS Congress, 2002.
- [18]. **Sedik, BOUZAGHOU**. Developpement des modeles mathematiques d'un generateur photovolta • que. USTHB Alger : Memoire master, 2015.
- [19]. **D.L. King, J.A. Kratochvil, W.E. Boyson, and W.I. Bower**. Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays". Usa : Sandia National Laboratories, 2004.
- [20]. **J.W.Bishop**. Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits. s.l. : Solar Cells, vol. 25, pp. 73-89, 1988.
- [21]. **Mohammed., SADOK**. Détermination des paramètres, performances et étude de la dégradation des modules photovoltaïques en milieu saharien. Université Telmcen : Thèse de doctorat, 2011.
- [22]. **ASKRI Abdallah, SOUDA El Mekki**. Étude de Défauts et Défaillances sur les Panneaux Photovoltaïques et leur Maintenance. Université El Oued : Memoir master, 2021.

[23]. **Ndiaye., ABABACAR.** Etude de dégradation et de fiabilité des modules photovoltaïques impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance. Université Dakar : Thèse doctorat, 2016.

[24]. **IMESSAOUDENE Saïd, LACEB Chafie.** Détection et Localisation de Défauts dans un Système Photovoltaïque. Université Tizi-ouzou : s.n., 2013.

[25]. **BUN, Long.** Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV. Université de Grenoble : Thèse doctorat, 2012.

