

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes
De MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Energie renouvelable

Présenté par

Fatima ZOURDANI

Mohammed Amine DOUIDI

Thème

Commande MPPT d'un générateur photovoltaïque
avec suivie de référence

Mémoire soutenu publiquement le 22/09/2024 devant le jury composé de :

Madjid SI BRAHIM

MCA UMMTO Président

Rabah ROUAS

MCB UMMTO Encadreur

Aghiles ARDJAL

MCA UMMTO Examineur

Remerciement

Avant tout on remercie Dieu Qui nous a éclairé le chemin du savoir.

Au terme de ce projet, nous tenons à exprimer notre gratitude à Monsieur ROUAS Rabah, notre encadreur de mémoire.

Nos remerciements vont aussi :

Aux membres de jury qui feront honneur de juger notre humble travail. Que tous les enseignants ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.

Enfin, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce présent mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents, pour leur amour, leur soutien et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours académique.

À mes précieuses sœurs Nabila et Chabha, et mon frère Yahia, pour leur présence rassurante et leur aide.

À mes amis, et tout spécialement à Dalia, dont l'amitié a été une source inestimable de motivation et de réconfort.

Un remerciement tout particulier à Mimou, pour son soutien indéfectible, sa gentillesse et les nombreux moments partagés.

Je souhaite exprimer ma gratitude à mon binôme pour sa coopération son aide précieuse et son implication tout au long de notre mémoire de fin d'étude.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail. Votre aide et vos encouragements ont été essentiels.

Avec toute ma reconnaissance,

Fatima

Je tiens à débiter en exprimant ma profonde reconnaissance envers mon Dieu, qui m'a guidé et soutenu tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Un grand merci à mes parents, mes sœurs et mon frère pour leur soutien indéfectible et leur amour inconditionnel qui ont été la force motrice derrière ce travail.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à mes chers amis Said, Younes, Amine, Koukou, Ana et Dalia pour leur amitié sincère, leur encouragement constant et leur présence précieuse qui ont illuminé mon parcours académique.

Enfin, un merci spécial à ma binôme Fatima pour sa collaboration efficace, son engagement exemplaire et sa contribution essentielle à la réalisation de ce mémoire.

Merci à vous tous pour avoir rendu cette aventure aussi enrichissante et mémorable.

Que cette réussite soit également la vôtre

Amine

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale	1
Chapitre 01 : Généralité sur l'énergie photovoltaïque	
1. Introduction	3
2. L'énergie photovoltaïque	3
2.1. Historique	3
2.2. Potentiel de l'énergie solaire en Algérie	4
2.3. Programme algérien des énergies renouvelables 22 GW à l'horizon 2030	5
3. Composants du rayonnement solaire	5
4. Cellule photovoltaïque	6
4.1. Les différentes générations de cellule photovoltaïque	7
4.2. Performance des différentes technologies des cellules	8
	9
5. Les différents systèmes photovoltaïques	9
5.1. Les systèmes autonomes	9
5.2. Les systèmes raccordés au réseau électrique	10
5.3. Les systèmes hybrides	11
6. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	12
6.1. Avantage des systèmes photovoltaïques	12
6.2. Inconvénients des systèmes photovoltaïques	12
7. Conclusion	13
Chapitre 02 : Modélisation et simulation du panneau photovoltaïque	
1. Introduction	14
2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	14
3. Assemblage des cellules	17
3.1. Association série	17
3.2. Association parallèle	17
3.3. Association série parallèle	18
4. Schémas bloc d'un générateur photovoltaïque	19
4.1. Influence de l'éclairement et de la température sur la cellule photovoltaïque	22
4.1.1. Influence de l'éclairement sur la cellule photovoltaïque	22
4.1.2. Influence de la température sur la cellule photovoltaïque	23

4.2. Influence des résistances R_{sh} et R_s sur les caractéristiques I-V et P-V	24
4.2.1. Influence de la résistance série R_s sur les caractéristiques I-V et P-V	24
4.2.2. Influence de la résistance shunt R_{sh} sur les caractéristiques I-V et P-V	25
5. Assemblage des générateurs photovoltaïque	25
5.1. Association en série	26
5.2. Association en parallèle	27
5.3. Association en série-parallèle (mixte)	29
6. L'ombrage	31
6.1. Définition de l'ombrage	31
6.2. Effet de l'ombrage sur les modules photovoltaïque	31
6.3. Simulation du système photovoltaïque sous ombrage	31
6.3.1. Simulation d'une configuration en série sous ombrage	33
6.3.2. Simulation d'une configuration en parallèle sous ombrage	33
6.3.3. Simulation d'une configuration en série-parallèle sous ombrage	34
7. Conclusion	35
Chapitre 03 : Commande MPPT d'un générateur photovoltaïque	
1. Introduction	36
2. Chaîne de conversion d'un système photovoltaïque contrôlé par une commande MPPT	36
3. Schéma bloqué d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT	37
3.1. Convertisseurs DC/DC	38
3.1.1. Convertisseur survolteur (Boost)	38
3.1.2. Principe de fonctionnement	39
3.1.3. Les avantages du convertisseur boost	40
3.2. Commande MPPT	41
3.2.1. L'algorithme "Perturbation et Observation" (P&O)	41
3.2.2. Algorithmes MPPT et suivi de référence	44

3.2.3. Simulation d'une configuration en parallèle des panneaux photovoltaïques sous effet d'ombrage en utilisant la commande MPPT (P&O)	46
4. Conclusion	48
Conclusion générale	49
Bibliographie	50

Liste des figures

Figure 1.1. Objectif du programme algérien des énergies renouvelables 22 GW à l'horizon 2030	5
Figure 1.2. Composant du rayonnement solaire	6
Figure 1.3. Principe de la conversion photovoltaïque	7
Figure 1.4. Les cellules de première génération	7
Figure 1.5. Cellule de deuxième génération	8
Figure 1.6. Système photovoltaïque autonome avec stockage batterie	10
Figure 1.7. Les systèmes raccordés au réseau électrique	11
Figure 1.8. Système hybride	12
Figure 2.1. Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque.	15
Figure 2.2. Caractéristiques (I_{pv} V_{pv}) d'un groupement de (N_s) cellules en séries	17
Figure 2.3. Caractéristiques (I_{pv} V_{pv}) d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle	18
Figure 2.4. Caractéristiques (I_{pv} V_{pv}) d'un groupement mixte de quatre cellules	19
Figure 2.5. Schémas bloc d'un générateur photovoltaïque	20
Figure 2.6. La caractéristique P(V) et I(V) d'un générateur photovoltaïque sous les conditions standard ($G=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$)	21
Figure 2.7. La caractéristique P(V) et I(V) pour différent éclairment et température constante $25^\circ C$	22
Figure 2.8. La caractéristique P(V) et I(V) pour différent température et éclairment constante $1000W/m^2$	23
Figure 2.9. Influence de la résistance série sur la caractéristique P-V et I-V	24
Figure 2.10. Influence de la résistance shunt sur la caractéristique P-V et I-V	25
Figure 2.11. Schéma bloc de deux panneaux solaires connectés en série	26
Figure 2.12. Schéma bloc de trois panneaux solaires connectés en série	26
Figure 2.13. La caractéristique P(V) et I(V) de deux et trois GPV connecté en série sous les conditions standard ($G=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$)	27
Figure 2.14. Schéma bloque de deux panneaux solaires connectés en parallèle	28
Figure 2.15. Schéma bloque de trois panneaux solaires connectés en parallèle	28
Figure 2.16. La caractéristique P(V) et I(V) de deux et trois modules photovoltaïques connecté en parallèle sous les conditions standard ($G=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$)	29

Figure 2.17. Schéma bloqué de trois panneaux solaires connectés en série parallèle	30
Figure 2.18. La caractéristique P(V) et I(V) de deux et trois GPV connecté en série- parallèle sous les conditions standard (G=1000W/m ² et T=25°C)	30
Figure 2.19. La caractéristique P(V) et I(V) de trois panneaux photovoltaïques connectés en série sous ombrage	32
Figure 2.20. La caractéristique P(V) et I(V) de trois panneaux photovoltaïques connectés en parallèle sous ombrage	33
Figure 2.21. La caractéristique P(V) et I(V) de trois panneaux photovoltaïques connectés en série- parallèle sous ombrage	34
Figure 3.1. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT	37
Figure 3.2. Schémas bloc d'un générateur photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT	37
Figure 3.3. Convertisseur élévateur (Boost)	38
Figure 3.4. Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau solaire	42
Figure 3.5. Organigramme de l'algorithme P&O	42
Figure 3.6. Caractéristique de puissance, tension et courant en fonction de temps	43
Figure 3.7. Caractéristique de puissance en fonction de temps à éclairement variable	43
Figure 3.8. Principe de l'algorithme P&O avec suivi de référence	44
Figure 3.9. Organigramme de l'algorithme P&O en suivi de référence	45
Figure 3.10. Caractéristique de puissance en fonction de temps d'un panneau photovoltaïque avec l'algorithme P&O	46
Figure 3.11. <i>Caractéristique de puissance sous effet d'ombrage d'un assemblage en parallèle de deux panneaux contrôlé par l'algorithme P&O</i>	47

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Potentiel solaire en Algérie	4
Tableau 1.2. Avantages et inconvénients des différentes technologies des cellules	9
Tableau 2.1. Caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque dans les conditions standards	19
Tableau 2.2. Les conditions variables des trois générateurs photovoltaïques	32

Introduction générale

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable, non polluante et inépuisable, dont l'exploitation minimise les impacts écologiques. Elle est au cœur des recherches pour répondre aux besoins énergétiques futurs. Comme tout système industriel, un système photovoltaïque doit fonctionner efficacement malgré les variations climatiques. Pour y parvenir, différentes méthodes ont été mises en œuvre pour identifier le point de puissance maximale (MPP). [1]

Pour optimiser cette conversion, la commande du Point de Puissance Maximale (MPPT) joue un rôle essentiel. En ajustant en temps réel les paramètres de fonctionnement des panneaux solaires, le MPPT permet de maximiser l'efficacité de la conversion énergétique, même face aux variations de l'ensoleillement. Grâce à des algorithmes sophistiqués de recherche du point de puissance maximale, cette technologie garantit non seulement une performance optimale des systèmes photovoltaïques, mais contribue également à renforcer la stabilité opérationnelle des réseaux électriques.

L'intégration du MPPT dans les générateurs photovoltaïques représente ainsi une avancée majeure vers une utilisation plus efficace et économique de l'énergie solaire, jouant un rôle crucial dans la construction d'une économie énergétique mondiale durable et résiliente.

Ce mémoire présente une étude approfondie portant sur la modélisation et la simulation de la technique Perturb and Observe (P&O) appliquée à un système photovoltaïque (PV). Ce système est équipé d'un hacheur boost dont l'objectif est d'optimiser la puissance extraite du générateur photovoltaïque (GPV). La commande numérique MPPT, utilisant la méthode P&O, est développée pour assurer une efficacité maximale de conversion d'énergie. Le dispositif est étudié en présence d'une charge résistive, mettant en lumière les performances et l'adaptabilité de cette approche dans le contexte des applications réelles des technologies photovoltaïques.

Pour structurer ce mémoire, il est divisé en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons parlé sur les généralités l'énergie photovoltaïque.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons procédé à la modélisation d'un générateur photovoltaïque. Nous avons étudié en détail les caractéristiques des panneaux solaires, ainsi que l'influence de variables telles que l'éclairement solaire, la température sur la performance des cellules photovoltaïques. Nous avons également exploré l'assemblage des panneaux photovoltaïques. Pour valider nos modèles et nos analyses, nous avons utilisé MATLAB Simulink pour simuler différents systèmes photovoltaïques. Ces simulations ont été réalisées dans des configurations variées, incluant les conditions

standards ainsi que des scénarios d'ombrage, afin d'évaluer l'efficacité et la robustesse du système dans des conditions réelles et diversifiées.

- Dans le troisième chapitre, nous avons abordé la commande MPPT en utilisant l'algorithme Perturb and Observe (P&O) avec un suivi de référence. Nous avons examiné en détail le rôle et le fonctionnement du convertisseur élévateur (boost) dans le contexte de l'optimisation de la puissance photovoltaïque. De plus, nous avons réalisé l'implémentation pratique de l'algorithme P&O dans le système photovoltaïque étudié. Pour valider notre approche, nous avons effectué des simulations à l'aide de MATLAB Simulink, permettant ainsi d'évaluer la performance et l'efficacité du système MPPT sous diverses conditions et configurations.
- A la fin, nous avons conclu ce mémoire par une synthèse générale des résultats obtenus tout au long de l'étude.

Chapitre 01 : Généralité sur l'énergie photovoltaïque

1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque représente un pilier essentiel dans la transition mondiale vers des sources d'énergie durables et renouvelables.

Ce chapitre explore des généralités de cette technologie innovante, en commençant par une définition claire et concise de l'énergie photovoltaïque, suivie de son évolution historique.

Nous examinerons également le potentiel considérable de l'énergie solaire en Algérie, en mettant en lumière le programme des énergies renouvelables qui vise à atteindre 22 GW d'ici 2030. Les composants du rayonnement solaire seront détaillés pour comprendre la capture et la conversion de l'énergie solaire. De plus, nous expliquerons le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et passerons en revue les différentes générations de ces technologies, en discutant leurs avantages et inconvénients. Nous aborderons aussi les différents types de systèmes photovoltaïques (autonomes, raccordés au réseau, et hybrides).

Enfin, le chapitre se conclut par une évaluation des avantages et des inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

2. L'énergie photovoltaïque

Le mot photovoltaïque vient de la Grèce « photo » qui signifie lumière et de « volta » relatif au nom du physicien italien Alessandro Volta qui découvrit en 1800 la pile électrique. Mais c'est le français Antoine Becquerel qui fût le premier à mettre en évidence en 1839 la conversion photovoltaïque de l'énergie à travers sa découverte de la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière

L'énergie photovoltaïque est la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

[1]

2.1. Historique

En 1839, Alexandre Edmond Becquerel découvrit l'effet photovoltaïque, mettant en évidence la conversion directe de la lumière en énergie électrique. À l'époque, cette découverte ne trouva pas d'application pratique, car les appareils électriques n'étaient pas encore disponibles.

Chapitre 01 : Généralité sur l'énergie photovoltaïque

En 1905, Albert Einstein avança l'idée que la lumière pouvait pénétrer à l'intérieur des atomes, entraînant la libération d'électrons de leurs orbites lors de collisions avec les photons, ce qui permettrait la génération d'un courant électrique. Ce n'est qu'au XX^{ème} siècle, aux États-Unis, que les recherches et les avancées dans le domaine de l'énergie solaire commencent à prendre de l'ampleur.

En 1954, les laboratoires de Bell Téléphone réussirent à mettre au point la première cellule photovoltaïque présentant un rendement acceptable, d'environ 6%.

Par la suite, le rendement des cellules photovoltaïques a été amélioré grâce à la découverte que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des impuretés, atteignant ainsi un rendement de 15% au début des années 1960. Pendant la course vers l'espace, les cellules solaires ont connu des avancées significatives, devenant une solution idéale pour répondre aux besoins énergétiques des satellites.

En 1973, suite au choc pétrolier, l'énergie solaire a connu une croissance notable. Dans les années 1990, la prise de conscience des limites de l'électrification rurale conventionnelle, notamment le coût du déploiement des réseaux câblés, a conduit à une ouverture des marchés du photovoltaïque pour une distribution plus rentable dans les zones rurales. [2]

2.2. Potentiel de l'énergie solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un gisement solaire des plus élevés au monde, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m² /an au nord et 2263 kWh/m² /an au sud du pays (tableau 1.1). [3]

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau 1.1. Potentiel solaire en Algérie

2.3. Programme algérien des énergies renouvelables 22 GW à l'horizon 2030

Le programme algérien des énergies renouvelables de 22 GW à l'horizon 2030 a pour objectifs de diversifier le mix énergétique du pays, de réduire sa dépendance aux hydrocarbures et de promouvoir le développement durable en mettant l'accent sur les énergies renouvelables.

La figure 1.1 présente la répartition des 22 GW prévus : le solaire photovoltaïque domine avec 13 575 MW, exploitant le fort potentiel solaire du pays. L'éolien suit avec 5 010 MW, tirant parti des zones venteuses. Le solaire thermique ajouté 2 000 MW en utilisant la chaleur solaire pour produire de l'énergie. La biomasse, intégrant des sources biologiques renouvelables, contribue à hauteur de 1 000 MW. La cogénération, qui combine production de chaleur et d'électricité, apporte 400 MW, tandis que la géothermie, exploitant la chaleur terrestre, complète avec 15 MW. Cette répartition souligne une stratégie diversifiée pour répondre de manière durable aux besoins énergétiques de l'Algérie. [4]

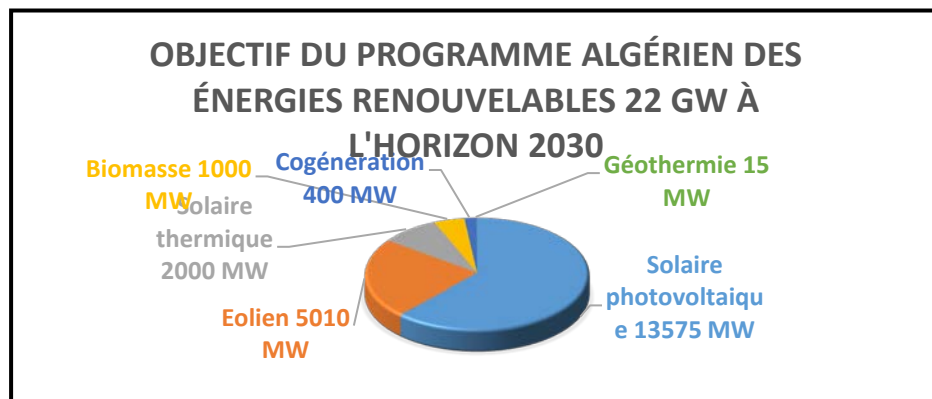


Figure 1.1. Objectif du programme algérien des énergies renouvelables 22 GW à l'horizon 2030

3. Composants du rayonnement solaire [5]

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. On distingue plusieurs composantes illustrées dans la figure 1.2 [5] :

a) Rayonnement direct : Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. [5]

b) Rayonnement diffus : Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère. Il est évalué à l'aide d'un instrument nommé "pyranomètre", équipé d'un pare-soleil (un anneau métallique qui occulte le disque solaire). Ce rayonnement provient de la voûte

céleste, à l'exception du disque solaire lui-même. Il représente la partie du rayonnement solaire diffusée par les particules liquides ou solides en suspension dans l'atmosphère. [5]

c) **Albédo** : L'albédo est la partie réfléchi par le sol. [5]

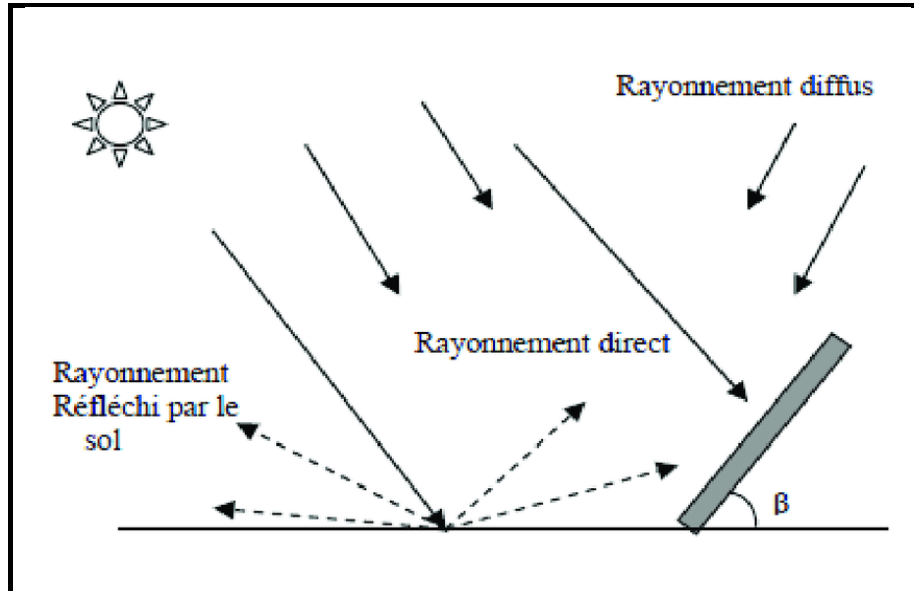


Figure 1.2. Composant du rayonnement solaire

4. Cellule photovoltaïque

L'élément fondamental de la technologie photovoltaïque est la cellule. La cellule photovoltaïque se compose de deux couches de matériaux semi-conducteurs, généralement le silicium.

Pour obtenir un courant électrique il faut créer un déficit d'électrons d'un côté et un surplus d'électron de l'autre. Pour cela on injecte des atomes de phosphore dans la couche supérieure, elle devient de type « n » parce qu'elle est excédentaire en électrons. Et sur la couche inférieure de silicium des atomes de Bore seront injectés, elle devient de types « p » parce qu'elle est déficitaire en électrons. On se retrouve dans une configuration de pile, une borne négative d'un côté qui représente un surplus d'électrons, et de l'autre une borne positive à laquelle elle manque des électrons.

Il suffit ensuite, de relier ces deux bornes par un fils conducteur et de placer une charge, et dès que le panneau est éclairé les électrons et les trous se déplacent naturellement de chaque côté de la jonction, ce qui engendre la formation d'une zone de charge, un champ électrique se crée au voisinage de cette jonction. Le courant passe et au passage il alimente la charge. [6]

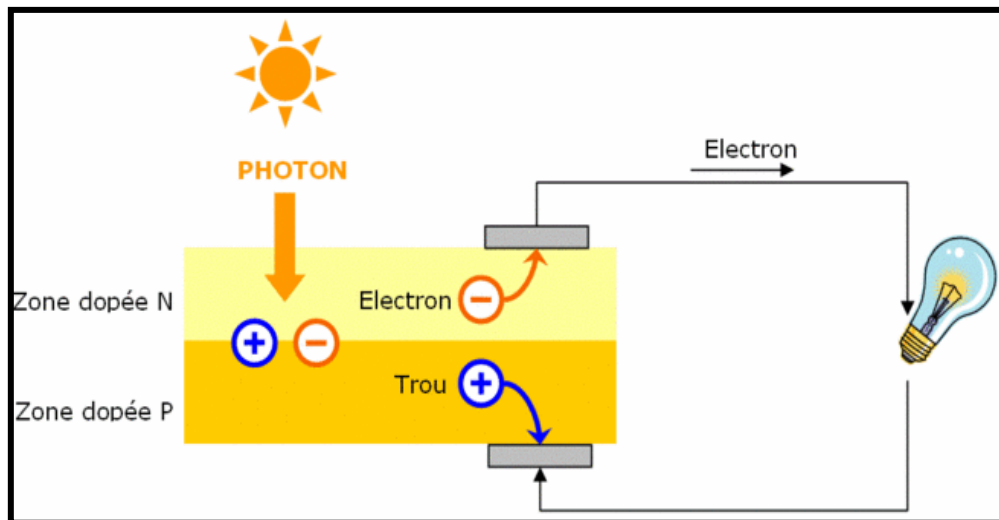


Figure 1.3. Principe de la conversion photovoltaïque

4.1. Les générations de cellules photovoltaïques

On distingue généralement trois générations de cellule photovoltaïque :

a. Les cellules de première génération : cellules cristallines

Les cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin sont la première génération (figure 1.4). Elles sont basées sur une seule jonction p-n. Le silicium est fondu puis refroidi afin d'obtenir un cristal qui sera découpé en fines tranches (les wafers) pour obtenir la cellule photovoltaïque. Cette méthode de production est très coûteuse. Elle nécessite un silicium de grande pureté. On différencie les cellules en silicium monocristallin et en silicium polycristallin. [7]

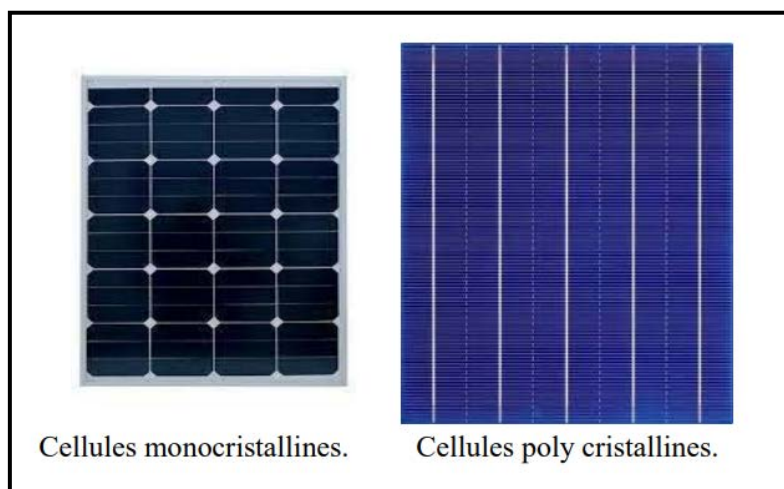
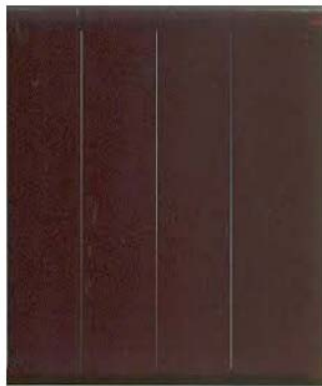


Figure 1.4. Les cellules de première génération

b. Les cellules de deuxième génération : couche mince

La deuxième génération constitue les cellules à base de couche mince (figure 1.5). Dans cette génération, on distingue le silicium amorphe et le tellure de cadmium (CdTe).

Dans le cas de couche mince, la couche de semi-conducteur est déposée sur un substrat de verre ou de plastique. Ces cellules sont moins coûteuses que celles de première génération puisqu'elles ont moins de matériaux semi-conducteurs et ne nécessitent pas la transformation wafers. L'inconvénient de ces cellules de deuxième génération est leur faible rendement (entre 6 et 7% et 14% en laboratoire). [7]



Cellules couche Amorphe

Figure 1.5. Cellule de deuxième génération

c. Les cellules de troisième génération : multi jonction

Les cellules de troisième génération sont des technologies en développement qui cherchent à dépasser les limitations des cellules solaires traditionnelles en silicium. Les cellules à multi jonction peuvent atteindre un rendement de 40% ou plus en laboratoire. [7]

4.2. Performance des différentes technologies des cellules

Le tableau 1.2 présente une comparaison des performances des technologies courantes des cellules, en examinant leurs avantages et inconvénients respectifs. Cette analyse permet de mieux comprendre les forces et les limitations de chaque technologie, fournissant ainsi des informations cruciales pour le développement et l'optimisation des applications dans divers domaines. [7]

Chapitre 01 : Généralité sur l'énergie photovoltaïque

Technologie de cellule	Avantage	Inconvénient
Monocristalline	<ul style="list-style-type: none">- Un bon rendement (16 à 19%).- Durée de vie intéressante	<ul style="list-style-type: none">- coût très élevé
Poly cristallin	<ul style="list-style-type: none">- Un bon rendement- Durée de vie intéressante.- Coût moins élevé que le monocristallin	<ul style="list-style-type: none">- Rendement faible pour éclairage limité.
Amorphe	<ul style="list-style-type: none">- Faible coût- Peu sensible aux températures élevées- Econome en matériau	<ul style="list-style-type: none">- Rendement faible (5 à 7%)
Cadmium de tellure (CDTE)	<ul style="list-style-type: none">- Econome en matériau- Peu sensible aux températures fortes	<ul style="list-style-type: none">- Matériau toxique.- Rendement faible (8 à 11%)

Tableau 1.2. *Avantages et inconvénients des différentes technologies des cellules.*

5. Les différents systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques peuvent être classés selon trois principales configurations [8] :

5.1. Les systèmes autonomes

Les systèmes autonomes fonctionnent exclusivement avec l'énergie solaire. Ils peuvent être composés des générateurs photovoltaïques et d'une charge seule, ou ils peuvent inclure des batteries pour stocker l'énergie. Lorsque des batteries sont utilisées, des régulateurs de charge sont intégrés pour éteindre les modules solaires une fois les batteries pleinement chargées, et ils peuvent également couper la charge pour éviter la décharge excessive des batteries. Les batteries doivent avoir une capacité suffisante pour stocker l'énergie produite pendant la journée, permettant ainsi une utilisation nocturne et lors de conditions météorologiques défavorables. [8]

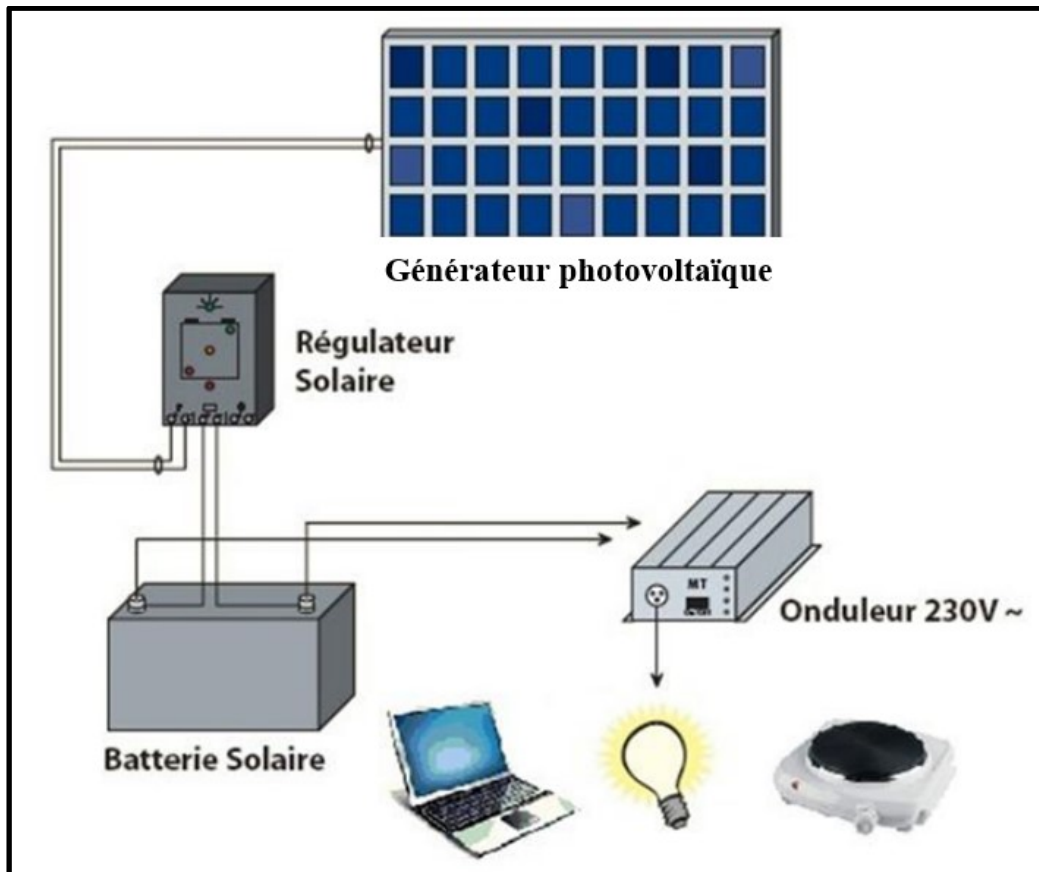


Figure 1.6. *Système photovoltaïque autonome avec stockage batterie*

5.2. Les systèmes raccordés au réseau électrique

On peut classer ces systèmes en trois catégories principales [8] :

1. Les systèmes attachés à des bâtiments consommant de l'électricité, qu'ils soient à usage résidentiel (habitat collectif social ou privé) ou professionnel (bureaux, commerces, équipements publics, industrie, agriculture,...etc). Les panneaux solaires peuvent être installés sur le toit sans nécessiter de modification de la structure (toit en pente ou toiture-terrasse) ou intégrés dans la construction pour une double fonction (clos et couvert, bardage, verrière, garde-corps,...etc). Leur taille varie de quelques dizaines à quelques milliers de mètres carrés, ce qui correspond à des puissances allant de quelques kilowatts-crêtes à plusieurs mégawatts-crêtes.

2. Les systèmes installés sur des structures qui ne consomment pas d'électricité par elles-mêmes, mais pour lesquelles les panneaux solaires remplissent une fonction supplémentaire en plus de la production d'électricité (couverture de passage public ou de quai de gare, mur antibruit,...etc.). Leur taille générale va de quelques centaines à quelques milliers de mètres carrés, avec des puissances allant de quelques dizaines à quelques centaines de kilowatts-crêtes.

3. Les parcs photovoltaïques au sol, constitués de grandes quantités des générateurs photovoltaïques installés sur des structures porteuses, destinés exclusivement à l'alimentation directe du réseau électrique. Leur surface peut atteindre plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés, correspondant à des puissances de quelques centaines de kilowatts à plusieurs dizaines de mégawatts.

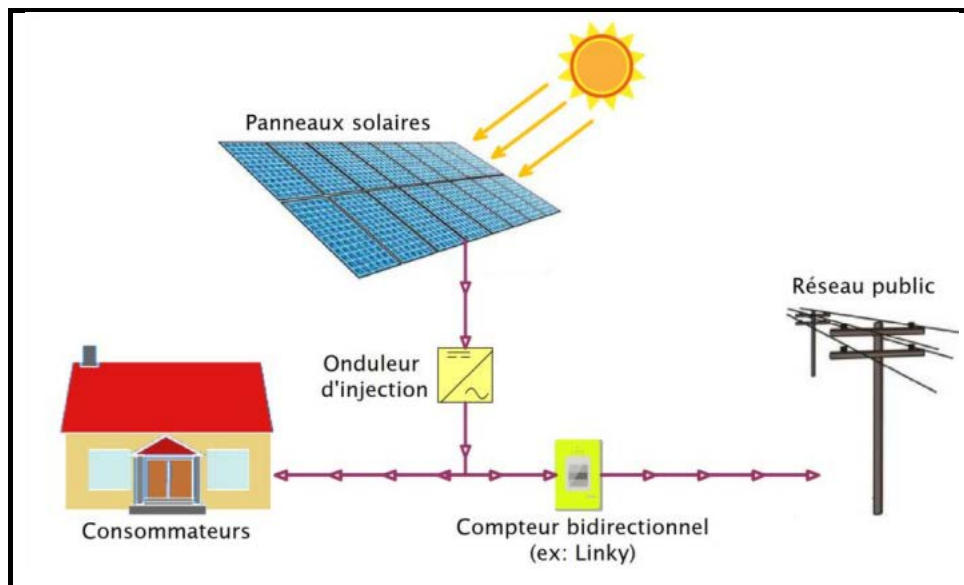


Figure 1.7. Les systèmes raccordés au réseau électrique.

5.3. Les systèmes hybrides

Un système hybride est un système qui fait intervenir au moins deux sources d'énergie renouvelable comme un panneau solaire, une éolienne, une pompe hydraulique,...

Souvent, ces sources renouvelables sont associées à une source conventionnelle comme un générateur diesel, nécessaire pour délivrer une puissance en continue. En plus des sources d'énergies renouvelables, les systèmes hybrides associent des dispositifs de stockage comme les batteries, les supercondensateurs, les piles à combustible, ... [8]

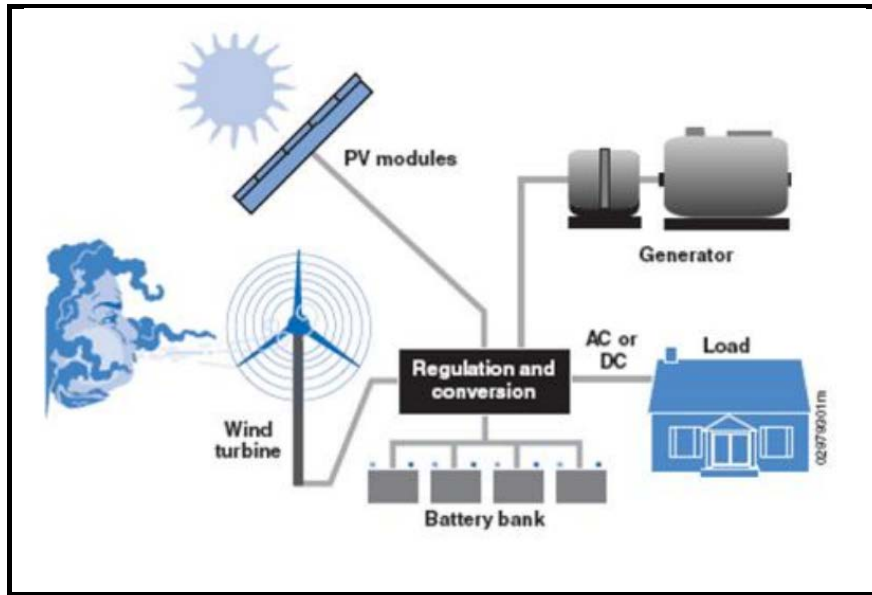


Figure 1.8. *Système hybride*

6. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

Comme toute autre énergie, l'énergie solaire photovoltaïque a ses avantages comme elle a ses inconvénients [9] :

6.1. Avantage des systèmes photovoltaïques

- Elle fournit de l'électricité grâce à l'énergie gratuite et renouvelable du soleil.
- Elle fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.
- Elle peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments.
- Elle est silencieuse et non polluante.
- Elle est un moyen fiable qui requiert peu d'entretien.
- Les générateurs photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés.

6.2. Inconvénients des systèmes photovoltaïques

- Le prix élevé des générateurs solaires, car leurs fabrications relèvent de la haute technologie.
- L'intensité d'irradiation du rayonnement solaire est changeante et flottante.
- Le rendement de la cellule est relativement bas.

7. conclusion

Ce chapitre a fourni une vue d'ensemble complète de l'énergie solaire photovoltaïque, commençant par une définition et un historique de cette technologie. Nous avons exploré le potentiel considérable de l'énergie solaire en Algérie, ainsi que le programme ambitieux des énergies renouvelables de 22 GW à l'horizon 2030.

Nous avons ensuite analysé les composants du rayonnement solaire et expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques. Les différentes générations de cellules photovoltaïques ont été discutées, en mettant en lumière leurs avantages et inconvénients respectifs. Enfin, nous avons examiné les divers systèmes photovoltaïques disponibles : autonomes, raccordés au réseau et hybrides.

L'énergie photovoltaïque offre de nombreux avantages, tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la diminution de la dépendance aux combustibles fossiles. Cependant, elle présente aussi des inconvénients, notamment le coût initial élevé et les défis liés au stockage de l'énergie. L'énergie photovoltaïque représente une solution prometteuse pour un avenir énergétique plus durable, malgré les défis qui subsistent.

Chapitre 02 : Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons en détail la modélisation et la simulation des systèmes photovoltaïques. Nous commençons par la modélisation d'une cellule photovoltaïque à une seule diode, une approche fondamentale pour comprendre le comportement de base de ces dispositifs. Ensuite, nous abordons l'assemblage des cellules photovoltaïques, en discutant des configurations en série, en parallèle et mixtes, et leur impact sur le fonctionnement global du système.

Nous présentons ensuite le schéma bloc d'un générateur photovoltaïque, en mettant en lumière l'influence de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques puissance-tension (P-V) et courant-tension (I-V) d'un générateur photovoltaïque. Nous examinons également l'impact des résistances série et parallèle sur ces caractéristiques, offrant ainsi une compréhension complète des différents facteurs qui affectent la performance des systèmes photovoltaïques.

Un accent particulier est mis sur les différentes configurations d'assemblage des générateurs photovoltaïques (série, parallèle, mixte) et leur simulation sous conditions standard, permettant de comparer les performances et d'identifier les configurations optimales. Enfin, nous analysons l'effet de l'ombrage sur les caractéristiques des systèmes photovoltaïques, un facteur crucial qui peut significativement influencer leur efficacité et leur fiabilité.

Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble exhaustive des techniques de modélisation et de simulation utilisées pour optimiser les systèmes photovoltaïques, tout en soulignant les défis et les solutions associées à leur mise en œuvre.

2. Modélisation du générateur photovoltaïque

La modélisation d'un générateur photovoltaïque est l'étude du comportement électrique d'une cellule à travers son schéma équivalent. Il existe plusieurs modèles de générateur photovoltaïque, ils se différencient entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de courant et de tension de générateur photovoltaïque. [7] [8]

Le modèle à une diode se caractérise par son schéma équivalent représenté sur la figure (2.1). Il se compose d'une source de courant représentant la conversion du flux lumineux en énergie électrique, d'une résistance shunt R_{sh} caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule due au non idéalité de la jonction PN et des impuretés près de la jonction, et une résistance série R_s qui représente les pertes homiques à l'intérieur de la cellule dues aux contacts

Chapitre 02 : Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

et aux connexions internes. Ces résistances auront une influence sur la caractéristique (I_{pv}, V_{pv}) du générateur photovoltaïque. [7] [8]

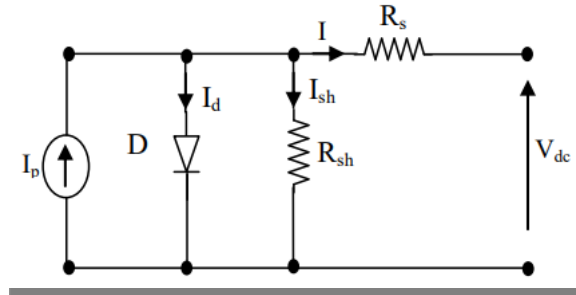


Figure 2.1. Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque.

On peut écrire la loi suivante à partir la loi des nœuds

- Le courant de jonction I_p est donné par :

$$I_p = I + I_d + I_{sh} \quad (1)$$

- Le courant de jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (2)$$

- Le courant dans la résistance R_{sh} est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (3)$$

A partir de l'équation (1), on obtient l'expression de courant I :

En remplaçant dans l'équation (4) I_d et I_{sh} par leurs expressions dans (2) et (3) on obtient :

$$I = I_p - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (4)$$

Avec :

I : Le courant de cellule [A].

V : La tension de cellule [V].

I_p : Le photo-courant de la cellule [A].

Chapitre 02 : Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

R_s : La résistance série de la cellule [Ω].

R_{sh} : La résistance shunt de la cellule [Ω].

T : La température de la cellule [$^{\circ}\text{K}$].

q : La charge de l'électron $e = 1.6 * 10^{-19}\text{C}$.

I_0 : Le courant de saturation [A].

K : Constante de Boltzmann ($1.38 * 10^{-23}\text{J}/^{\circ}\text{K}$).

n : Le facteur de non idéalité de la diode.

I_{cc} : Intensité de court-circuit.

V_{co} : Tension de circuit ouvert

- Courant de court-circuit

Lorsqu'on court-circuite les bornes de circuit, la tension de sortie est nulle et le courant de court-circuit sera à son maximum. Il est donné par l'équation suivante :

$$I_{cc} = \frac{I_p}{\left(1 - \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (5)$$

- Tension de circuit ouvert

La tension de circuit ouvert est la tension pour laquelle le courant de sortie est nul. C'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge.

$$I_p - I_0 \left(e^{\frac{qV_{co}}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} = 0$$
$$V_{co} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_p}{I_0} + 1\right) \quad (6)$$

- Facteur de forme

Le facteur de forme c'est le facteur de remplissage, Il représente la puissance que peut fournir le module quand il est fermé sur sa charge optimale sous les conditions standard (éclairage 1000 W/m² et à une température de 25°C. C'est un paramètre très important, il représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance $I_{cc} * V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur est grande, plus la puissance utilisable ne le sera également. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \left(\frac{I_{pm} V_{pm}}{I_{cc} V_{co}} \right) \quad (7)$$

- Rendement Le rendement (η), des cellules PV

Le rendement η des cellules PV c'est le rendement en puissance. C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} . Il peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Il est très essentiel seule la connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule. Il est donné par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF * V_{co} * V_{PM}}{P_{in}} \quad (8)$$

3. Assemblage des cellules photovoltaïques

3.1. Association série

L'association série des cellules photovoltaïque nous permet d'augmenter la tension tandis que le courant reste le même que celui d'une seule cellule. [10]

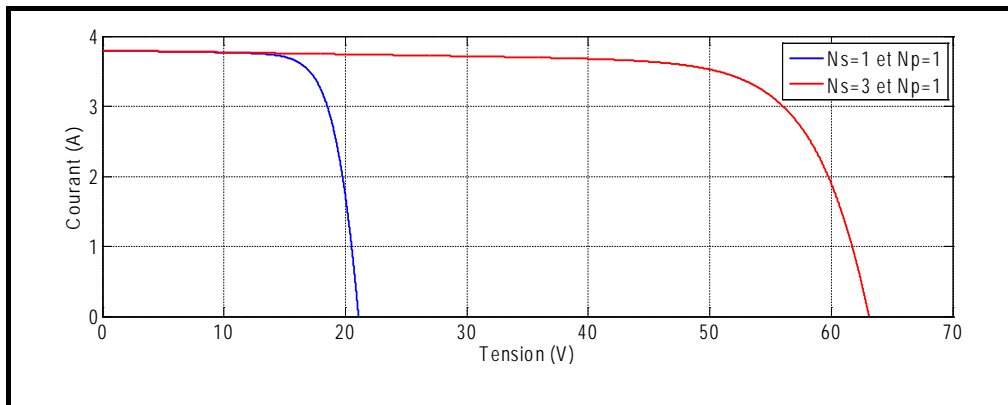


Figure 2.2. Caractéristiques (I_{pv} V_{pv}) d'un groupement de (N_s) cellules en séries

La figure (2.2) montre clairement que la mise en série des cellules photovoltaïque entraîne une augmentation de la tension globale du générateur photovoltaïque tandis que le courant de court-circuit reste le même.

3.2. Association parallèle

La mise en parallèle des cellules permet d'accroître le courant de sortie de générateur, et dans ce cas les cellules sont soumises à une seule tension.[10]

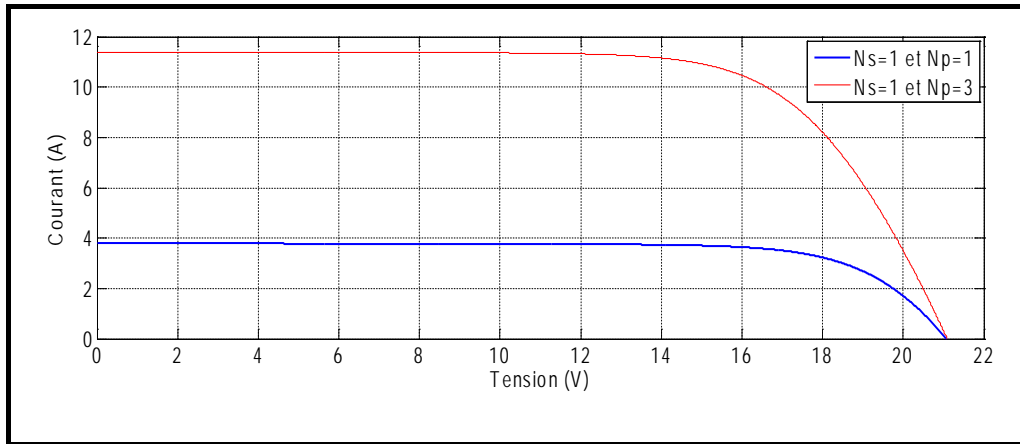


Figure 2.3. Caractéristiques (I_{pv}, V_{pv}) d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle.

La figure (2.3) illustre que la mise en parallèle des cellules photovoltaïques permet d'augmenter le courant de court-circuit tandis que la tension globale reste la même.

3.3. Association série parallèle (mixte)

La caractéristique (I_{pv}, V_{pv}) d'un générateur photovoltaïque peut être considérée comme le résultat d'une association d'un réseau de $(N_s * N_p)$ cellules en série /parallèle. Elle peut être variée en fonction de l'éclairement, température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou l'inhomogénéité de l'éclairement.

Une dégradation d'une cellule mise en série peut provoquer une énorme diminution de courant produit par la cellule faiblement éclairée, et sa tension devient négative donc elle devient un élément récepteur, si ce défaut reste longtemps, il peut aboutir à sa destruction. C'est le phénomène de point chaud. Pour éviter ce problème, on utilise des diodes by-pass qui vont protéger les cellules qui devient passives. [10]

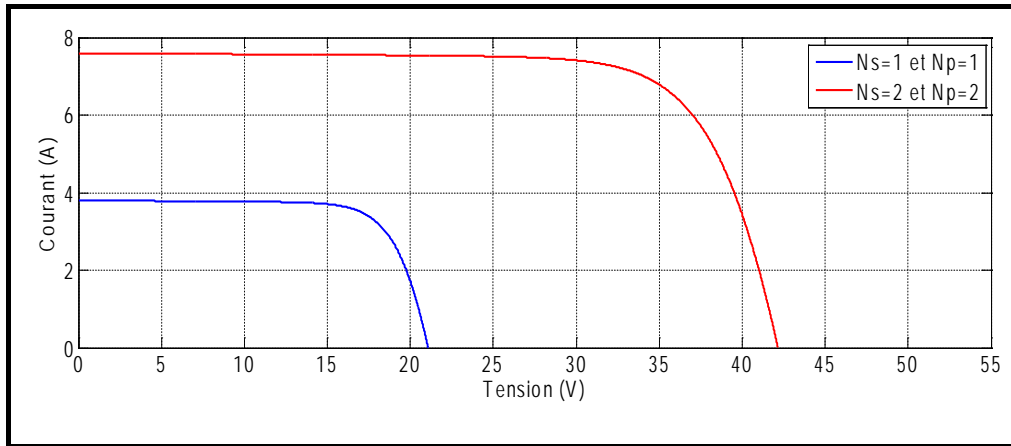


Figure 2.4. Caractéristiques (I_{pv} , V_{pv}) d'un groupement mixte de quatre cellules

D'après la figure (2.4), on peut conclure que la configuration mixte des quatre cellules photovoltaïques permet d'augmenter simultanément le courant de court-circuit et la tension globale du générateur photovoltaïque. Cette configuration offre une amélioration significative des performances du module. Cela permet non seulement de maximiser la production d'énergie, mais aussi de répondre plus efficacement aux exigences spécifiques des applications photovoltaïques.

4. Schéma bloc d'un générateur photovoltaïque

L'étude est faite sur un générateur photovoltaïque dont les différentes caractéristiques sont obtenues sous les conditions standard $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$, elles sont résumées dans le tableau suivant :

Grandeur	Valeur
Eclairement	$1000\text{W}/\text{m}^2$
Température	$25+273^{\circ}\text{K}$
Puissance crête (max) P_m	59.35 W
Tension à P_m	17 V
Courant à P_m	3.491 A
Tension de circuit-ouvert	21.1 V
Courant de court-circuit	3.8 A

Chapitre 02 : Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

Nombre de cellule en série	36
Nombre de cellule en parallèle	2

Tableau 1. Caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque dans les conditions standards "CST"

La figure (2.5) illustre le schéma bloc d'un générateur photovoltaïque.

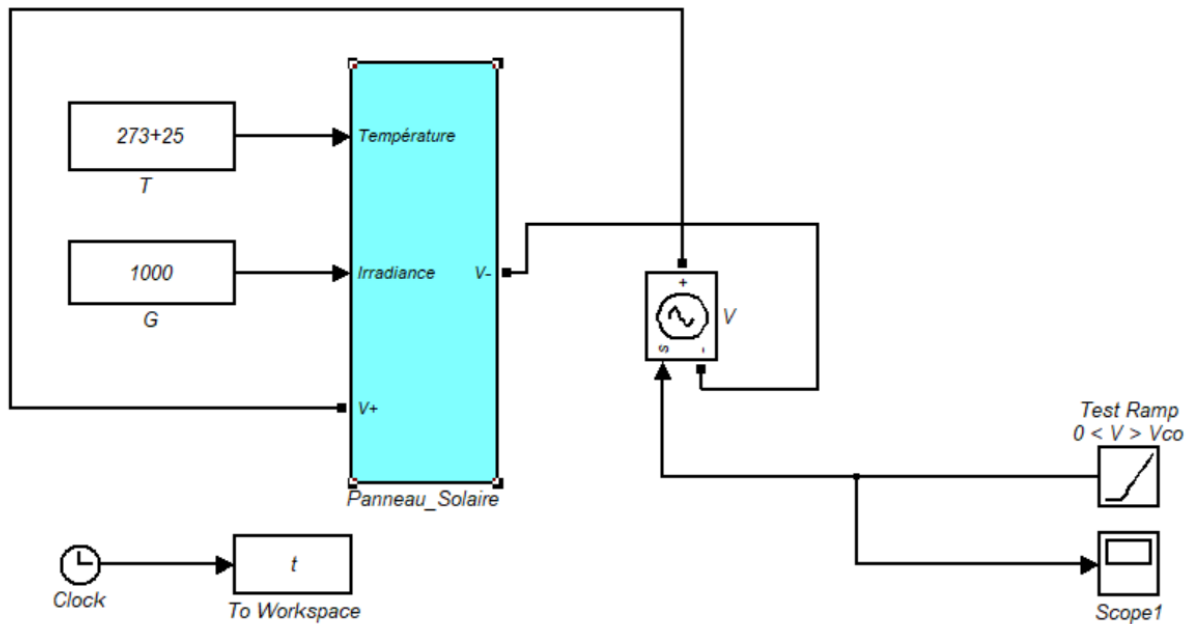


Figure 2.5. Schémas bloc d'un générateur photovoltaïque.

- **Simulation du module photovoltaïque**

La figure (2.6) illustre la caractéristique puissance-tension P(V) et la caractéristique courant-tension I(V) pour les mêmes conditions, une température de référence de 25°C et un éclairement de [1000W/m²] (condition standard) d'un générateur photovoltaïque.

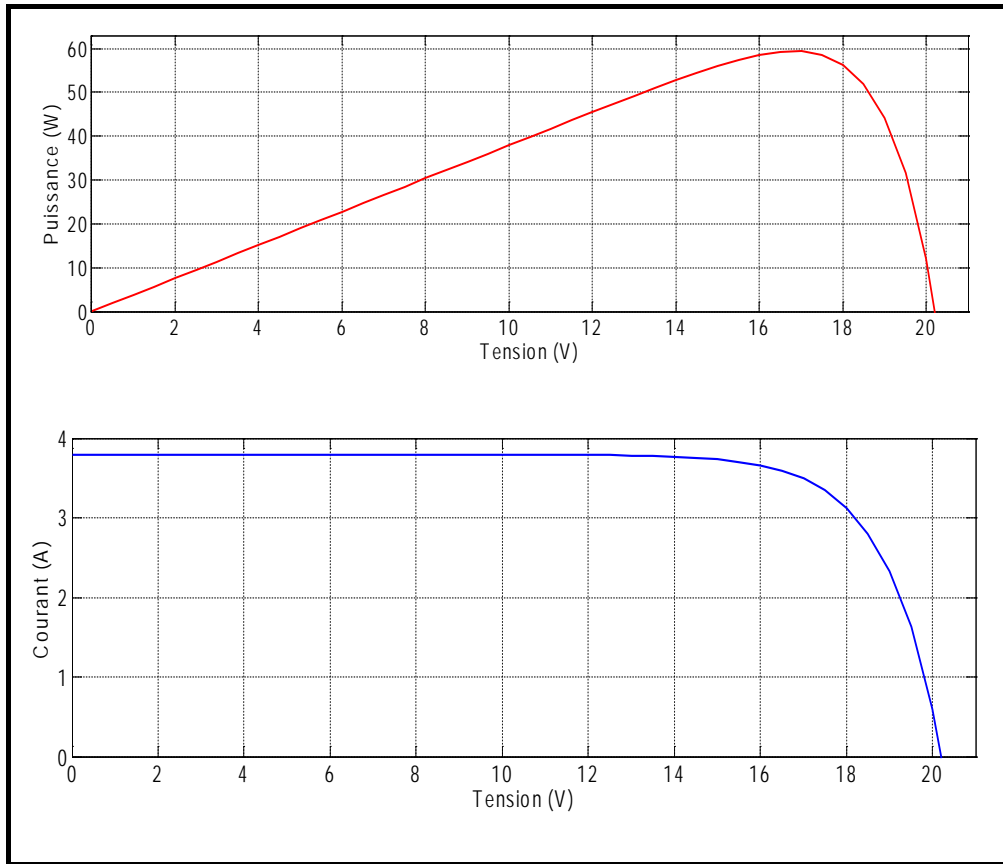


Figure 2.6. La caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque sous les conditions standard ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)

D'après les résultats de simulation de ce générateur photovoltaïque, on peut constater que la cellule photovoltaïque présente une caractéristique non linéaire. Elle évolue depuis le point de fonctionnement extrême représenté par le courant de court-circuit jusqu'à un autre point correspondant à la tension en circuit ouvert, en passant par le point de puissance maximale (PPM) souhaité. Aux deux points de fonctionnement, l'énergie électrique produite dans la cellule est nulle, contrairement à toutes les autres conditions où une augmentation de la tension engendre une augmentation de l'énergie produite.

Premièrement, elle atteint son maximum de puissance (PPM) puis diminue jusqu'à s'approcher de la tension de circuit-ouvert. Ensuite, on observe que la cellule photovoltaïque agit comme une source de courant constant dans sa partie horizontale et comme un générateur de tension constante dans sa partie verticale.

4.1. Influence de l'éclairement et de la température sur la cellule photovoltaïque

4.1.1. Influence de l'éclairement sur la cellule photovoltaïque

L'éclairement a une influence significative sur la cellule photovoltaïque ; notamment sur le photo-courant qui est proportionnel à l'éclairement. Tandis que le courant traversant la diode demeure constant malgré les variations de l'éclairement. La figure (2.7) représente les caractéristique P(V) et I(V) de la cellule photovoltaïque simulée à une température constante de [25°C] et sous différentes valeurs d'éclairement.

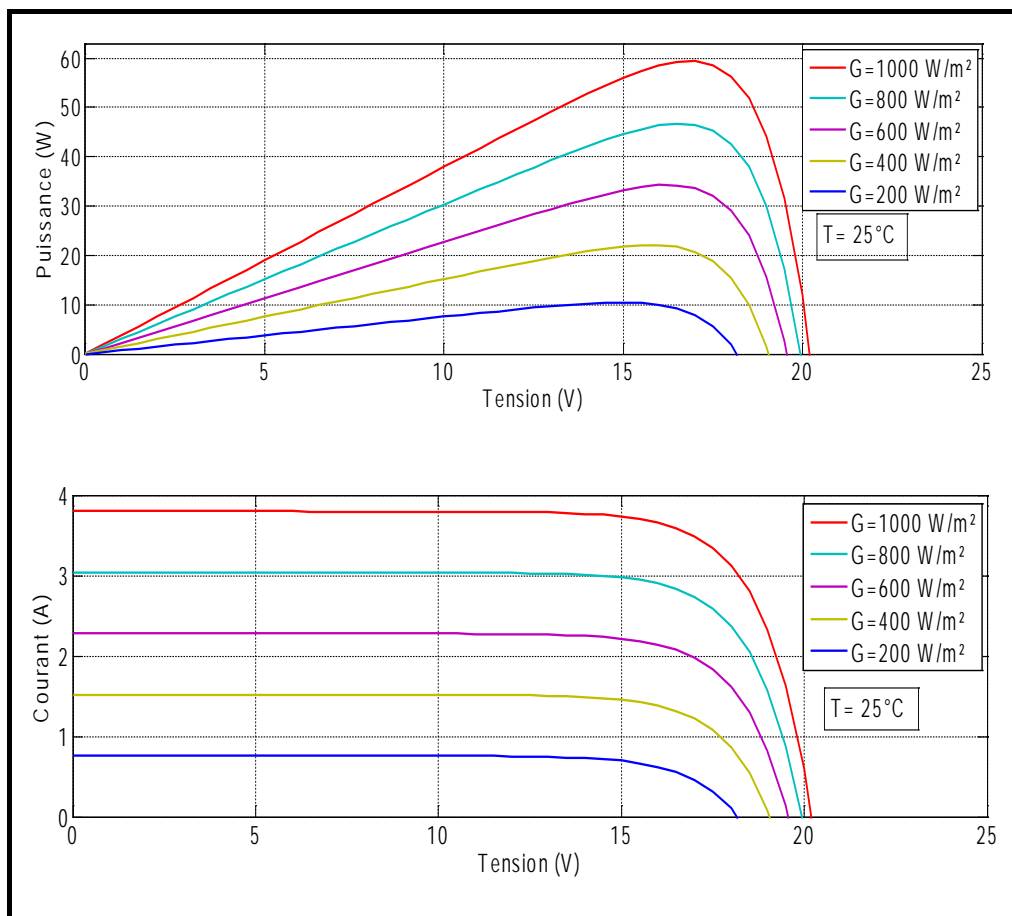


Figure 2.7. La caractéristique P(V) et I(V) pour différents éclairements et température constante 25°C

On remarque que lors de la variation de l'éclairement la tension de circuit-ouvert reste peu affectée. En revanche, le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement ce qui traduit l'accroissement de la puissance générée par le générateur photovoltaïque.

4.1.2. Influence de la température sur la cellule photovoltaïque

La température joue aussi un rôle crucial dans le fonctionnement de la cellule photovoltaïque. La figure (2.8) représente les caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ de la cellule photovoltaïque simulé à une température variable et sous un éclairement constant [$1000\text{W}/\text{m}^2$]

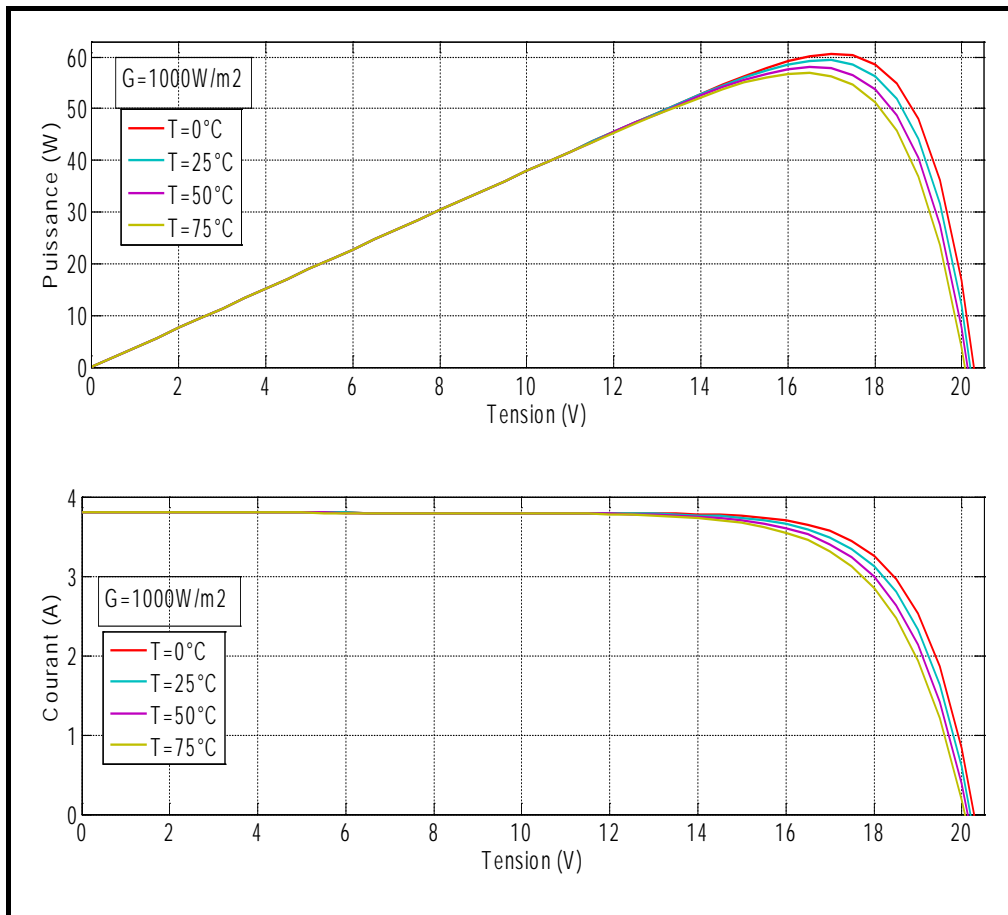


Figure 2.8. La caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ pour différente température et éclairement constante $1000\text{W}/\text{m}^2$

On remarque que le courant de court-circuit reste peu affecté, mais la tension de circuit-ouvert diminue en augmentant la température, ce qui implique la diminution de la puissance du panneau photovoltaïque.

4.2. Influence des résistances R_{sh} et R_s sur les caractéristiques I-V et P-V

4.2.1. Influence de la résistance R_s sur les caractéristique I-V et P-V

La résistance série R_s caractérise les pertes dues à l'effet Joule de la résistance spécifique du semi-conducteur et les pertes à travers la grille de collecte et les contacts homiques mobiles de la cellule.

Les contacts des électrodes semi-conductrices à haute résistance réduisent considérablement la tension et le courant, ce qui limite les performances des cellules.

Le but de cette simulation est de montrer le comportement d'un générateur PV lorsque R_s change.

Les résultats de cette simulation sont donnés par la figure suivante :

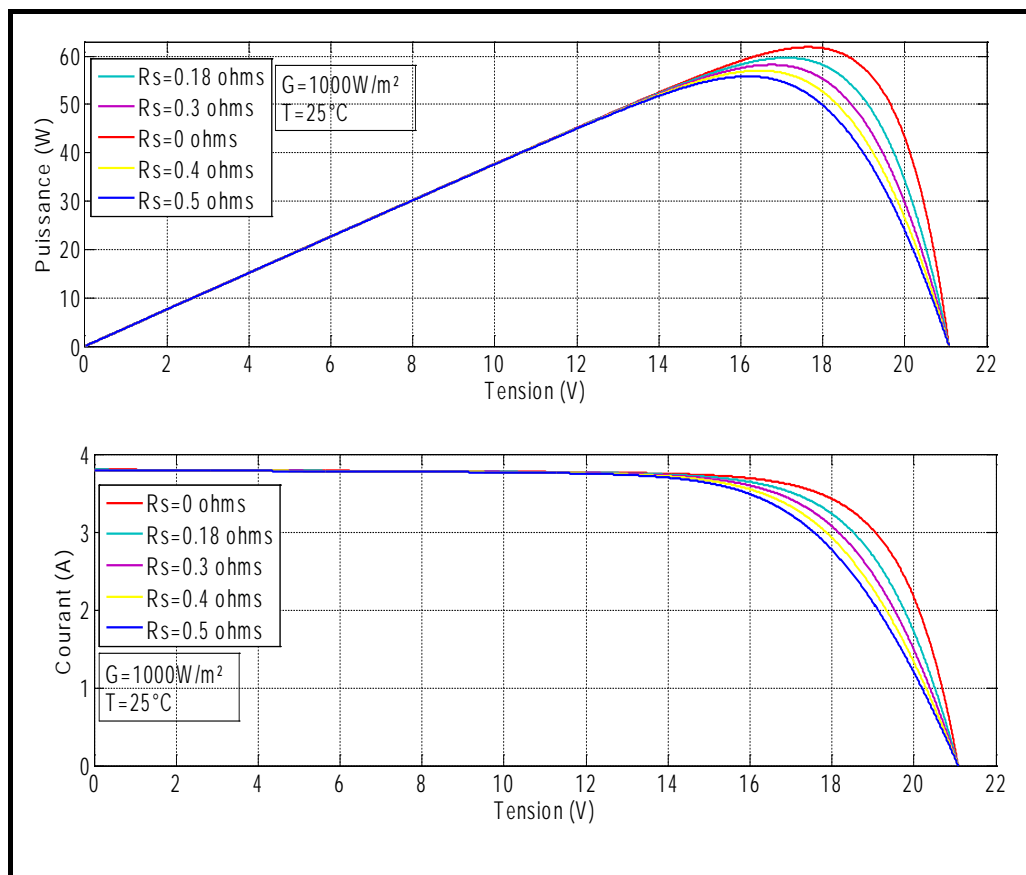


Figure 2.9. Influence de la résistance série sur la caractéristique P-V et I-V.

Les performances d'un générateur photovoltaïque se dégradent d'autant plus que ses résistances en séries sont importantes. La figure (2.9) démontre que l'accroissement de cette résistance se solde par une réduction de la pente de la courbe $I-V$ dans la plage où le panneau opère en tant que source de tension.

4.2.2. Influence de la résistance shunt R_{sh} sur les caractéristiques I-V et P-V

Dans cette simulation, nous examinons l'impact de R_{sh} sur le comportement du générateur PV. Les résultats de cette étude sont illustrés dans la figure (2.10).

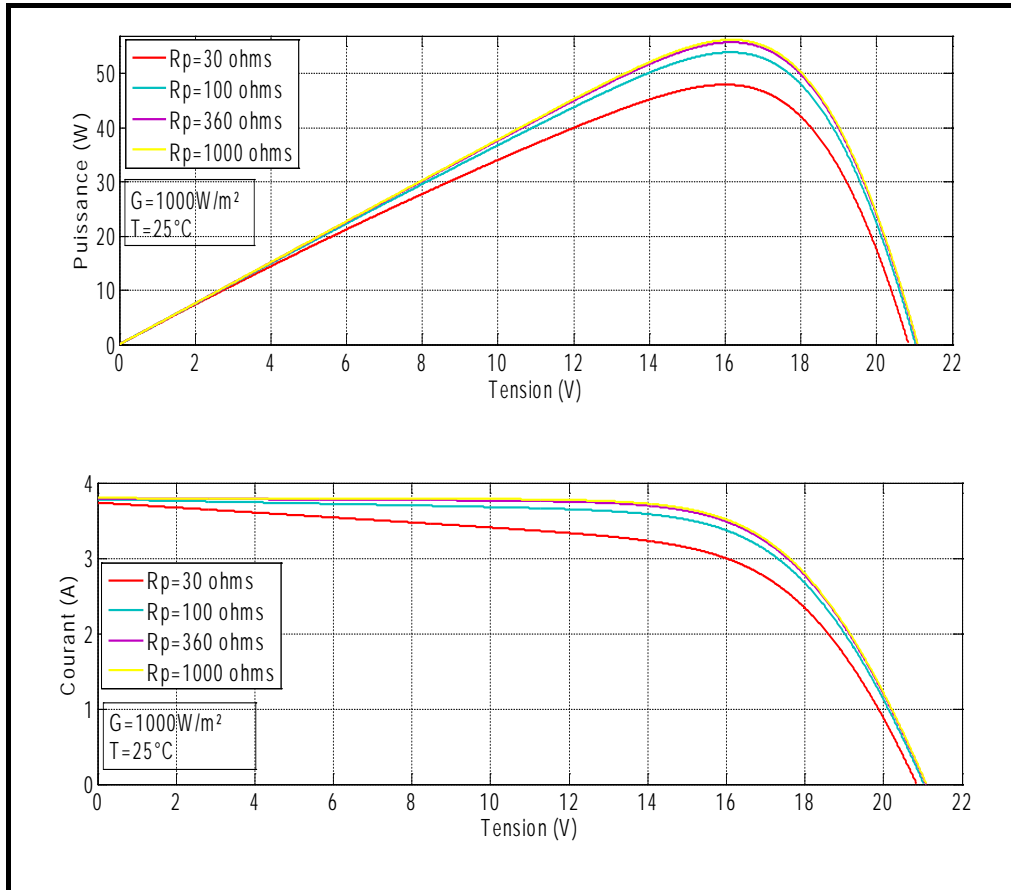


Figure 2.10. Influence de la résistance shunt sur la caractéristique P-V et I-V.

La figure (2.10) illustre que l'augmentation de R_{sh} se traduit par une augmentation de la courbe de puissance dans la zone où le générateur photovoltaïque fonctionne comme une source de courant. Ainsi, la détérioration des performances du panneau PV est attribuable à la diminution de la résistance shunt.

5. Assemblage des générateurs photovoltaïque

Afin de visualiser les caractéristiques puissances-tension et courant-tension d'un système photovoltaïque sous les conditions standard ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$), il est nécessaire de réaliser la représentation électrique de ce système. Trois architectures sont utilisées : une association série ; une association parallèle et une association série-parallèle.

5.1. Association série

On introduit un voltmètre aux bornes de générateur photovoltaïque, pour mesurer sa tension ; ainsi qu'un ampèremètre insérer en série avec les deux modules pour mesurer le courant produit par ces derniers. Cela nous permet de calculer la puissance produite par les deux modules. Une source de tension contrôlée par une rampe est utilisée pour faire varier la tension d'entrée produite.

Afin de connecter deux modules photovoltaïques en série, on connecte la borne positive (+) du premier panneau à la borne négative (-) du deuxième. La figure (2.11) représente la mise en série de deux panneaux photovoltaïques.

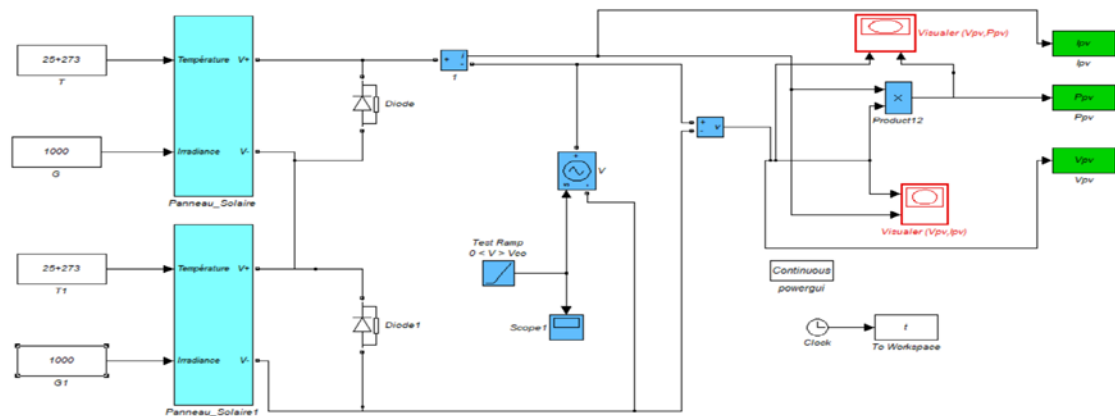


Figure 2.11. Schéma bloc de deux panneaux solaires connectés en série

La figure (2.12) représente un exemple d'association en série de trois panneaux photovoltaïques.

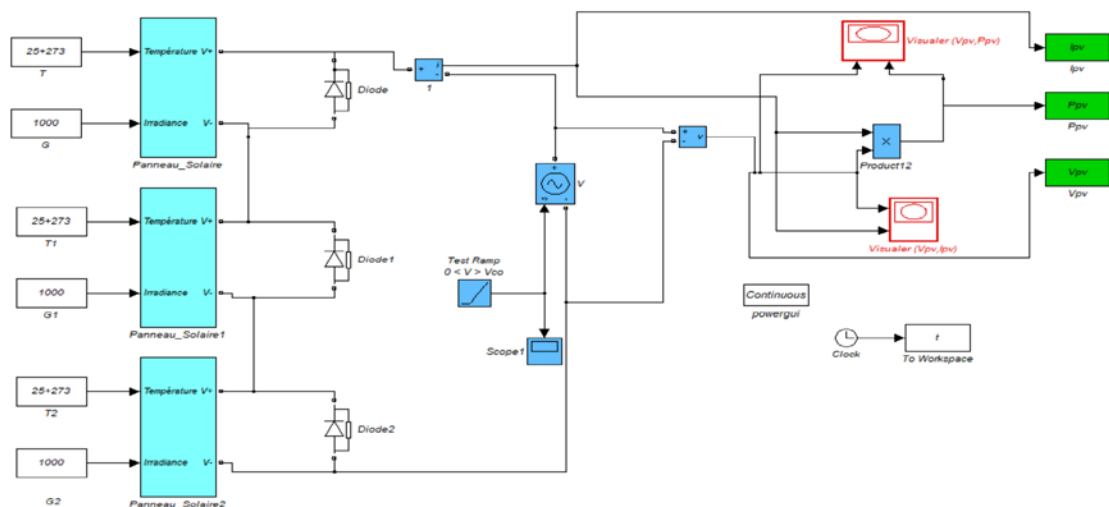


Figure 2.12. Schéma bloc de trois panneaux solaires connectés en série.

- **Simulation**

Résultats de simulation de deux et trois panneaux solaires connectés en série sous les conditions standards ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$).

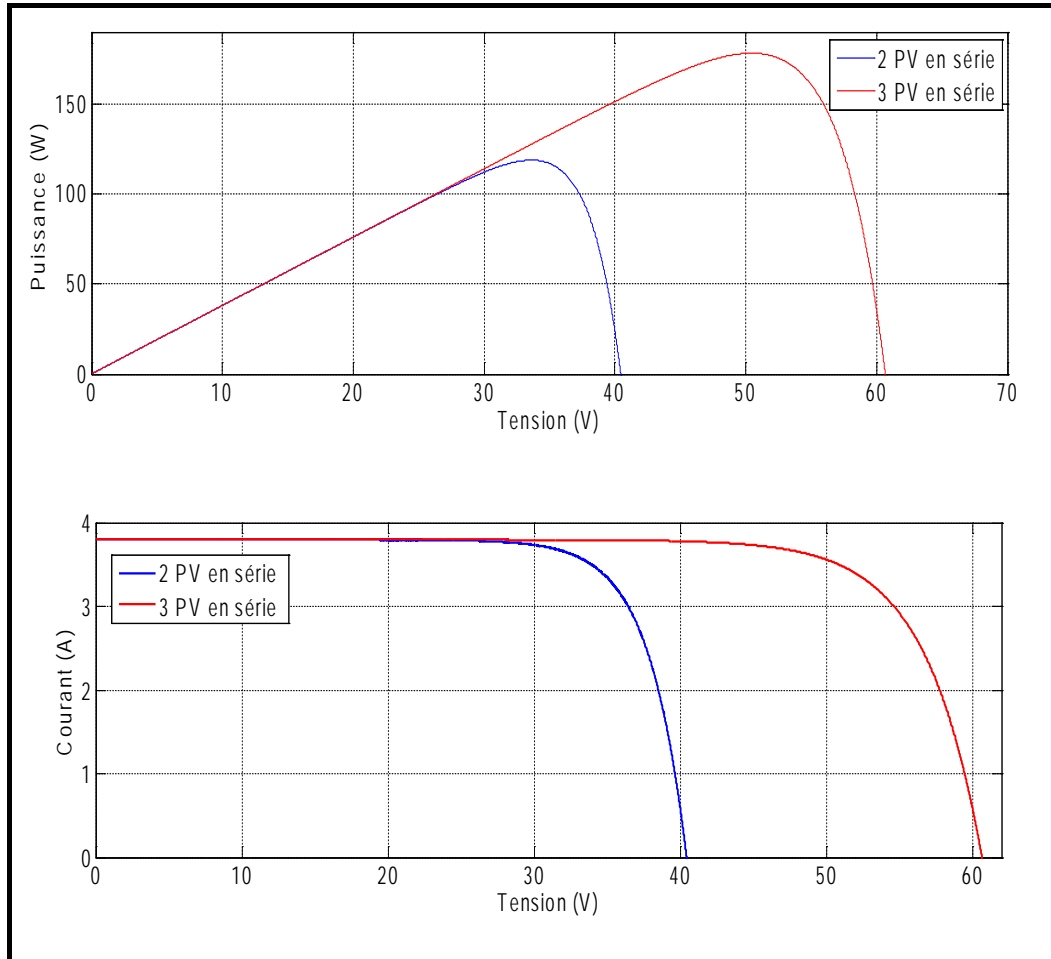


Figure 2.13. La caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ de deux et trois GPV connecté en série sous les conditions standard ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$)

Lors de la simulation des deux et trois panneaux solaires (GPV) en série, on remarque que le courant de court-circuit reste stable tel qu'illustré sur la figure (2.13), et on observe une augmentation importante de la tension de circuit-ouvert. Cette augmentation de la tension entraîne également une augmentation de puissance globale du système.

5.2. Association parallèle

Afin de connecter deux modules photovoltaïques en parallèle, on connecte la borne positive (+) du premier panneau à la borne positive (+) du deuxième, et la borne négative (-) du

Chapitre 02 : Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

premier panneau à la borne négative (-) du deuxième. La figure (2.14) représente la mise en parallèle de deux panneaux photovoltaïques.

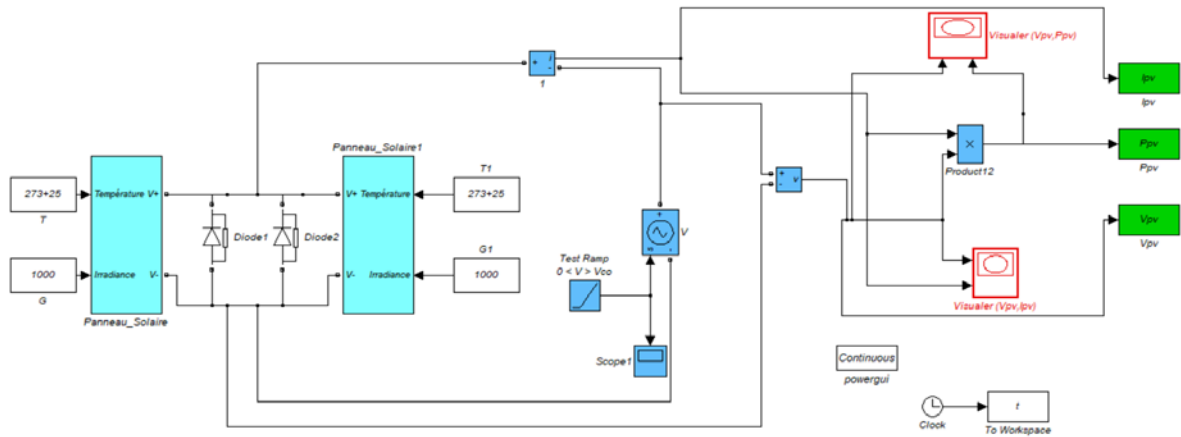


Figure 2.14. Schéma bloc de deux panneaux solaires connectés en parallèle.

La figure (2.15) représente un exemple de trois panneaux solaires connectés en parallèle

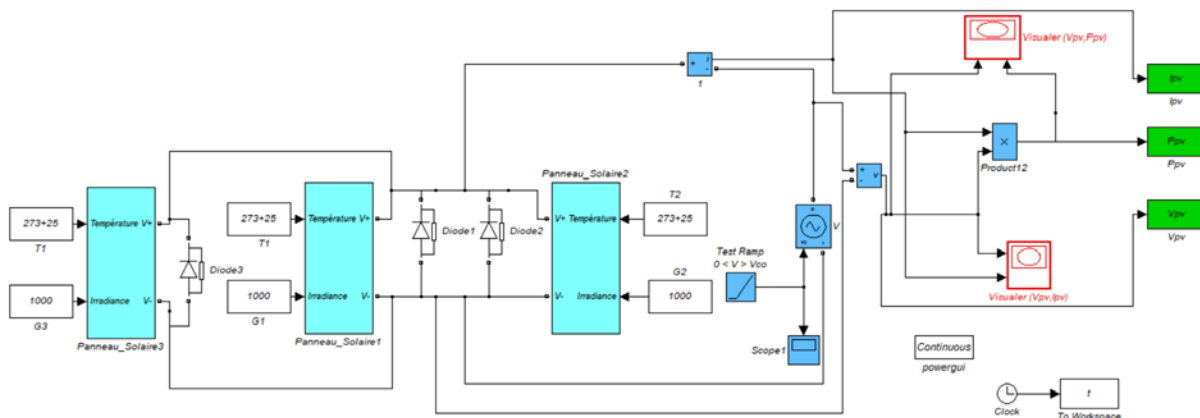


Figure 2.15. Schéma bloc de trois panneaux solaires connectés en parallèle

- **Simulation**

Simulation de deux et trois panneaux solaires connectés en parallèle sous les conditions standards ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

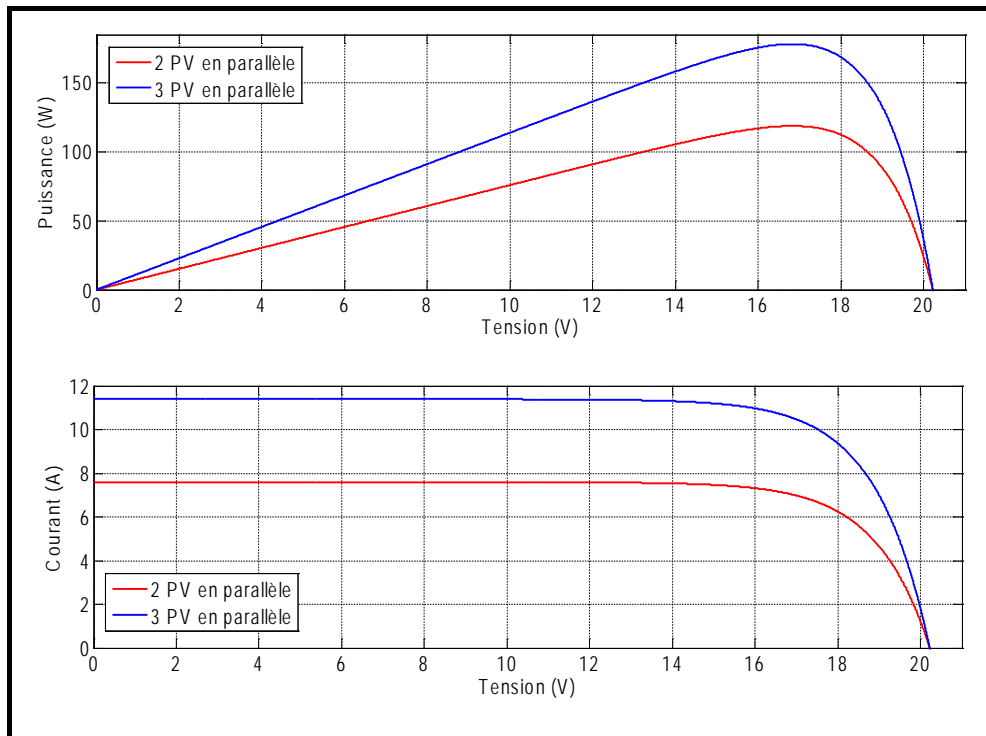


Figure 2.16. La caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ de deux et trois GPV connecté en parallèle sous les conditions standard ($G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$)

Lors de la simulation des deux et trois panneaux solaires (GPV) en parallèle, on remarque que la tension de circuit-ouvert reste stable, et on observe une augmentation importante du courant de court-circuit. Cette augmentation du courant entraîne également une augmentation de puissance globale du système.

5.3. Association série parallèle (mixte)

L'association série parallèle des panneaux photovoltaïque consiste à connecter les modules en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant. Dans notre cas, on a connecté deux modules en parallèle et un troisième module en série avec ces derniers.

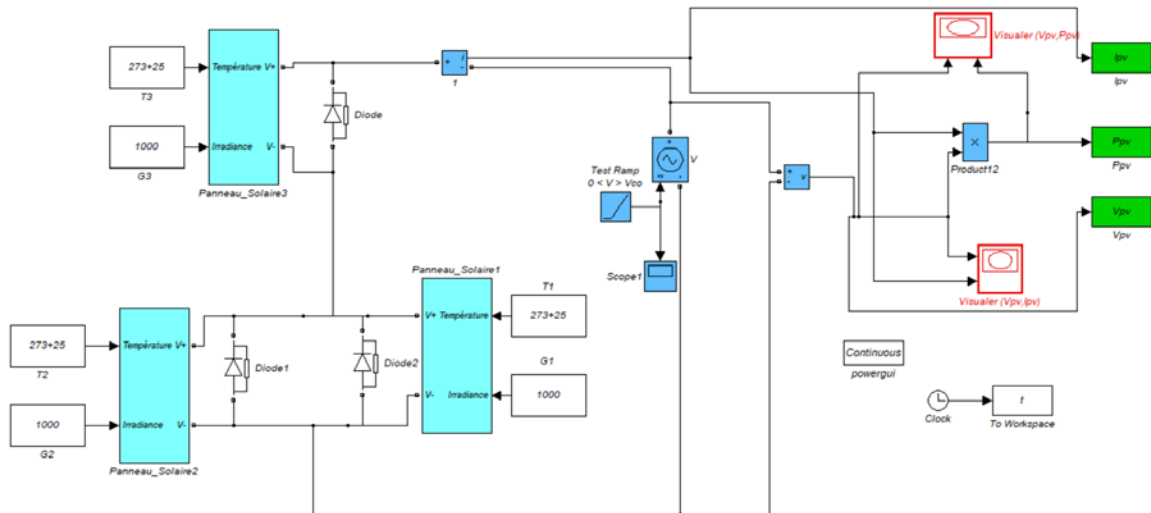


Figure 2.17. Schéma bloc de trois panneaux solaires connectés en série parallèle.

- **Simulation**

Simulation de trois panneaux solaires (GPV) connectés en série parallèle sous les conditions standards ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

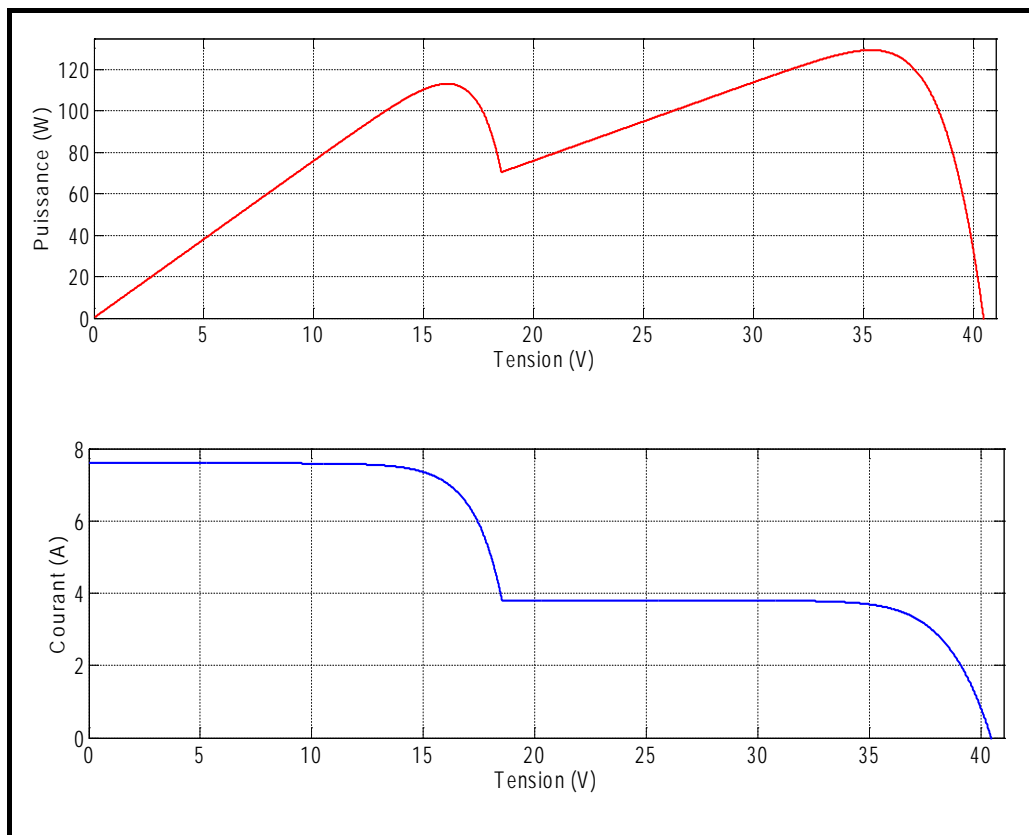


Figure 2.18. La caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ de deux et trois GPV connectés en série parallèle sous les conditions standard ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$)

Chapitre 02 : Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

D'après la figure (2.18), une augmentation du courant est observée, résultant de la somme des courants des panneaux en parallèle. De plus, on note une multiplication de la tension, attribuable à la mise en série du panneau avec les deux panneaux connectés en parallèle.

6. L'ombrage

6.1. Définition de l'ombrage

L'ombrage signifie la zone d'obscurité projetée sur un objet ou une pièce éclairée. Un panneau ombragé, veut dire qu'il est couvert par un nuage, un bâtiment, un arbre ou autre chose qui sera un obstacle pour que les rayons solaires atteignent les générateurs photovoltaïques.

L'ombrage peut être total (la surface du panneau solaire est totalement couverte par l'ombre), ou partiel (une partie du panneau est ombragée). Ce phénomène peut créer des zones chaudes, qui peuvent endommager les cellules photovoltaïques à long terme, et favoriser le vieillissement des générateurs photovoltaïques.

Afin de gérer cet effet et limiter ses conséquences, on équipe les panneaux solaires avec des diodes by-pass. Grâce à ces dernières les cellules ombragées sont court-circuitées et le reste de panneau continue sa production. [11]

6.2. Effet d'ombrage

Pour comprendre le comportement d'un système photovoltaïque sous des conditions variables, il est nécessaire de visualiser les caractéristiques de puissance-tension et courant-tension de ce dernier. En observant les variations dues à l'ombrage, on peut identifier les zones de perturbation et adapter l'installation pour optimiser la production d'énergie solaire.

6.3. Simulation du système photovoltaïque sous ombrage

On suppose qu'on a trois générateurs photovoltaïques, le premier est sans ombrage, tandis que les deux autres sont ombragés. Afin d'analyser les performances de ces derniers, on les connecte de trois façons différentes : en série, en parallèle, et en série-parallèle.

On suppose qu'on a trois modules photovoltaïques fonctionnant sous différentes conditions, comme indiqué dans le tableau.

Générateur photovoltaïque	Eclairement	Température
Panneau_Solaire1 sans ombrage	1000W/m ²	25°C
Panneau_Solaire2 panneau ombragé	800W/m ²	23°C
Panneau_Solaire3 panneau ombragé	600W/m ²	20°C

Tableau 2.2. Les conditions variables des trois générateurs photovoltaïques

6.3.1. Simulation d'une configuration en série sous ombrage

La figure (2.19) présente les résultats de simulation de trois panneaux photovoltaïques connecter en série, à la fois sous les conditions standards et sous l'effet d'ombrage.

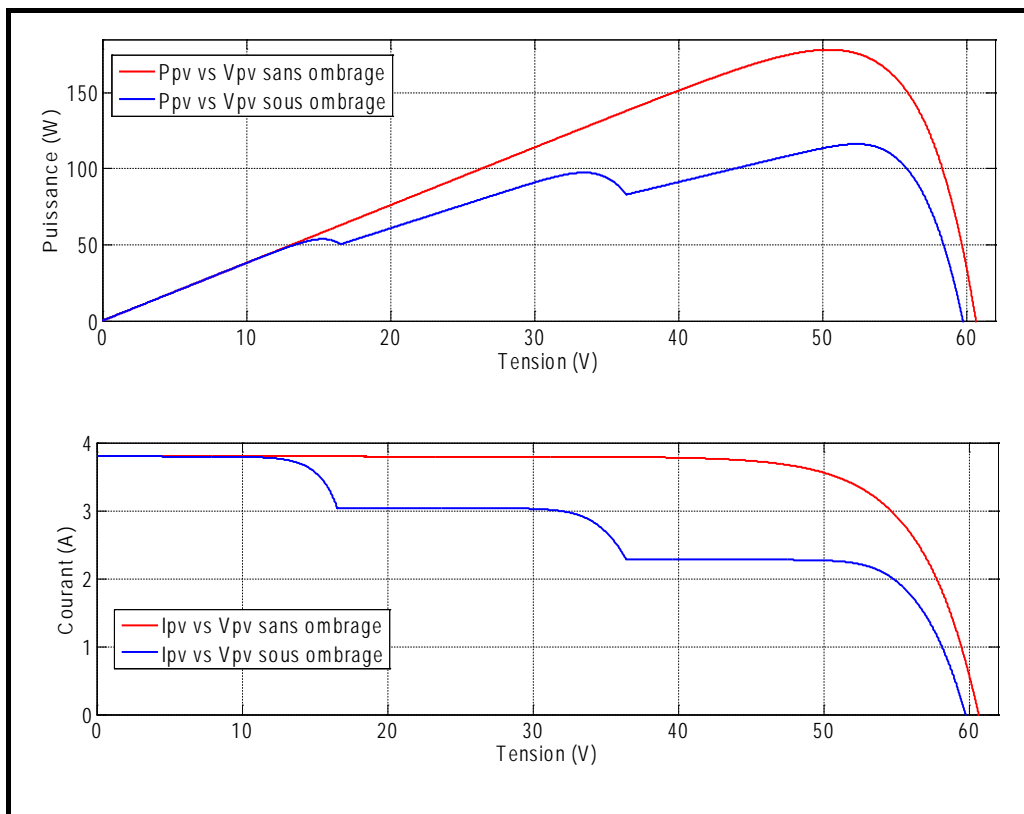


Figure 2.19. La caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ de trois panneaux photovoltaïques connectés en série sous ombrage.

Chapitre 02 : Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

D'après ces courbes on remarque que la puissance maximale est affectée par l'ombrage. On remarque des pics qui apparaissent sur les caractéristiques puissance-tension et courant tension, ils varient en fonction du taux de l'ombrage. Parmi ces pics il y a un point de puissance maximal globale et les autres sont appelés des points de puissances locales.

La tension totale V_{oc} peut également être affectée, mais elle est moins sensible à l'ombrage par rapport au courant.

6.3.2. Simulation d'une configuration en parallèle d'un système photovoltaïque sous ombrage

La figure (2.20) illustre les résultats de simulation de trois panneaux photovoltaïques connectés en parallèle, simulés à la fois sous les conditions standards et sous l'effet d'ombrage.

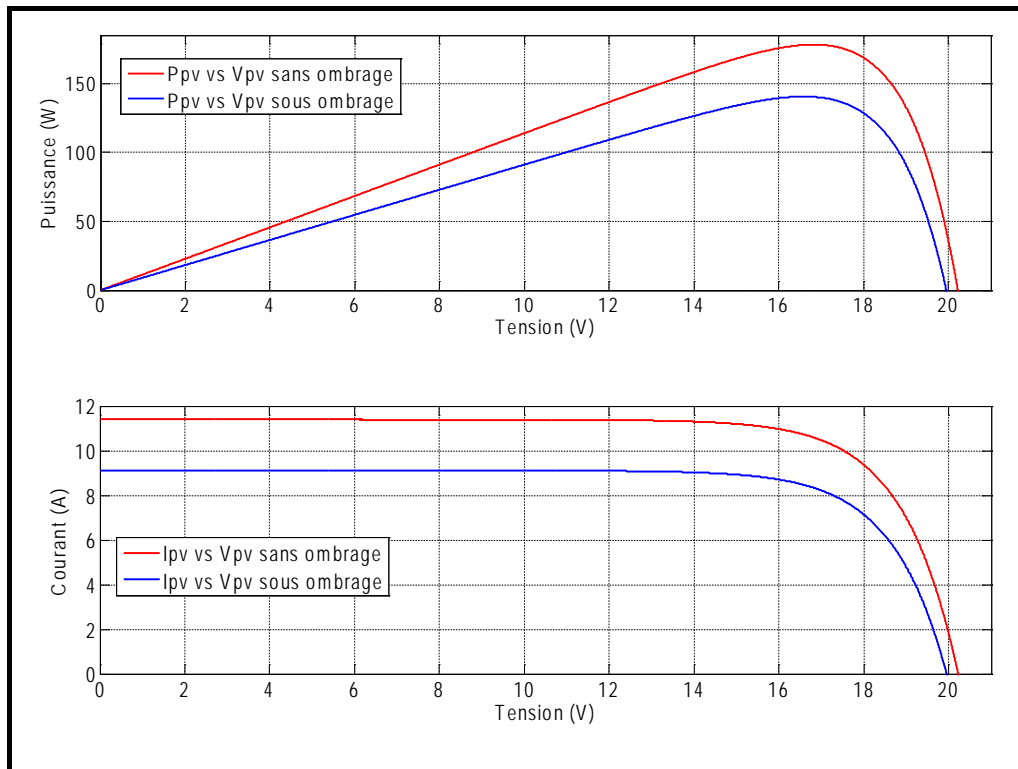


Figure 2.20. La caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ de trois panneaux photovoltaïques connectés en parallèle sous ombrage

La figure (2.20) nous montre clairement une diminution du courant total et une réduction du pic de puissance maximale du a l'effet d'ombrage. La tension à circuit ouvert est légèrement affectée par l'ombrage des panneaux.

Chapitre 02 : Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

L'ombrage sur un panneau affecte moins le système global en parallèle que dans une configuration série, car les panneaux non ombragés continuent de contribuer pleinement.

En conclusion, la configuration en parallèle du système photovoltaïque sous les conditions standards offre une performance stable et optimale, similaire à une configuration en série mais avec une somme de courants plus élevée. Sous l'effet d'ombrage, cette configuration est plus résiliente car les panneaux non ombragés maintiennent leur performance, limitant ainsi l'impact négatif de l'ombrage par rapport à une configuration en série.

6.3.3. Simulation d'une configuration en série-parallèle d'un système Photovoltaïque sous ombrage

La figure (2.21) montre les résultats de simulation de trois panneaux photovoltaïques connectés en série-parallèle, comparant les performances sous les conditions standards et sous l'effet d'ombrage.

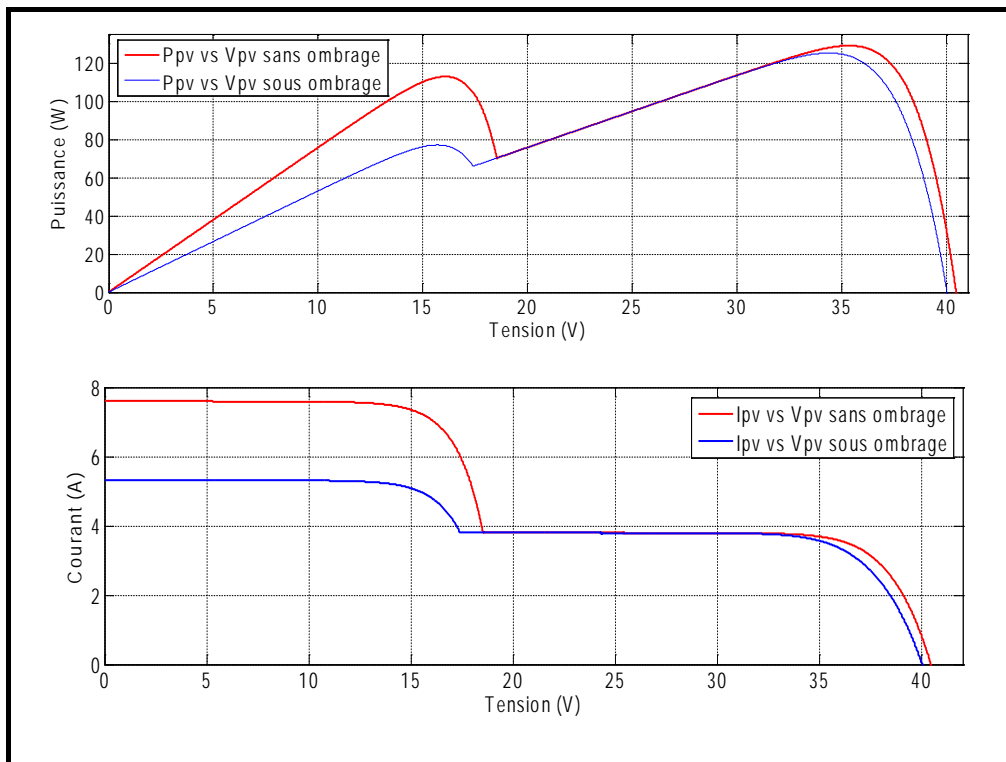


Figure 2.21. La caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ de trois panneaux photovoltaïques connectés en série- parallèle sous ombrage.

On observe une diminution du courant et de puissance sur les caractéristiques du système photovoltaïque dû à l'effet d'ombrage.

Chapitre 02 : Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

En conclusion, la configuration mixte maintient une performance relativement stable sous l'effet d'ombrage, grâce à la combinaison des avantages des configurations série et parallèle. Cette configuration offre une meilleure efficacité optimisée dans des conditions variables d'ensoleillement.

7. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a offert une vue d'ensemble complète de la modélisation et de la simulation des différents blocs constituant un système photovoltaïque (PV), en mettant l'accent sur les conditions d'ombrage partiel. Nous avons débuté par la modélisation du système photovoltaïque, suivie par une analyse détaillée de l'assemblage des cellules photovoltaïques en configurations série, parallèle et série-parallèle. Un schéma bloc d'un générateur photovoltaïque a été présenté, et nous avons simulé ce générateur pour examiner les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V).

De plus, nous avons étudié l'influence de l'éclairement et de la température sur les cellules photovoltaïques ainsi que l'impact des résistances internes sur les caractéristiques (I-V) et (P-V). L'assemblage des panneaux photovoltaïques, dans les configurations série, parallèle et mixte, a également été simulé sous des conditions standard.

L'effet de l'ombrage sur le système photovoltaïque a été particulièrement mis en lumière, et des simulations ont été effectuées pour des configurations en série, parallèle et mixte sous l'effet de l'ombrage. Ainsi, ce chapitre a permis de mieux comprendre les divers facteurs influençant le comportement d'un système PV, fournissant des bases solides pour optimiser leur performance sous différentes conditions environnementales.

Chapitre 03 : Commande MPPT d'un générateur photovoltaïque

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) appliquée à un générateur photovoltaïque. Nous commencerons par présenter la chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par cette méthode, en mettant l'accent sur le rôle crucial du convertisseur DC/DC intégré dans cette chaîne. Ce convertisseur joue un rôle central en adaptant la tension et le courant du générateur photovoltaïque pour maximiser l'extraction de la puissance disponible.

Nous aborderons ensuite le principe de fonctionnement de la commande MPPT, une technologie essentielle pour optimiser la production d'énergie des systèmes photovoltaïques. En particulier, nous examinerons en profondeur la méthode de l'observation et de la perturbation, une approche dynamique et efficace pour ajuster le point de fonctionnement du générateur en réponse aux variations des conditions environnementales. Cette méthode permet de suivre le point de puissance maximale disponible, garantissant ainsi une performance optimale du système photovoltaïque.

À travers cette analyse, nous visons à fournir une compréhension complète des mécanismes de la commande MPPT et de son intégration dans les systèmes photovoltaïques.

2. Chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT

Pour garantir que les systèmes photovoltaïques fonctionnent à leurs points de puissance maximum sur leurs courbes caractéristiques, des stratégies de contrôle spécifiques sont utilisées. Dans la littérature, cette technique est appelée "Recherche du Point de Puissance Maximum" (MPPT). Pour cette commande, plusieurs éléments sont essentiels. Les panneaux photovoltaïques captent l'énergie solaire et la convertissent en électricité. Un régulateur MPPT, souvent couplé à un convertisseur DC-DC, ajuste la tension pour maximiser la puissance extraite. [8]

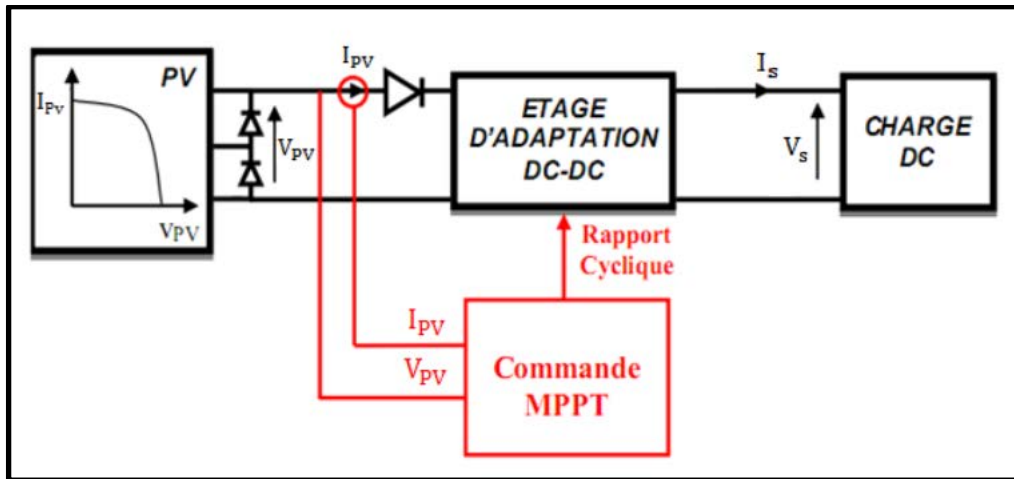


Figure 3.1. Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT

La figure (3.1) représente un générateur photovoltaïque contrôlé par une commande MPPT.

3. Schéma bloc d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT

La figure (3.2) présente le schéma global d'un système photovoltaïque simulé sur Matlab Simulink. Il inclut un module photovoltaïque connecté à un convertisseur DC/DC de type "boost". Ce convertisseur est contrôlé par une méthode MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui utilise l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O) pour optimiser l'extraction de la puissance maximale du panneau solaire.

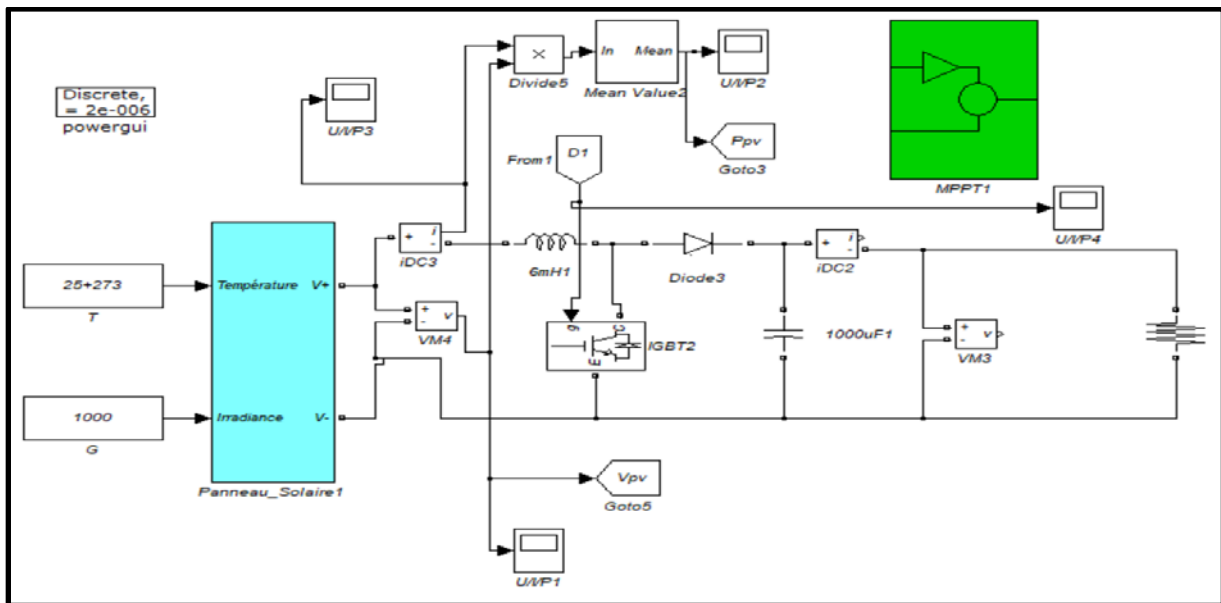


Figure 3.2. Schémas bloc d'un générateur photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT

3.1. Convertisseurs DC/DC

Un convertisseur DC/DC est un dispositif électronique utilisé pour convertir une tension continue (DC) d'un niveau à un autre, en ajustant généralement la tension, le courant, ou les deux, selon les besoins du système. Voici les principaux types de convertisseurs DC/DC :

- Convertisseur abaisseur (Buck converter)
- Convertisseur élévateur (Boost converter)
- Convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost converter)

Dans notre simulation nous avons utilisé un convertisseur élévateur.

3.1.1. Convertisseur élévateur (Boost)

Un convertisseur élévateur est utilisé pour augmenter la tension disponible d'une source continue. Dans les systèmes alimentés par énergie photovoltaïque, plusieurs cellules sont souvent connectées en série pour obtenir une tension suffisamment élevée. Un convertisseur élévateur permet d'augmenter la tension fournie par une cellule photovoltaïque, réduisant ainsi le nombre de cellules nécessaires pour atteindre le niveau de tension souhaité. [12]

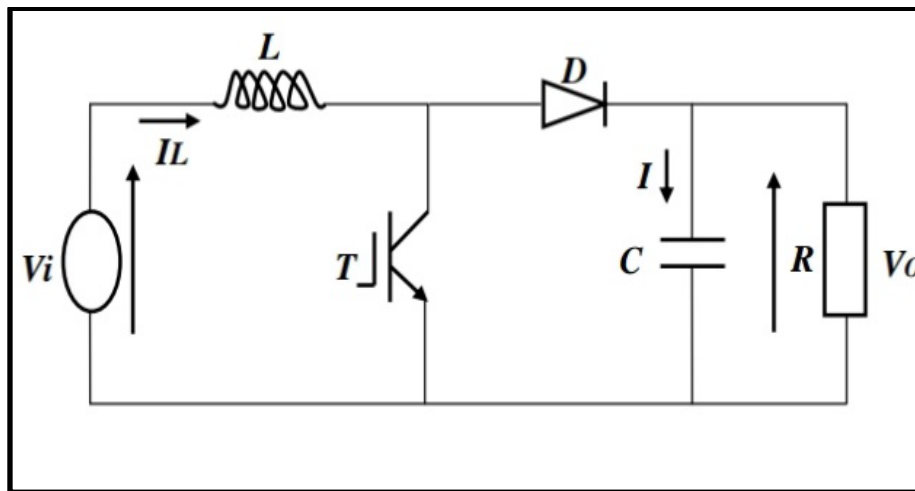


Figure 3.3. Convertisseur élévateur (Boost)

3.1.2. Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur élévateur (Boost) peut être divisé en deux phases distinctes.

Chapitre 03 : Commande MPPT d'un générateur photovoltaïque

La première phase est l'accumulation d'énergie : lorsque l'IGBT est fermé (en conduction), le courant dans l'inductance augmente, stockant ainsi de l'énergie sous forme magnétique. Pendant ce temps, la diode D est bloquée, déconnectant la charge de l'alimentation.

Dans la seconde phase, lorsque l'IGBT est ouvert, l'inductance se retrouve en série avec le générateur et sa f.e.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance passe ensuite par la diode D, le condensateur C et la charge R, transférant ainsi l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur. En mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.

La tension de sortie se calcule comme suit (en supposant des composants parfaits) : pendant l'état passant, le thyristor est fermé, entraînant l'augmentation du courant selon la relation suivante :

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \quad (9)$$

Le courant I_L augmente à la fin de l'état passant

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{\alpha} dI_L = \frac{V_i \alpha T}{L} \quad (10)$$

α : Le rapport cyclique.

Le rapport cyclique représente la durée de la période T pendant laquelle l'IGBT conduit.

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (11)$$

A l'état bloqué, l'IGBT est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. Si on suppose une chute de tension nulle aux bornes de la diode et que le condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante, l'évolution de I_L est :

$$V_i - V_0 = L \frac{dI_L}{dt} \quad (12)$$

La variation de I_L durant l'état bloqué est

$$\Delta I_{Loff} = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \frac{(V_i - V_0)T}{L} \quad (13)$$

Chapitre 03 : Commande MPPT d'un générateur photovoltaïque

On suppose que le convertisseur a atteint son régime permanent, la quantité d'énergie stockée dans chacun de ces composants est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} L I_L^2 \quad (14)$$

En conséquence, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = 0 \quad (15)$$

On déduit que :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (16)$$

Grâce à cette expression, on constate que la tension de la sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. Elle augmente avec le facteur α et peut théoriquement devenir infinie quand α s'approche de 1. C'est pourquoi ce type de convertisseur est appelé élévateur. [11]

3.1.3. Les avantages du convertisseur élévateur

Ce convertisseur présente l'avantage de limiter l'ondulation du courant d'entrée grâce à l'inductance L. Il peut fonctionner même avec une tension d'entrée variable, ce qui, dans une installation photovoltaïque (PV), permet de récupérer la faible énergie disponible lors des périodes de faible ensoleillement. Si la tension à vide du générateur PV dépasse celle de la charge, il n'est plus possible d'annuler le courant en bloquant le transistor.

Toutefois, il est possible d'annuler le courant de sortie en rendant le transistor conducteur en permanence ($\alpha=1$), ce qui équivaut à court-circuiter le générateur PV. Un court-circuit du transistor n'a pour effet que de court-circuiter le générateur PV, ce qui n'entraîne pas de situation dangereuse.

En revanche, il est nécessaire de prévoir un circuit de protection pour éviter les conséquences d'un court-circuit de la diode. [11]

3.2. Commande MPPT

La commande MPPT consiste à amener le système à son maximum de puissance et à l'y maintenir en fonction des variations des paramètres. Il existe plusieurs algorithmes qui ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT.

Parmi ces méthodes on peut citer :

- La méthode de Hill Climbing
- La méthode de l'incrément de Conductance (IncCond)
- Les algorithmes basés sur la logique floue
- L'algorithme Perturb & Observe (P&O)

Dans notre travail on a opté pour la commande perturbation et observation qui est très utilisée par sa facilité d'implémentation. [12]

3.2.1. L'algorithme "Perturbation et Observation" (P&O)

La méthode perturbation et observation repose sur la perturbation de l'un des paramètres d'entrée de convertisseur statique, généralement on agit sur la tension de générateur photovoltaïque avec une faible amplitude autour de sa valeur initiale, et d'observer le comportement de la variation de puissance P_{pv} , qui en résulte ainsi comme l'illustre la figure (3.4).

On peut déduire que si une légère augmentation positive de la tension V_{pv} , engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche de PPM.

Si la puissance décroît ça veut dire que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement pareil peut être effectué lorsque la tension diminue. A travers ces différentes analyses sur les conséquences d'une variation de tension la caractéristique (P_{pv}, V_{pv}) , il est donc aisé de repérer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger vers le maximum de puissance en utilisant un contrôle adéquat malgré la variation de la température et de l'éclairement. [11]

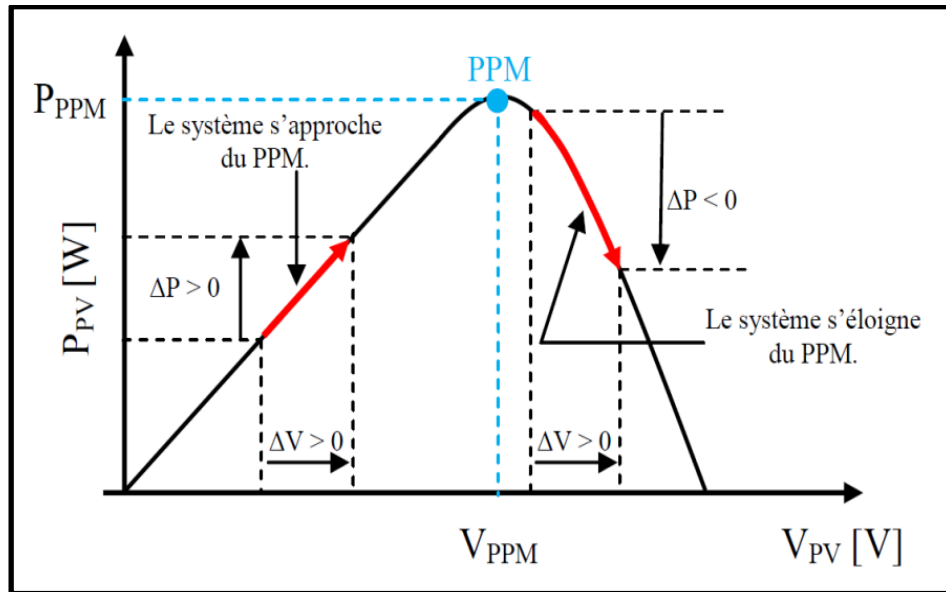


Figure 3.4. Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un générateur photovoltaïque

L'organigramme de la figure (3.5) est établi à la base de ce raisonnement. [4]

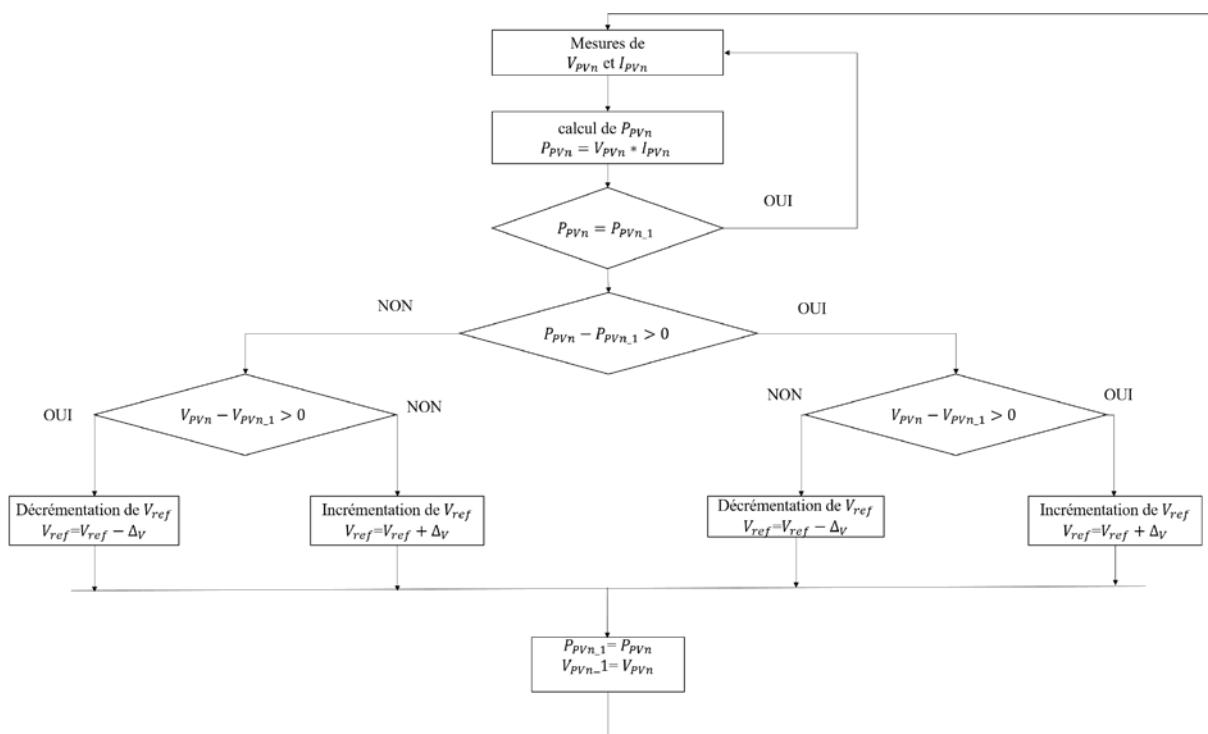


Figure 3.5. Organigramme de l'algorithme P&O

- **Simulation d'un générateur photovoltaïque :**

La simulation d'un générateur photovoltaïque en utilisant la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) basée sur la méthode d'observation et de perturbation vise à optimiser

Chapitre 03 : Commande MPPT d'un générateur photovoltaïque

la production d'énergie solaire en ajustant dynamiquement le point de fonctionnement du système.

La figure 3.6 illustre la caractéristique de puissance et tension en fonction de temps sous les conditions standard ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$).

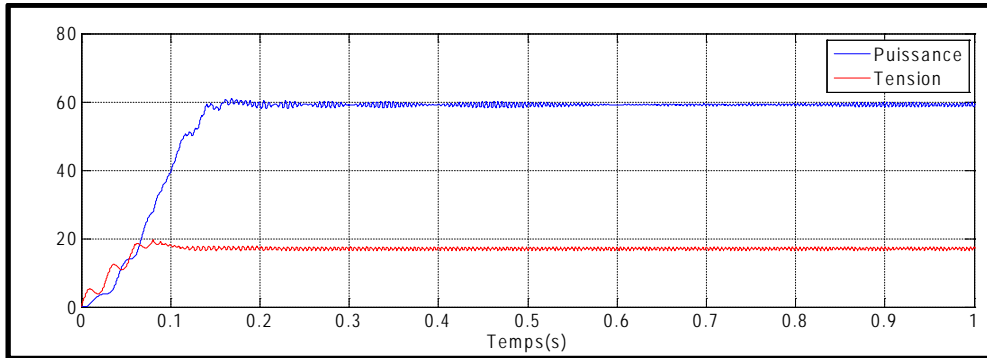


Figure 3.6. Caractéristique de puissance et tension en fonction de temps

On remarque que les courbes de puissance et tension en fonction du temps montrent des oscillations légères autour de leurs valeurs maximales respectives. Ces oscillations résultent des ajustements continus effectués par l'algorithme MPPT pour optimiser la production d'énergie en réponse aux changements d'ensoleillement et de température. On remarque aussi que le système atteint le point de puissance maximal en 0,5 seconde, indiquant une réponse rapide. Les courbes illustrent ainsi la dynamique de la régulation et l'efficacité de l'algorithme MPPT pour maintenir la performance du système photovoltaïque au plus haut niveau possible.

La figure 3.7 montre la simulation d'un générateur photovoltaïque sous un éclairage variable.

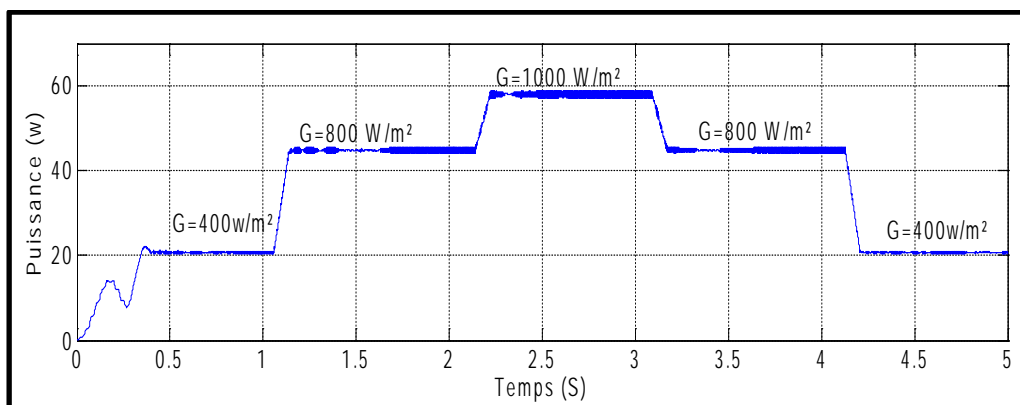


Figure 3.7. Caractéristique de puissance en fonction de temps à éclairage variable

La figure 3.7 illustre les résultats des simulations sous un éclairage variable. On observe que la puissance augmente avec l'éclairage et diminue lorsqu'il baisse. De plus, à

chaque variation, la puissance oscille légèrement autour du point de puissance maximale (MPP). La courbe montre des transitoires rapides lors des changements soudains d'éclairement, suivis d'une stabilisation de la puissance à un nouveau niveau optimal.

3.2.2. Algorithmes MPPT et suivi de référence

Les algorithmes MPPT sont généralement étudiés en utilisant la caractéristique Puissance-tension des générateurs photovoltaïques. Le même principe est appliqué à l'algorithme Perturb and Observe (P&O) pour contrôler la puissance. Pour expliquer le fonctionnement de l'algorithme P&O dans le suivi de la référence, on commence par tracer la puissance du PV et on impose une puissance de référence $P_{ref} = 40W$.

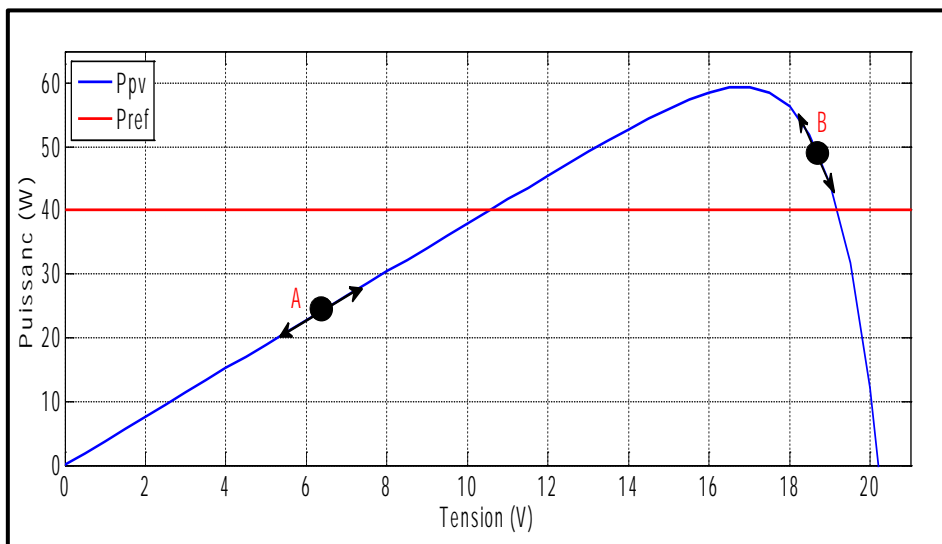


Figure 3.8. Principe de l'algorithme P&O avec suivi de référence

- **Au point A**

Quand V_{pv} augmente, P_{pv} augmente et $|P_{pv} - P_{ref}|$ diminue, je suis donc au point A et je m'approche de la référence (flèche montante) : **je dois augmenter V_{pv}** .

Si quand V_{pv} diminue, P_{pv} diminue et $|P_{pv} - P_{ref}|$ augmente, je suis donc au point A et je m'éloigne de la référence (flèche descendante) : **je dois augmenter V_{pv}** .

- **Au point B**

Quand V_{pv} augmente, P_{pv} diminue et $|P_{pv} - P_{ref}|$ diminue, je suis donc au point B et je m'approche de la référence (flèche descendante) : **je dois augmenter V_{pv}** .

Chapitre 03 : Commande MPPT d'un générateur photovoltaïque

Si quand V_{pv} diminue, P_{pv} augmente et $|P_{pv} - P_{ref}|$ augmente, je suis donc au point B et je m'éloigne de la référence (flèche montante) : **je dois augmenter** V_{pv} .

De plus, en cas de conditions climatiques défavorables empêchant le générateur PV d'atteindre la référence (P_{ref} supérieur à puissance maximale du PV), l'algorithme antérieur utilisant le MPPT sera activé. Cela permettra d'optimiser le fonctionnement du PV en le faisant fonctionner en mode PPM.

Pour détailler cet algorithme, nous avons élaboré un organigramme intégrant toutes nos définitions et raisonnements, présenté dans la figure (3.9).

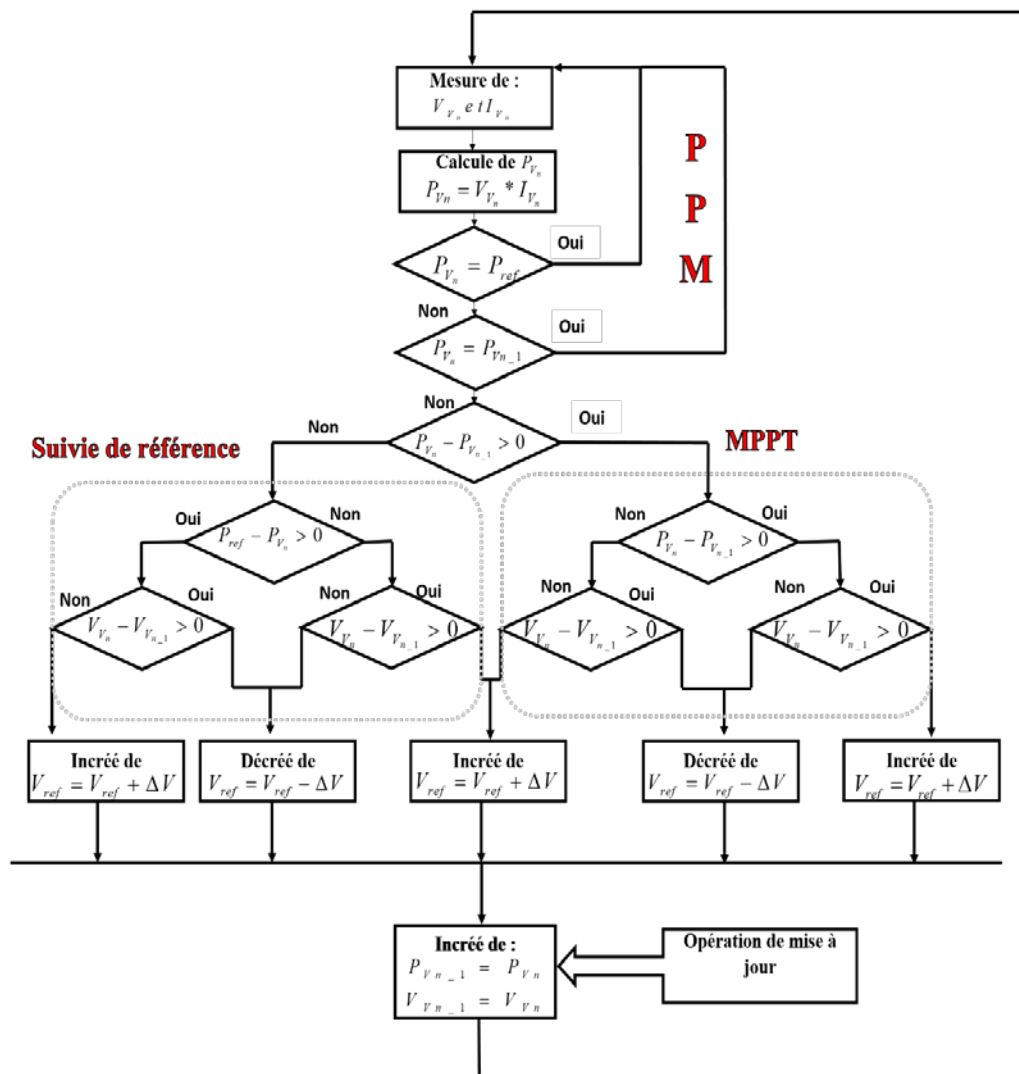


Figure 3.9. Organigramme de l'algorithme P&O en suivi de référence

- **Simulation**

La simulation a été faite sur un profil de charge imaginaire sous les conditions standards (25°C et 1000 W/m²). La figure 3.10 représente les résultats obtenus.

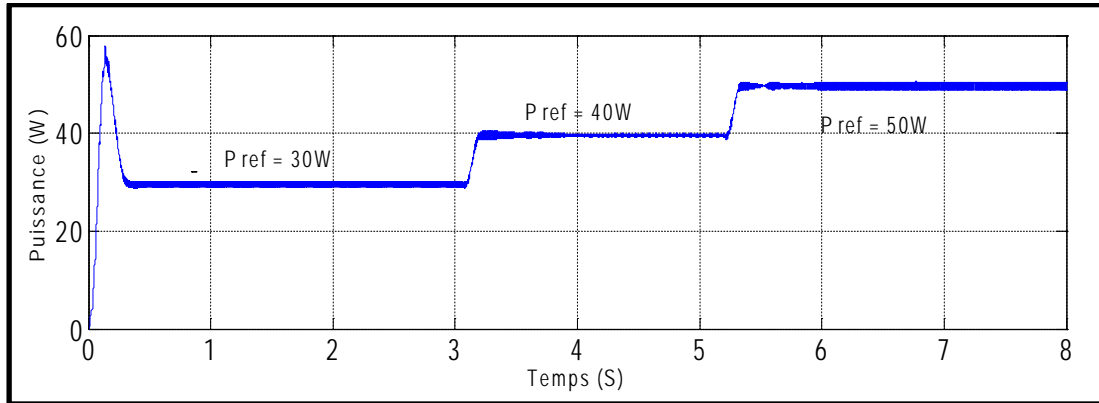


Figure 3.10. Caractéristique de puissance en fonction de temps d'un générateur photovoltaïque avec l'algorithme P&O

La figure illustre que la courbe de puissance générée par le système photovoltaïque se conforme à la puissance de référence imposée. Cette observation indique que le système de commande MPPT, utilisant la méthode de perturbation et d'observation, ajuste efficacement le point de fonctionnement du générateur pour suivre la puissance de référence fixée.

3.2.3. Simulation d'une configuration en parallèle des générateurs photovoltaïques sous l'effet d'ombrage en utilisant la commande MPPT (P&O)

Nous simulons une configuration parallèle de deux panneaux photovoltaïques afin d'examiner l'impact de l'ombrage contrôlé sur leur performance, en utilisant la commande MPPT (P&O).

Le premier panneau est exposé à un éclairage de 800 W/m², tandis que le second reçoit un éclairage de 600 W/m², dans un environnement où la température est maintenue constante à 25°C. Nous imposons des puissances de référence successives de 80W, 40W et 60W pour analyser comment cette méthode MPPT s'adapte aux variations des conditions météorologiques et optimise la production d'énergie des panneaux sous ces conditions spécifiques.

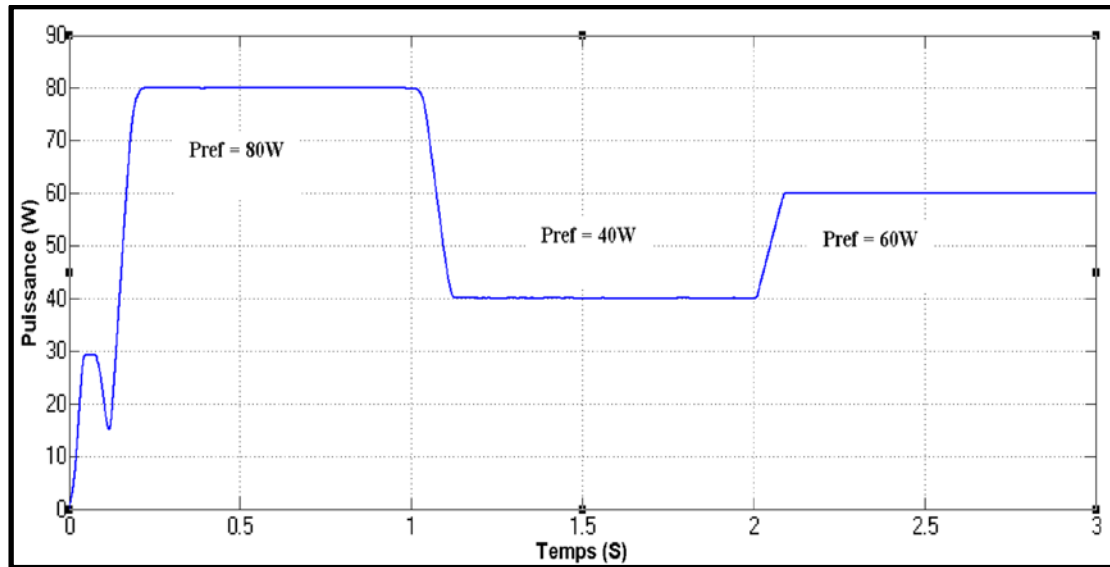


Figure 3.11. Caractéristique de puissance sous l'effet d'ombrage d'un assemblage en parallèle de deux GPV contrôlé par l'algorithme P&O

Sous l'effet d'ombrage, bien que chaque panneau photovoltaïque produit une quantité réduite d'énergie, l'assemblage en parallèle parvient à suivre les puissances de référence imposées de 80W, 40W et 60W, comme le montre la figure. Cela est possible grâce à la régulation dynamique du système MPPT, qui ajuste la production totale du système malgré les conditions d'ombrage défavorables, garantissant que la puissance fournie se rapproche au maximum des objectifs fixés.

4. Conclusion

Ce chapitre a fourni une vue d'ensemble approfondie de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) appliquée à un générateur photovoltaïque, en mettant en lumière les aspects essentiels de la chaîne de conversion photovoltaïque et le rôle clé du convertisseur DC/DC. Nous avons exploré comment ce convertisseur adapte la tension et le courant du générateur pour optimiser la production d'énergie.

Nous avons également détaillé le principe de fonctionnement de la commande MPPT, en nous concentrant sur la méthode d'observation et de perturbation. Cette approche dynamique, qui ajuste continuellement le point de fonctionnement du générateur en fonction des variations des conditions environnementales, est cruciale pour garantir que le système photovoltaïque fonctionne toujours au maximum de son potentiel. La capacité de la méthode à s'adapter rapidement aux changements permet de maximiser l'extraction de puissance, même dans des conditions de fonctionnement variables.

Chapitre 03 : Commande MPPT d'un générateur photovoltaïque

Ainsi, l'intégration efficace de la commande MPPT et du convertisseur DC/DC dans les systèmes photovoltaïques permet non seulement d'optimiser la production d'énergie, mais aussi d'améliorer la performance globale et la rentabilité des installations solaires. La compréhension de ces technologies est essentielle pour concevoir des systèmes photovoltaïques performants et durables, capables de répondre aux défis énergétiques modernes.

Conclusion générale

Le présent travail nous a permis de faire une étude sur un système photovoltaïque comprenant un module photovoltaïque connecté à un convertisseur DC/DC de type "boost". Ce convertisseur est contrôlé par la commande MPPT utilisant l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O) pour maximiser l'extraction de puissance. L'objectif de notre travail était de développer et d'optimiser une méthode de commande permettant de suivre le point de puissance maximale (MPPT) afin d'augmenter le rendement du générateur photovoltaïque.

Pour atteindre cet objectif, on a structuré notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre a été consacré aux généralités sur l'énergie photovoltaïque, en présentant son fonctionnement, ses différentes technologies et son potentiel en Algérie. Il a également abordé les systèmes photovoltaïques disponibles ainsi que les avantages et inconvénients de cette technologie.

Le deuxième chapitre a porté sur la modélisation et la simulation du module photovoltaïque. Nous avons modélisé et simulé la chaîne de conversion photovoltaïque sur Matlab Simulink, en assemblant les panneaux sous différentes configurations. Ces modèles ont ensuite été simulés sous diverses conditions incluant les conditions standards et l'effet d'ombrage.

Le troisième chapitre s'est concentré sur l'étude d'un système photovoltaïque comprenant un module photovoltaïque connecté à un convertisseur DC/DC de type "boost" contrôlé par la commande MPPT utilisant l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O). Un algorithme de suivi de référence a été établi comme base de ce contrôle. Le modèle a été simulé sous différentes conditions, et la mise en parallèle de deux panneaux photovoltaïques sous cette commande a également été réalisée.

Bibliographie

- [1] Belkacemi Mohamed Lamine, Sifi Redouane. « Etude et réalisation d'un convertisseur DC-DC avec contrôleur MPPT destiné au pompage photovoltaïque ». Mémoire d'ingénieur d'état en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2014.
- [2] Ouai Atallah. « Commande et gestion d'énergie d'une centrale photovoltaïques de grande puissance connectée à un réseau électrique ». Magister en électrotechnique, université Amar Telidj Laghouat, 2008.
- [3] Ballouti Adel. « Modélisation et simulation comportementale des systèmes à énergie renouvelable par VHDL-AMS ». Doctorat en Sciences, département en électronique, Université Ferhat Abbas STIF, 2018.
- [4] Rachid Haddad. « Gestion énergétique d'un système hybride éolien-photovoltaïque ». Mémoire de master en génie électrique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 08/07/2018.
- [5] Foudil Zakaria, Adjeneq Amine. « Etude expérimental d'un système hybride photovoltaïque-thermique pour la production d'électricité et de l'eau chaude ». Mémoire de master Génie Mécanique, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2023.
- [6] Chouali Massissillia, Dilem Thanina. « Gestion d'énergie d'un système hybride éolien photovoltaïque avec système de stockage ». Mémoire de master électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Le 26/10/2022.
- [7] Chadlia Hanene, Baghana Chems Edine. « Installation d'une centrale photovoltaïque dans le réseau d'Adrar (P. I.A.T) ». Mémoire de master électrotechnique, université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2019.
- [8] Bendahou Djamel, Bourouis El-Abbes. « Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant l'optimisation par essaim de particules ». Mémoire de master électrotechnique, université Saad Dahlab de Blida, 2013.
- [9] Ammour Wissam Elhouaria, Yazid Sarah. « Emulation de panneaux photovoltaïques avec effet d'ombrage pour tester les algorithmes MPPT ». Mémoire de master électrique, université Ibn-Khaldoun de Tiart, 2023.

- [10] Amara Karima ; « Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension ». Mémoire de magister en électronique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015
- [11] Sabiha Karnou, Djamel Idir, Kheddoudja Manseur. « Simulation d'un émulateur d'un panneau photovoltaïque en utilisant un hacheur Buck sous Matlab Simulink ». Mémoire de master en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [12] Benblidia Houssam, Kerkar Amar. « Étude de l'effet de l'ombrage sur un système photovoltaïque ». Mémoire de master en système de vision et robotique, université Saad Dahlab de Blida, 2015.

المخلص

يتميز النظام الكهروضوئي بخصائص $I=f(V)$ لتحقيق أفضل أداء، من الضروري أن يعمل النظام دائماً عند نقطة القوة القصوى (MPP) بغض النظر عن تغييرات الطقس. لقد طورنا طريقة التغيير والمراقبة (P&O) مع تتبع المرجع لمتابعة نقطة القوة القصوى وتعزيز تتبع نقطة القوة القصوى (MPPT) لتحقيق هذا الهدف، بدأنا أولاً بمراجعة الحالة الفنية للطاقة الكهروضوئية، ثم قمنا بنمذجة ومحاكاة النظام الكهروضوئي باستخدام MATLAB Simulink تحت ظروف مختلفة.

الكلمات المفتاحية

النظام الكهروضوئي، المحاكاة، نقطة القوة القصوى (MPP)، تتبع نقطة القوة القصوى (MPPT)، التغيير والمراقبة مع تتبع المرجع

Résumé

Un système photovoltaïque présente une caractéristique $I=f(V)$, pour un meilleur rendement celui-là est appelé à fonctionner toujours en son point de puissance maximale quel que soit les changements météorologique. Nous avons développé la méthode P&O avec suivie de référence pour suivre le PPM afin d'augmenter le MPPT. Pour atteindre cet objectif nous avons commencé d'abord par l'état de l'art de l'énergie photovoltaïque, ensuite nous avons modélisé et simuler le système photovoltaïque sous MATLAB Simulink sous différentes conditions

Mots clés

Système photovoltaïque, Simulation, Point Puissance Maximal (PPM), MPPT, P&O avec suivie de référence

Summary

A photovoltaic system has a characteristic $I=f(V)$. For optimal performance, it is essential for the system to always operate at its Maximum Power Point (MPP), regardless of weather changes. We developed the Perturb and Observe (P&O) method with reference tracking to follow the MPP and enhance the Maximum Power Point Tracking (MPPT). To achieve this goal, we first reviewed the state of the art in photovoltaic energy, then modeled and simulated the photovoltaic system using MATLAB Simulink under various conditions.

Keywords

Photovoltaic system, Simulation, Maximum Power Point (MPP), MPPT, Perturb and Observe with reference tracking

