

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de

L'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Université A. MIRA-BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Électrique



Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électromécanique

Spécialité : Électromécanique

Thème :

**Evaluation des performances d'un générateur photovoltaïque
installé en milieu urbain**

Préparé par :

Mr. MEZABER Toufik

Mr. MESROUA Lounes

Encadré par :

Mr. MOHAMMEDI Ahmed

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

Nous exprimons tout d'abord notre profonde gratitude à Dieu le Tout-Puissant pour nous avoir accordé la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier sincèrement notre encadrant, Monsieur Mohammedi Ahmed, dont l'expertise, le soutien constant et les conseils éclairés ont rendu ce projet réalisable.

Nous sommes reconnaissants envers les membres du jury pour l'attention portée à notre travail et pour avoir honoré notre mémoire de leur présence.

Enfin, nous adressons nos plus vifs remerciements à nos parents, à nos familles, ainsi qu'à nos amis et camarades, dont le soutien indéfectible a été essentiel au bon déroulement de ce travail.

Nous prions Dieu de leur accorder longue vie et bonne santé.

Dédicaces

*Je voudrais dédier cet humble travail A mes chers Parents,
Vous avez veillé sur moi depuis ma naissance jusqu'à ce que je
suis, vous m'avez assuré une vie digne.*

*Aujourd'hui, vient mon tour pour vous remercier en vous
offrant ce travail qui est le fruit de vos sacrifices.*

*A mon père, pour son soutien inconditionnel, ses
encouragements,
et pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les
meilleures conditions.*

*A ma mère pour m'avoir soutenu, accompagné et surtout
encouragé tout au long de ce travail.*

A mes sœurs bien aimées

A mon frère

A mes meilleurs amis

*Ces années pour moi ont été l'occasion de connaître des
personnes exceptionnelles
qui m'ont tout simplement offrent leur sincère amitié et avec
qui j'ai partagé d'agréables moment, je dédie très
chaleureusement a mes amies.*

A tout ce que j'aime et qui m'aiment.

Lounes

Dédicaces

Je dédie ce travail aux deux personnes les plus chères au monde, mes parents, pour tout leur amour, leur encouragement, leurs conseils, leurs sacrifices, leur patience et leur confiance.

Je dédie également ce travail à mes grands-parents pour leur amour et leur soutien indéfectible.

Je pense à mes deux chers frères, mes deux sœurs, mes cousins ainsi qu'à tous mes amis et proches qui ont été présents à mes côtés tout au long de cette aventure.

Merci pour votre soutien inconditionnel, vos encouragements et vos précieux conseils. Vous avez été ma source de motivation et de force dans les moments difficiles.

Toufik

Table des matières

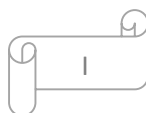
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux	IV
Liste des symboles et abréviations.....	V
INTRODUCTION GENERALE :	1

CHAPITRE I :ETAT DE L'ART SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

I.1.Introduction	5
I.2. L'énergie non renouvelable.....	5
I.2.1. Les sources d'énergie non renouvelables :	5
I.3. Energies renouvelables :.....	6
I.3.1. La biomasse :	6
I.3.2. Energie hydraulique :	7
I.3.3. Energie géothermique :.....	7
I.3.4. Energie éolienne :	8
I.3.5. Energie solaire :	8
I.4. Le solaire photovoltaïque :	9
I.4.1. Historique de l'énergie photovoltaïque :	9
I.4.2. Principe de fonctionnement :	9
I.4.3. Types des cellules photovoltaïques :	10
I.4.4. Caractéristiques électriques :	13
I.4.5. Association des cellules PV (le module PV) :	14
I.4.6. Les différents types des systèmes photovoltaïques	16
I.4.7. Systèmes photovoltaïques :	16
I.4.8. Avantages et inconvénients des systèmes PV	18
I.10.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque:	18
1.5. Conclusion :	19

CHAPITRE II :DEFAUTS DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

II.1. Introduction.....	21
II.2. Défauts liés à la dégradation de la production d'un générateur photovoltaïque.....	21
II.2.1. Défauts liés à la fabrication	21
II.2.2. Défauts liés au mauvais fonctionnement.....	23
II.3. Défaut de non homogénéité de l'ensoleillement (Ombrage)	26



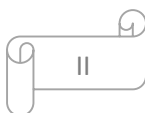
II.3.1. Rayonnement solaire	26
II.3.2. Ombrage	27
II.3.3. Fonctionnement en mode ombragé	28
II.4. Conclusion	30

CHAPITRE III : EVALUATION DES PERFORMANCES D'UN GENERATEUR INSTALLE EN MILIEU URBAIN

III.1. Introduction	32
III.2. Modélisation du générateur photovoltaïque	32
III.2.1. Modèle à une diode :	32
III.2.2. Modèle à deux diodes :	33
III.3 : Simulation et travail réalisé	34
III.3.1. Architectures adoptées	34
III.3.2. Cas d'ombre horizontale	36
III.3.3. Cas d'ombre verticale	39
III.3.4. Cas d'ombre diagonal	41
III.4. Discussion des résultats	44
III.5. Conclusion :	44

CONCLUSION GENERALE 46

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE



Liste des figures

Chapitre I

État de l'art sur les énergies renouvelables

Figure I.1: Centrale thermique à combustible fossile	5
Figure I.2: Centrale nucléaire.....	6
Figure I.3: Centrale biomasse	6
Figure I.4: Centrale hydroélectrique	7
Figure I.5: Centrale géothermique	7
Figure I.6: Eolienne à axe horizontal	8
Figure I.7: Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire	8
Figure I.8: Principe de fonctionnement d'une cellule PV	10
Figure I.9 : Cellule monocristalline.	11
Figure I.10 : Cellule multicristalline.	11
Figure I.11 : Les couches minces (cellule au Silicium amorphe).	12
Figure I.12 : Cellule solaire organique sur substrat souple.....	13
Figure I.13 : Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	14
Figure I.14: Cellule, module, panneau, champ photovoltaïque	14
Figure I.15: caractéristique de 3 cellules photovoltaïques associées en série.....	15
Figure I.16: Caractéristique de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.....	15
Figure 1.17: Représentation des différents composants d'une installation PV	16
Figure I.18 : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.	17
Figure I.19 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau.....	17
Figure I.20 : Schéma d'une installation du système hybride.	18

CHAPITRE II :

DEFAUTS DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Figure II.1 : Microfissures dans les cellules solaires	21
Figure II.2 : Mauvaise soudure des cellules photovoltaïques	22
Figure II.3 : Problème d'onduleur photovoltaïque	23
Figure II.4 : Panneaux photovoltaïques inaccessibles	23
Figure II.5 : Défauts de câblage.....	24
Figure II.6 : Défauts de câblage.....	24
Figure II. 7: Défaut de nettoyage des panneaux solaires	25
Figure II.8 : Décoloration des panneaux.....	25
Figure II.9 : Les différents types de rayonnement	26

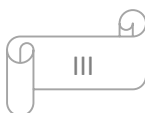


Figure II.10 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal	27
Figure II.11 : Ombrage partiel sur les panneaux photovoltaïque	28
Figure II.12 : Ombrage total sur les panneaux photovoltaïque.....	28
Figure II.13 : Fonctionnement en mode ombragé.....	29
Figure II.14: Mode de protection en cas d'ombrage.....	30

Chapitre III

Évaluation des performances d'un générateur installé en milieu urbain

Figure III.1 : Modèle à une diode	32
Figure III.2: Modèle équivalent à deux diodes.....	33
Figure III.3: Architectures adoptées	35
Figure III.4: Caractéristiques électriques du générateur dans les conditions STC.....	36
Figure III.5: Caractéristiques électriques du générateur à l'état sain (800 W/m^2)	37
Figure III.6: Cas d'ombrage horizontal	37
Figure III.7: Résultats obtenus pour un cas d'ombrage horizontal	38
Figure III.8: Comparaison des architectures adoptées dans le cas d'une ombre horizontale .	39
Figure III.9: Cas d'ombrage vertical	39
Figure III.10: Résultats obtenus pour un cas d'ombrage vertical.....	40
Figure III.11: Comparaison des architectures adoptées dans le cas d'une ombre verticale ...	40
Figure III.12: Cas d'ombrage diagonal.....	41
Figure III.13: Résultats obtenus pour un cas d'ombrage diagonal	42
Figure III.14: Comparaison des architectures adoptées dans le cas d'une ombre diagonale .	42
Figure III.15: Comparaison des architectures adoptées pour une ombre de 2 rangés.....	43

Liste des tableaux

Chapitre I

État de l'art sur les énergies renouvelables

Tableau I.1 : Rendement des cellules PV en silicium	12
--	----

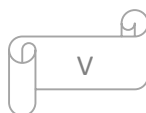
Chapitre III

Évaluation des performances d'un générateur installé en milieu urbain

Tableau III.1 : Paramètres du panneau utilisé	36
Tableau III.2 : Tableaux récapitulatif des résultats	43

Symboles et Abréviations

- **A** : Facteur d'idéalité de la jonction ($1 \leq n \leq 1.5$)
- **CdTe** : Tellure de cadmium
- **CIS** : Diséleniure de cuivre et d'indium
- **CIGS** : Diséleniure de gallium.
- **DC/DC, DC/AC** : Convertisseurs continu/continu et continu/Alternatif
- **FF** : facteur de remplissage
- **GPV** : Générateur Photovoltaïque
- **I_{ph}** : Photo-courant du module
- **I_0** : Courant de saturation inverse de la diode
- **I_{D1} et I_{D2}** : courant de saturation des diodes
- **I_{cc}** : Courant de court-circuit
- **I_{pm}** : Courant au point de la puissance maximal
- **K** : Constante de Boltzmann
- **m-si** : Silicium monocristallin
- **N** : Borne négative de la jonction
- **P** : Borne positive de la jonction
- **Pm** : puissance maximale produite dans des conditions standards (STC)
- **PV** : photovoltaïque
- **p-si** : Silicium poly cristallin
- **q** : Charge de l'électron
- **Sia** : le silicium amorphe
- **STC** : Standard Test Condition
- **T** : Température des cellules variant en fonction de l'éclairement et de la température ambiante
- **V_{co}** : La tension en circuit ouvert
- **V_{pm}** : voltage au point de la puissance maximal
- **Vm** : tension au Maximum Power Point



Introduction générale

Introduction générale :

La question énergétique mondiale est devenue un enjeu crucial au cours des dernières décennies, avec une dépendance persistante aux combustibles fossiles et une pression croissante sur les ressources naturelles. Cette situation a engendré des défis environnementaux majeurs, mettant en lumière la nécessité impérieuse de transitions vers des sources d'énergie plus durables et renouvelables [01].

Les énergies renouvelables, en particulier, émergent comme des alternatives essentielles pour répondre à cette crise énergétique globale. Parmi ces sources, l'énergie solaire photovoltaïque se distingue par sa capacité à convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité, grâce à l'effet photovoltaïque [02-03].

Notre mémoire se concentre précisément sur l'optimisation des générateurs photovoltaïques dans des conditions d'ombrage partiel, afin de maximiser leur efficacité et leur production d'énergie sous différentes contraintes environnementales. Dans ce contexte, notre objectif est de développer et valider des architectures de générateurs photovoltaïques adaptés à ces conditions variées.

Pour ce faire, notre travail est structuré en trois chapitres distincts :

Dans le premier chapitre, nous posons les fondements théoriques de l'énergie solaire photovoltaïque. Nous abordons l'historique de son développement, les principes de fonctionnement des cellules photovoltaïques, les différents types de cellules disponibles sur le marché et leur association pour former des modules photovoltaïques. Nous discutons également des avantages et des inconvénients des systèmes photovoltaïques dans le contexte actuel de transition énergétique mondiale.

Le deuxième chapitre est dédié à l'analyse des défauts potentiels rencontrés dans les systèmes photovoltaïques. Nous examinons les défauts liés à la fabrication des cellules ainsi que ceux attribuables à des conditions de fonctionnement défectueuses. Une attention particulière est portée sur les différents types de rayonnement solaire et leurs effets sur la performance des installations photovoltaïques, notamment en ce qui concerne les problématiques liées à l'ombrage partiel.

Introduction générale

Le dernier chapitre de notre mémoire traite la reconfiguration et de la simulation des générateurs photovoltaïques sous plusieurs scénarios d'ombrage partiel. Notre objectif est d'identifier les meilleures configurations de ces systèmes afin de maximiser la production d'électricité malgré les contraintes environnementales variables. Nous présentons également une analyse comparative des performances des différentes architectures de générateurs photovoltaïques sous différents angles d'ombrage.

Nous terminons par une conclusion générale

Chapitre I

Etat de l'art sur les énergies renouvelables

I.1.Introduction

Pendant longtemps, les humains ont utilisé de l'énergie pour leurs besoins essentiels comme se chauffer, cuisiner et se déplacer. L'énergie, qui prend différentes formes comme la chaleur et l'électricité, est très importante dans notre monde. Grâce aux progrès technologiques, nous pouvons maintenant obtenir de grandes quantités d'énergie à partir de différentes sources comme le pétrole, le soleil, l'eau et le vent. L'énergie joue un rôle important dans la politique, l'économie, la société et l'environnement aujourd'hui [01].

I.2. L'énergie non renouvelable :

Une énergie qui s'épuise lentement ou qui ne se renouvelle pas du tout sur une courte période est appelée non renouvelable.

I.2.1. Les sources d'énergie non renouvelables :

I.2.1.1. L'énergie fossile :

On distingue trois grandes sources d'énergie fossiles :

- **Le gaz naturel :** Se forme principalement à partir de matières organiques dans l'océan, transformées en kérogène à haute température et pression. Il peut également se former à faible profondeur grâce à la fermentation bactérienne dans les sédiments organiques.
- **Le charbon:** Le charbon vient d'une substance appelée kérogène qui se forme à partir de la décomposition de matières végétales, il se trouve principalement dans les couches de terre.
- **Le pétrole :** Le pétrole brut est une sorte d'huile noire et épaisse qu'on trouve sous terre, fabriquée à partir d'animaux et de plantes morts. En le traitant, on peut obtenir des carburants. Quand on brûle ces carburants, on produit de l'énergie. [03]

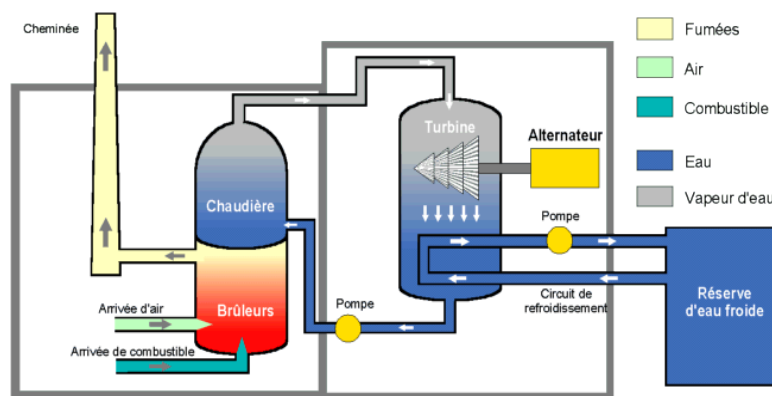


Figure I.1: Centrale thermique à combustible fossile

I.2.1.2. L'énergie fissile :

Dérivée de ressources épuisables comme l'uranium et le plutonium, provient de réactions nucléaires au cœur des atomes. Lorsque les noyaux atomiques se transforment, cela libère beaucoup de chaleur. Les centrales nucléaires utilisent cette chaleur pour produire de l'électricité.

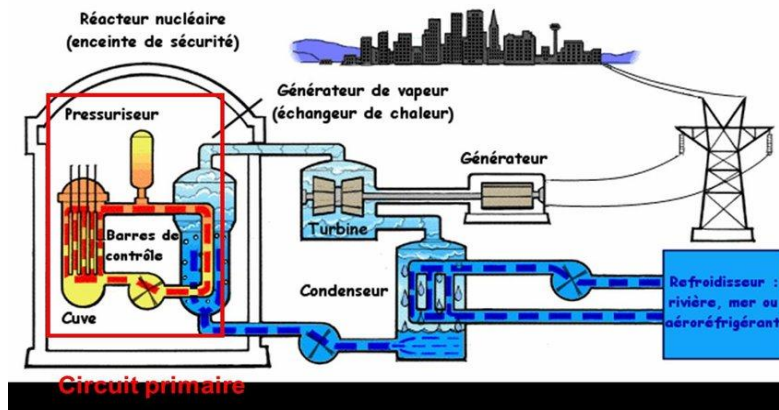


Figure I.2: Centrale nucléaire

I.3. Energies renouvelables :

Les énergies renouvelables, telles que le soleil, le vent et l'eau, sont des sources d'énergie infinies. Elles sont propres, produisant peu ou pas de déchets ni de pollution. Malgré leur énorme potentiel, elles ne sont pas pleinement exploitées [04].

Il y a cinq sources principales d'énergies renouvelables sont :

I.3.1. La biomasse :

La bioénergie, ou énergie de la biomasse, vient de matières organiques comme le bois, la paille, les huiles et les déchets végétaux. Elle utilise l'énergie solaire stockée dans les plantes par la photosynthèse, comme les combustibles fossiles. Actuellement, elle est principalement obtenue à partir de la combustion du bois dans l'industrie papetière, à partir de solides et de liquides [05].

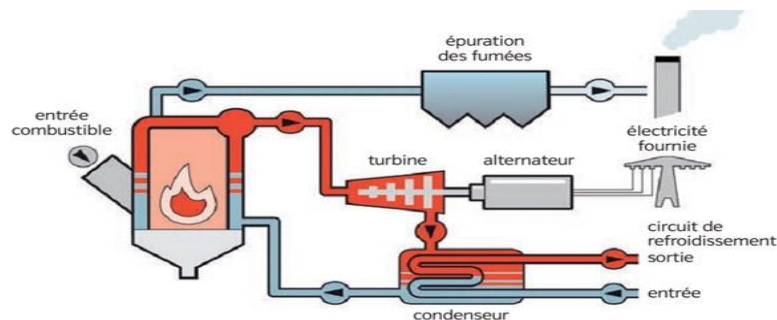


Figure I.3: Centrale biomasse

I.3.2. Energie hydraulique :

L'énergie hydraulique vient du mouvement de l'eau, que ce soit des chutes, des rivières, des marées ou des vagues. On peut l'utiliser directement, comme avec un moulin à eau, ou la transformer en électricité dans une centrale hydroélectrique [06].

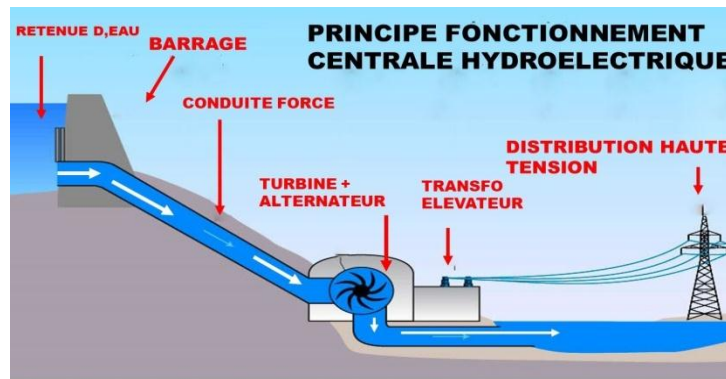


Figure I.4: Centrale hydroélectrique

I.3.3. Energie géothermique :

L'énergie géothermique est la chaleur naturelle stockée sous la surface de la Terre. Partout, la température croît depuis la surface vers l'intérieur de la Terre. Selon les régions, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3°C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Une partie de l'énergie géothermique provient des échanges thermiques avec les profondeurs de la Terre, où les températures varient de 1000°C à 4300°C. Toutefois, l'exploitation de cette chaleur requiert des formations géologiques poreuses ou perméables, contenant des aquifères. On distingue quatre types de géothermie : la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie [05]

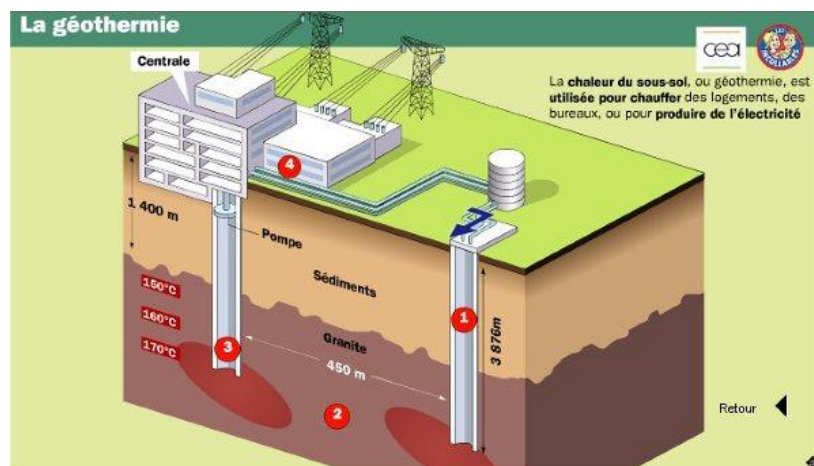


Figure I.5: Centrale géothermique

I.3.4. Energie éolienne :

Les éoliennes captent la force du vent avec leurs pales pour produire de l'électricité. Elles sont placées sur terre ou en mer où le vent est fort et constant. Pour fonctionner, le vent doit souffler à au moins 4 m/s. Les pales entraînent un rotor qui convertit l'énergie mécanique en électricité. La production d'énergie augmente avec la vitesse du vent jusqu'à une limite de 12 m/s. Au-delà, la production est limitée pour éviter d'endommager l'éolienne. Elle est arrêtée lorsque les vents dépassent 25 m/s pour des raisons de sécurité. [06]

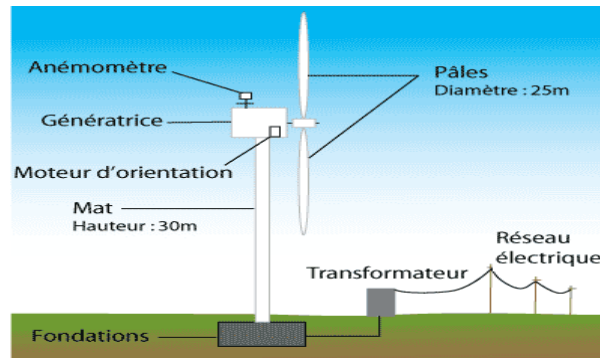


Figure I.6: Eolienne à axe horizontal

I.3.5. Energie solaire :

L'énergie solaire est abondante et disponible partout sur terre. Chaque heure, le soleil émet suffisamment d'énergie pour couvrir les besoins mondiaux en énergie pendant un an. La terre intercepte seulement une petite partie de cette énergie. On mesure cette énergie par la constante solaire, qui est d'environ 1367 W/m^2 [07].

Cette énergie peut être utilisée pour produire de la chaleur ou de l'électricité.

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la lumière du soleil pour chauffer l'eau et les espaces à l'aide de capteurs solaires spéciaux. Ces capteurs chauffent un fluide qui transporte ensuite la chaleur [06].

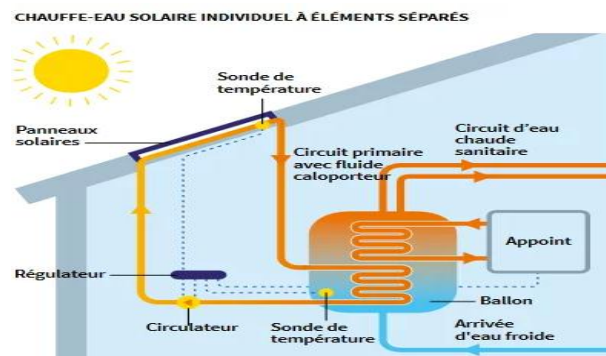


Figure I.7: Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire

L'énergie solaire photovoltaïque fonctionne en absorbant la lumière du soleil à l'aide de cellules spéciales qui créent une tension électrique. Ces cellules convertissent le rayonnement solaire en courant continu, pouvant être utilisé pour alimenter des appareils ou recharger des batteries. La baisse des coûts a élargi son utilisation à la production d'électricité sur les réseaux électriques[05].

I.4. Le solaire photovoltaïque :

I.4.1. Historique de l'énergie photovoltaïque :

Le terme "photovoltaïque" trouve son origine dans le grec ancien, où "photo" désigne la lumière, et "voltaïque" est en référence à Alessandro Volta, un physicien italien (1754-1827) connu pour ses travaux sur l'électricité. Ainsi, "photovoltaïque" peut être compris comme signifiant "lumière électricité". [08]

Voici quelques dates clés dans l'histoire de l'énergie solaire photovoltaïque : [09]

- **1839** : Edmond Becquerel, un physicien français, découvre l'effet photovoltaïque.
- **1875** : Werner Von Siemens présente un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs devant l'académie des sciences de Berlin.
- **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, fabriquent une cellule photovoltaïque.
- **1958** : Les premiers satellites équipés de cellules solaires, avec un rendement de 9%, sont lancés dans l'espace.
- **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.
- **1983** : En Australie, la première voiture fonctionnant à l'énergie solaire parcourt 4000 km.

I.4.2. Principe de fonctionnement :

La cellule photovoltaïque fonctionne grâce à des semi-conducteurs. Lorsqu'ils sont touchés par des photons, ils libèrent des électrons à la vitesse de 300 000 km/s. Ces photons, décrits par Einstein comme des "grains de lumière", arrachent des électrons des atomes de silicium. Ces électrons se déplacent, créant un courant électrique. Pour faciliter ce mouvement, on utilise deux types de silicium : l'un dopé avec des atomes de phosphore pour plus d'électrons, et l'autre avec des atomes de bore pour moins d'électrons. Cela crée une polarité, avec une borne négative (N) et une borne positive (P). Un champ électrique se forme entre elles. Les photons excitent les électrons, les faisant migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que

les "trous" se déplacent vers la zone P. Les électrons sont capturés par des contacts électriques pour alimenter un circuit externe en électricité, créant ainsi un courant continu. Une couche antireflet évite la perte de photons en les empêchant de rebondir sur la surface.

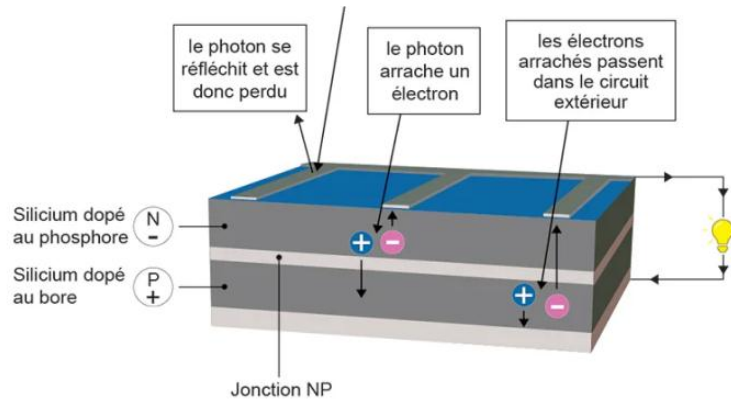


Figure I.8: Principe de fonctionnement d'une cellule PV

I.4.3. Types des cellules photovoltaïques :

Différents types de cellules photovoltaïques utilisent une variété de semi-conducteurs. Actuellement, trois grandes technologies dominent : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques.

I.4.3.1. Le silicium :

Actuellement, la technologie silicium domine largement la production mondiale de panneaux photovoltaïques. Ce matériau est choisi pour sa disponibilité abondante, sa stabilité et son caractère non toxique. Cette technologie comprend plusieurs variantes, différenciées par le type de silicium utilisé et/ou le processus de fabrication. On distingue notamment le silicium monocristallin et le silicium multicristallin [10,11].

⇒ Le silicium mono-cristallin:

Lors du processus de refroidissement, le silicium fondu se solidifie pour former un unique cristal de grande taille. Ce cristal est ensuite découpé en fines tranches qui serviront à produire les cellules photovoltaïques. Ces cellules présentent généralement une couleur bleue uniforme, intense et brillante. Bien qu'utilisées, elles ne dominent pas le marché de l'énergie solaire. Le silicium monocristallin affiche le rendement le plus élevé, variant entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Cependant, son coût élevé représente actuellement un inconvénient majeur, ce qui conduit à une perte de terrain au profit du silicium multicristallin.

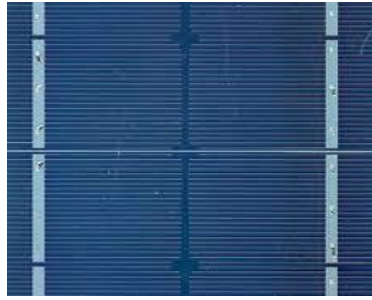


Figure I.9 : Cellule monocristalline.

⇒ **Le silicium multicristallin (Polycristallin):**

Actuellement, le silicium multicristallin, également appelé polycristallin, est devenu la technologie prédominante dans le domaine photovoltaïque (Figure I.10). Elle représente à elle seule près de la moitié du marché. Ces cellules sont fabriquées en coulant du silicium en cristaux, ce qui confère à leur structure une certaine hétérogénéité. Bien que leur rendement soit légèrement inférieur à celui du silicium monocristallin, se situant entre 10 et 14% selon les fabricants, leur processus de fabrication est plus simple, entraînant des coûts de production inférieurs.

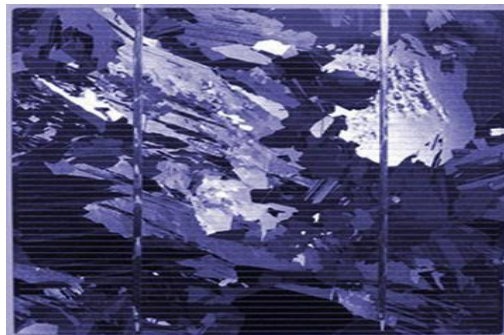


Figure I.10 : Cellule multicristalline.

I.4.3.2. Les couches minces :

La technologie des cellules à couche mince, avec le silicium amorphe (Sia) comme variante la plus développée, représentait plus de 7% du marché mondial en 2008. Son principal avantage réside dans l'utilisation de substrats peu coûteux. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre, offrant la possibilité de produire des cellules flexibles en le déposant sur des substrats souples. Bien que leur coût soit inférieur à celui des cellules cristallines, le rendement des cellules en Sia est plus faible, environ 7%. De plus, l'utilisation de ces cellules nécessite une isolation galvanique entre les modules et le réseau.

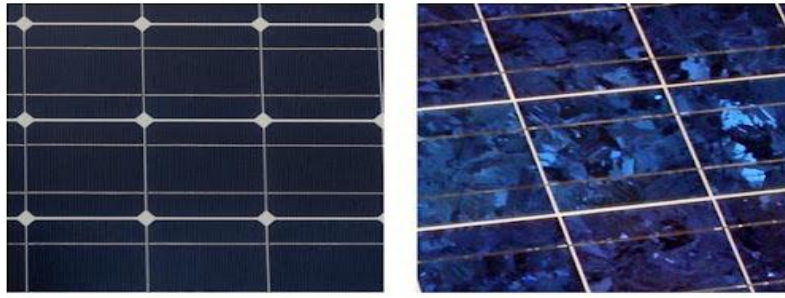


Figure I.11 : Les couches minces (cellule au Silicium amorphe).

En l'absence d'une isolation galvanique adéquate, les cellules amorphes connaissent une dégradation rapide, bien que les raisons physiques précises de ce phénomène demeurent floues. Ces cellules présentent une grande capacité à capter le rayonnement diffus, ce qui les rend moins sensibles aux fluctuations du rayonnement direct. Elles constituent donc une alternative intéressante aux cellules cristallines dans les environnements sujets à des ombrages prononcés. D'autres matériaux sont également utilisés dans les technologies à couches minces, tels que le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS), ainsi que le diséléniure de gallium (CIGS). Ces technologies affichent des rendements compétitifs, pouvant atteindre jusqu'à 19%. Malgré leur potentiel, les préoccupations liées à leur toxicité environnementale et à l'approvisionnement en matières premières limiteront probablement leur utilisation à des applications spécifiques ou à des expérimentations en laboratoire. [12]

Type de cellule	Rendement en Laboratoire	Rendement de production
Silicium amorphe (a-si)	13%	5-6%
Silicium monocristallin (m-si)	24.7%	13-17%
Silicium poly cristallin (p-si)	19.8%	11-15%

Tableau I.1 : Rendement des cellules PV en silicium

I.4.3.3. Cellules organiques et plastiques :

L'effet photovoltaïque observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques a connu une forte croissance au cours de la dernière décennie. Initialement, les rendements de conversion étaient très faibles, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. Cependant, une avancée significative a été réalisée lorsque les cellules, composées d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, ont atteint un rendement de

conversion de 0,95%. Ces cellules se divisent en deux catégories : les cellules "humides" et les cellules polymères organiques, également appelées cellules "plastiques". Les progrès dans ces technologies sont très rapides, avec des records de rendement fréquemment battus (actuellement près de 6%). Cependant, le principal défi pour ces technologies réside actuellement dans la stabilité de leurs performances et leur durée de vie, actuellement d'environ 1000 heures. La figure I.12 présente une illustration d'une cellule solaire entièrement organique sur un substrat souple.

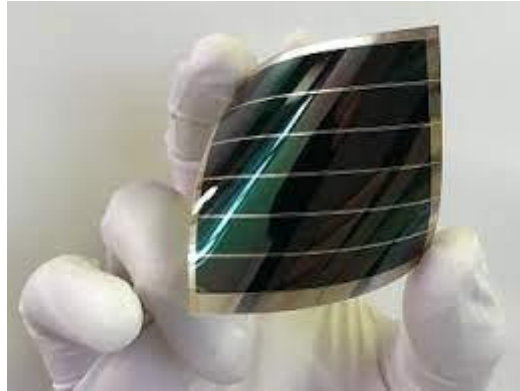


Figure I.12 : Cellule solaire organique sur substrat souple

Ces cellules présentent un intérêt notable du fait que, contrairement à celles fabriquées à partir de matériaux inorganiques, elles peuvent être déposées sur de grandes surfaces à grande vitesse grâce à des techniques d'impression classiques. Elles ouvrent ainsi la voie à des applications légères, nomades et flexibles. De plus, en raison de coûts de fabrication et de matériaux plus bas, elles devraient être considérablement moins onéreuses que leurs alternatives. [13,14]

I.4.4. Caractéristiques électriques :

La courbe de la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est montrée dans la Figure I.13. Dans des conditions de court-circuit, le courant généré est à son maximum (I_{sc}), tandis que lorsque le circuit est ouvert, la tension (V_{oc}) est à son maximum. Dans les deux conditions susmentionnées, l'énergie électrique produite dans la cellule est nulle, alors que dans toutes les autres conditions, lorsque la tension augmente, l'énergie produite augmente également : elle atteint tout d'abord le Maximum Power Point (P_m) puis elle chute soudainement jusqu'à approcher la valeur de tension à vide. Par conséquent, les données caractéristiques d'une cellule solaire peuvent être résumées comme suit :

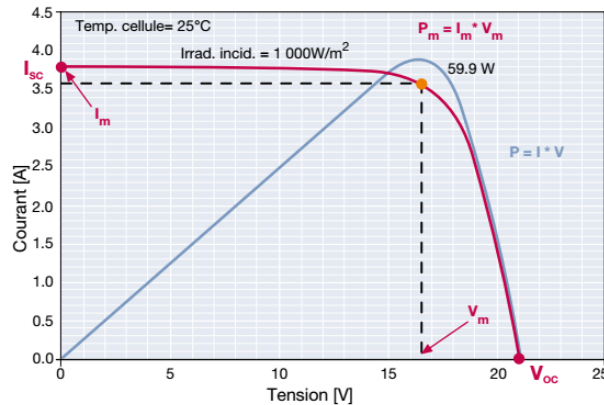


Figure I.13 : Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque

- I_{cc} : courant de court-circuit ;
- V_{co} : tension à vide ;
- P_m : puissance maximale produite dans des conditions standards (STC) ;
- I_m : courant produit au Maximum Power Point ;
- V_m : tension au Maximum Power Point ;
- FF facteur de remplissage : c'est un paramètre qui détermine la forme de la courbe de la caractéristique V-I et c'est le rapport entre la puissance maximale et le produit ($V_{co} \cdot I_{cc}$) de la tension à vide multipliée par le courant de court-circuit.

1.4.5. Association des cellules PV (le module PV) :

L'association des cellules photovoltaïques (le module PV) est un processus clé dans les systèmes solaires. Une cellule solaire, qui peut être ronde ou carrée, est la pièce de base de ce système. Ces cellules sont connectées électriquement les unes aux autres et enveloppées ensemble pour former un module solaire, les protégeant ainsi des éléments extérieurs. Plusieurs de ces modules constituent un panneau solaire. Ces panneaux sont ensuite assemblés pour former un système ou un champ solaire, auxquels on ajoute divers dispositifs de protection, un régulateur.



Figure I.14: Cellule, module, panneau, champ photovoltaïque

On utilise le terme "générateur photovoltaïque" (GPV) pour parler d'un module ou d'un panneau solaire, selon le contexte. Mais parfois, il désigne l'ensemble du système solaire. La caractéristique $I(V)$ d'un module solaire ou photovoltaïque ressemble à celle d'une simple cellule solaire.

I.4.5.1. Association des cellules en série :

Dans une association en série, les cellules laissent passer le même courant et la caractéristique résultante est simplement la somme des tensions à un courant donné.

La figure (I.15) illustre cette caractéristique résultante (I_{sc} , V_{oc}) obtenue en mettant en série N_s cellules, [15].

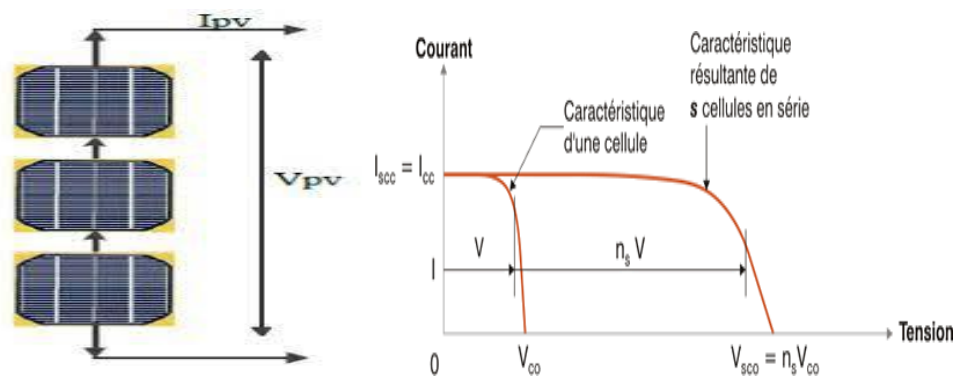


Figure I.15: caractéristique de 3 cellules photovoltaïques associées en série

I.4.5.2. Association des cellules en parallèle :

En associant des cellules en parallèle, toutes les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique du groupement est simplement la somme des courants à une tension donnée.

La figure (I.16) illustre cette caractéristique résultante (I_{pc} , V_{pc0}) obtenue en mettant en parallèle N_p cellules [15].

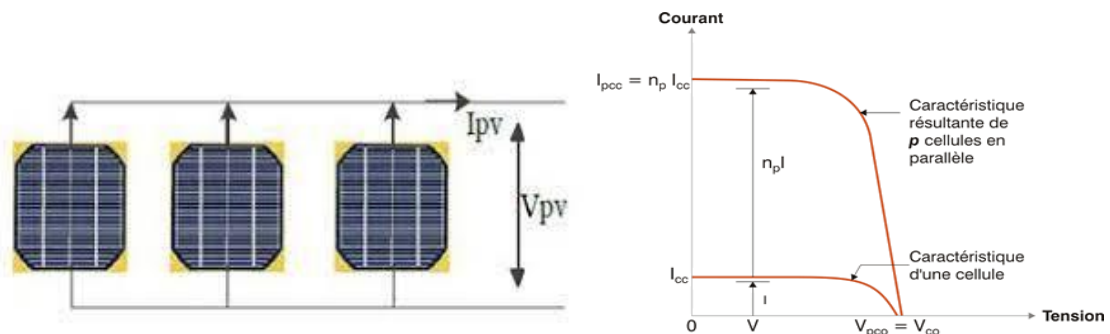


Figure I.16: Caractéristique de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle

I.4.6. Les différents types des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont idéaux pour produire de l'électricité dans des endroits éloignés, comme les maisons hors réseau. Ces systèmes sont composés de modules solaires qui capturent la lumière du soleil, de batteries pour stocker l'énergie produite, d'un régulateur pour protéger la batterie et ajuster la tension, d'un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif utilisable, et de câbles pour relier les composants entre eux. [16]

En résumé, une installation photovoltaïque comprend généralement un générateur photovoltaïque, des convertisseurs DC/DC et DC/AC, ainsi qu'un système de régulation et de stockage.

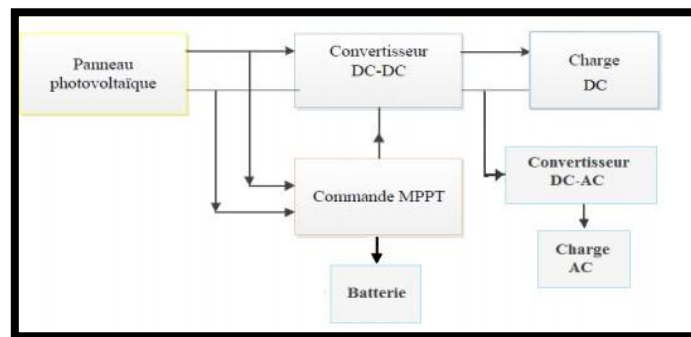


Figure 1.17: Représentation des différents composants d'une installation PV

I.4.7. Systèmes photovoltaïques :

I.4.7.1. Installations photovoltaïques autonomes :

Les installations électriques photovoltaïques autonomes fonctionnent sans avoir besoin d'autres sources d'énergie et sont déconnectées du réseau électrique. Elles alimentent les utilisateurs en électricité, souvent avec l'aide de batteries pour stocker l'énergie. Ces systèmes sont couramment utilisés pour alimenter des maisons dans des endroits isolés comme les îles ou les régions montagneuses, ainsi que pour des applications telles que la surveillance à distance et le pompage de l'eau. La figure I.18 illustre un exemple de système photovoltaïque autonome, soulignant l'importance des éléments de stockage pour assurer une alimentation continue, même en cas de baisse de la production d'électricité. [05] Les systèmes photovoltaïques offrent alors une solution abordable, facile à entretenir et à déployer, offrant ainsi aux populations un accès à l'électricité.

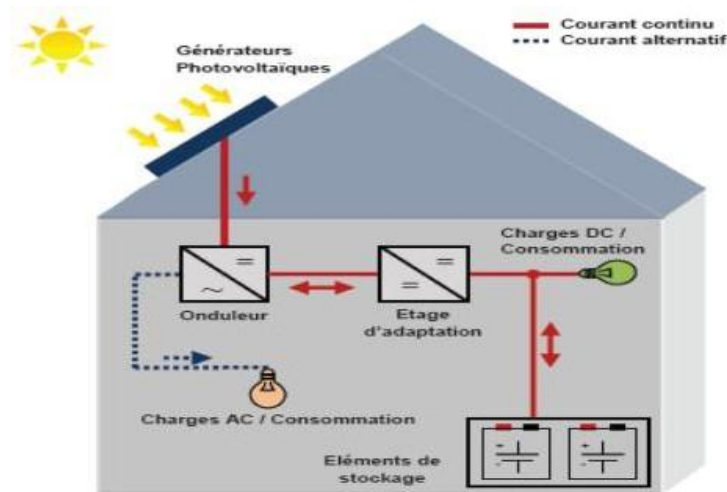


Figure I.18 : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.

I.4.7.2. Installations photovoltaïques raccordées au réseau :

Le champ photovoltaïque est connecté directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur DC/AC. En général, l'énergie est stockée dans le réseau lui-même, donc les batteries ne sont pas indispensables, sauf si vous souhaitez une source d'énergie autonome lors des pannes de courant. L'électricité produite est utilisée localement, et l'excédent est envoyé dans le réseau, fournissant ainsi de l'énergie aux maisons la nuit ou lors des journées sans soleil. [05]

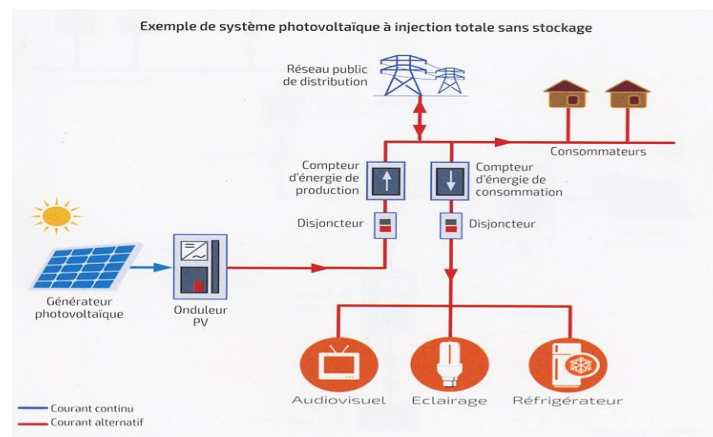


Figure I.19 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau.

I.4.7.3. Installations photovoltaïques hybride :

Systèmes de production énergétique hybride à partir de diverses sources :

Ces installations combinent différentes sources d'énergie telles que l'éolien, le diesel ou la cogénération avec l'énergie photovoltaïque. Elles sont déployées lorsque l'énergie nécessaire dépasse la capacité du générateur photovoltaïque individuel. [17]

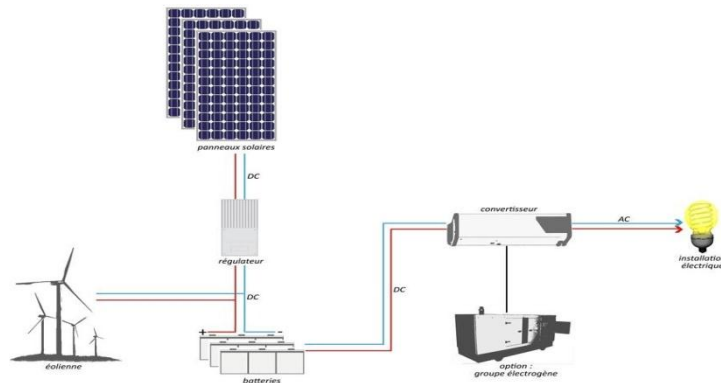


Figure I.20 : Schéma d'une installation du système hybride.

I.4.8. Avantages et inconvénients des systèmes PV

On peut citer les avantages et les inconvénients suivants :

I.4.8.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages [18] :

- Elle offre une source d'électricité renouvelable propre et fiable, sans émissions toxiques.
- En raison de leur petite taille et de leur fonctionnement silencieux, les systèmes photovoltaïques sont particulièrement adaptés aux environnements urbains.
- Étant donné que la lumière du soleil est disponible partout, l'énergie photovoltaïque peut être exploitée aussi bien en milieu montagnard isolé que dans les centres urbains denses.
- Cette forme d'électricité est produite localement, près du lieu de consommation, ce qui permet une distribution décentralisée directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux utilisés, tels que le verre et l'aluminium, résistent aux conditions climatiques difficiles, y compris la grêle.
- Les panneaux photovoltaïques ont une durée de vie très longue, atteignant généralement environ 25 ans.

I.10.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

La production d'énergie photovoltaïque est tributaire de l'ensoleillement, lequel varie constamment [18,19].

- Les coûts d'installation sont souvent très élevés.
- Les rendements de conversion sont généralement faibles.

- L'intégration de systèmes de stockage d'énergie, comme les batteries, augmente les coûts d'installation et peut engendrer une pollution lors de la fabrication.

1.5. Conclusion :

En résumé, nous avons examiné différents aspects des énergies renouvelables et non renouvelables, en mettant un accent particulier sur l'énergie photovoltaïque. Nous avons abordé son histoire, son fonctionnement et les différents types de cellules photovoltaïques disponibles. Nous avons également analysé les caractéristiques des cellules, leur combinaison pour former des systèmes photovoltaïques, ainsi que les avantages et inconvénients de cette source d'énergie. Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre l'importance croissante des énergies renouvelables dans le paysage énergétique mondial, en soulignant le rôle crucial de l'énergie photovoltaïque dans la transition vers un avenir plus écologique et durable.

Dans le chapitre suivant, nous introduirons les différents types de défauts pouvant survenir dans les systèmes photovoltaïques. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre les défis techniques et les solutions possibles pour optimiser la performance et la fiabilité des systèmes photovoltaïques.

CHAPITRE II :
DEFAUTS DANS LES SYSTEMES
PHOTOVOLTAÏQUES

II.1. Introduction

Les générateurs photovoltaïques jouent un rôle crucial. Cependant, malgré leur potentiel, ces systèmes ne fonctionnent pas toujours à leur régime optimal, rencontrant divers problèmes tels que des pertes optiques, thermiques, de connexion et de câblage, dus à l'ombrage, la dégradation, la conversion et la réflexion. Cette réalité diminue leur efficacité, soulevant ainsi des défis importants qui nécessitent une compréhension approfondie. Dans ce chapitre, nous examinerons les problèmes rencontrés par les systèmes photovoltaïques en explorant les divers facteurs influant sur leur efficacité et leur performance [20].

II.2. Défauts liés à la dégradation de la production d'un générateur photovoltaïque

Parmi les défauts qu'on peut rencontrer dans un système photovoltaïque, on peut citer:

II.2.1. Défauts liés à la fabrication

Les panneaux solaires sont fabriqués en usine, donc ils peuvent avoir des problèmes de fabrication. Certains de ces problèmes :

II.2.1.1. Microfissures sur les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques classiques sont extrêmement délicates. Les microfissures, comme leur nom l'indique, sont de petites fissures qui peuvent se former sur les panneaux et sont difficiles à repérer sans équipement spécifique. Avec le temps et les changements climatiques, ces fissures peuvent s'élargir et devenir plus apparentes, perturbant ainsi le flux d'énergie et diminuant l'efficacité énergétique de l'ensemble de l'installation. [21]



Figure II.1 : Microfissures dans les cellules solaires

II.2.1.2. Vieillessement des matériaux

La durée de vie limitée des matériaux utilisés dans la fabrication des générateurs photovoltaïques peut entraîner une dégradation de leur production. Les composants critiques tels que les cellules solaires et les matériaux d'encapsulation sont susceptibles de se détériorer progressivement au fil du temps, réduisant ainsi l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques. Cette réalité souligne l'importance cruciale d'investir dans des matériaux durables et de haute qualité pour assurer des performances optimales sur une période prolongée [22].

II.2.1.3. Interconnexion endommagée

Le principal facteur conduisant à la déconnexion est une soudure défectueuse entre le ruban d'interconnexion de la branche et celui de la cellule. Les tensions engendrées par le transport, les zones à haute température, les changements thermiques et les contraintes mécaniques récurrentes fragilisent le ruban d'interconnexion jusqu'à sa rupture. La proximité réduite entre les cellules favorise ce type de défaillance, pouvant entraîner des courts-circuits au niveau des cellules [23] [24].



Figure II.2 : Mauvaise soudure des cellules photovoltaïques

II.2.1.4. L'onduleur

Les pannes de l'onduleur photovoltaïque sont fréquentes et résultent souvent de la défaillance de ses composants électroniques, causée par le temps, les surtensions ou des défauts de fabrication. Ces pannes entraînent généralement l'arrêt de la production d'électricité solaire.

Les signaux les plus courants indiquant une panne incluent l'onduleur éteint, des voyants allumés de manière inhabituelle et des problèmes d'isolation. [25]



Figure II.3 : Problème d'onduleur photovoltaïque

II.2.1.5. Panneaux inaccessibles

Les panneaux photovoltaïques situés dans des endroits difficiles d'accès présentent un défi majeur pour la maintenance en raison de la difficulté accrue à effectuer des opérations de nettoyage, d'inspection et de réparation. Cette inaccessibilité peut entraîner des retards dans la détection des problèmes, affectant ainsi la performance globale du système et entraînant des pertes financières pour les propriétaires des installations [26].



Figure II.4 : Panneaux photovoltaïques inaccessibles

II.2.2. Défauts liés au mauvais fonctionnement

II.2.2.1. Mauvaise orientation des panneaux

Lorsqu'un panneau solaire est mal orienté, l'ombrage résultant réduit sa capacité à produire de l'électricité, entraînant une diminution significative de la production d'énergie. Pour pallier ce problème, une orientation précise des panneaux lors de l'installation et l'utilisation de

technologies telles que les trackers solaires sont essentielles pour minimiser les effets de l'ombrage et assurer des performances optimales [26].

II.2.2.2. Câblage :

Les dysfonctionnements ou les pannes de votre installation photovoltaïque peuvent être causés par des problèmes de câblage liés à votre onduleur ou à vos panneaux solaires. Les câbles électriques jouent un rôle crucial en connectant l'onduleur aux panneaux pour générer de l'électricité et en le reliant au réseau public pour utiliser cette électricité verte. Les pannes peuvent survenir si l'un de ces câbles est endommagé, par exemple par des rongeurs, ou s'il présente un défaut. [26]



Figure II.5 : Défauts de câblage

II.2.2.3. Pénétration de l'humidité :

L'infiltration d'humidité dans les panneaux solaires photovoltaïques peut engendrer une série de problèmes graves. Parmi ceux-ci, on note une augmentation du courant de fuite, favorisant ainsi la corrosion des composants internes. De plus, cette humidité peut entraîner une perte d'adhérence et d'isolation, compromettant ainsi la durabilité et la performance du système. Par ailleurs, une conséquence notable est la diminution de la résistance de CC à la terre, ce qui peut poser des risques pour la sécurité électrique globale du système [26].



Figure II.6 : Pénétration de l'humidité

II.2.2.4. Problèmes de nettoyage :

Si les panneaux ne sont pas nettoyés régulièrement, ils peuvent accumuler de la poussière, de la saleté et des fientes d'oiseaux, ce qui les rend moins efficaces pour capter la lumière du soleil. La thermographie aérienne peut aider à repérer les panneaux sales et indiquer quand ils ont besoin d'être nettoyés [27].



Figure II. 7 : Défaut de nettoyage des panneaux solaires

II.2.2.5. Décoloration :

La décoloration est un problème fréquent dans les champs solaires. Elle est causée par l'exposition prolongée aux rayons ultraviolets et aux températures élevées, surtout dans les régions chaudes et sèches. La décoloration se présente sous deux formes principales : le jaunissement et le brunissement de certaines parties des panneaux, ainsi que la décoloration des lignes conductrices. Ce défaut réduit la puissance des panneaux en diminuant la quantité de lumière solaire qu'ils peuvent absorber [28]- [29].



Figure II.8 : Décoloration des panneaux

II.3. Défaut de non homogénéité de l'ensoleillement (Ombrage)

II.3.1. Rayonnement solaire

L'énergie solaire provient du rayonnement solaire, une onde qui voyage sans avoir besoin de support physique. Cette onde a une longueur d'onde qui varie entre 0,2 et 4 micromètres. Quand elle atteint la terre, une partie de son intensité est perdue, surtout à cause des rayons ultraviolets qui sont absorbés en chemin.

II.3.1.1. Les différents types de rayonnement :

A) Le rayonnement direct

La lumière solaire vient directement du Soleil, sans être dispersée dans l'atmosphère. Ces rayons sont alignés les uns avec les autres, créant des ombres et pouvant être concentrés par des miroirs. On peut mesurer cette lumière avec un appareil appelé pyrhéliomètre.

B) Le rayonnement diffus

La lumière du ciel est formée par la diffusion de la lumière solaire à travers l'atmosphère, comprenant l'air, les nuages et les particules en suspension. La diffusion est le processus où un faisceau de lumière est dispersé dans toutes les directions. Dans le ciel, cela se produit à cause des molécules d'air, des nuages et des particules de poussière, ce qui fait que les rayons du soleil se répandent. Cela dépend largement des conditions météorologiques.

C) Le rayonnement solaire réfléchi

L'albédo du sol représente la quantité de lumière solaire réfléchi par le sol ou les objets à sa surface. Cela devient significatif lorsque le sol est très réfléchissant, comme l'eau ou la neige.

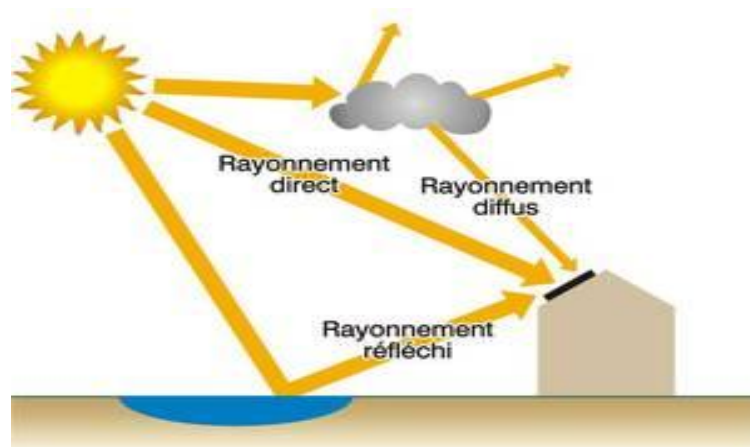


Figure II.9 : Les différents types de rayonnement

D) Le rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayons solaires reçus, comprenant ceux qui sont réfléchis par le sol et les objets à sa surface. On le mesure avec un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Dans les stations météorologiques, le rayonnement global horizontal est souvent mesuré avec un pyranomètre placé à plat à l'endroit approprié [30,31].

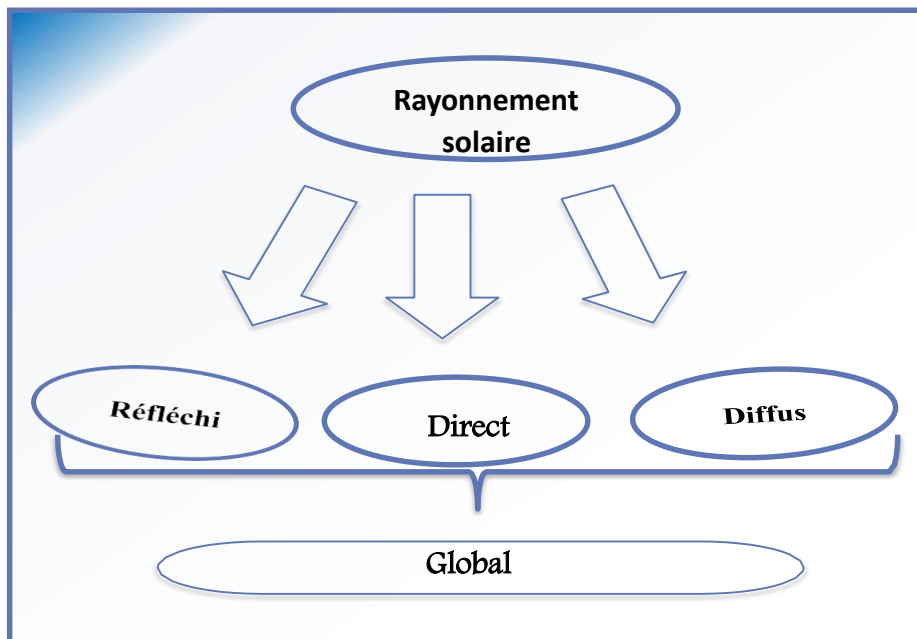


Figure II.10: Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

II.3.2. Ombrage

II.3.2.1. Définition

L'ombrage se produit lorsque quelque chose bloque la lumière du soleil sur les panneaux solaires, comme un bâtiment ou un arbre. Cela diminue la quantité d'électricité que les panneaux peuvent produire. La quantité d'électricité perdue dépend de la taille et de la densité de ce qui cause l'ombre. Avant d'installer des panneaux solaires, il est important de savoir combien d'électricité vous pourriez perdre à cause de l'ombrage.

II.3.2.2. Types d'ombrage

Il y a deux types d'ombrage : total et partiel. L'ombrage total bloque complètement la lumière du soleil, alors que l'ombrage partiel bloque seulement une partie de la lumière (peut-être à cause d'une cheminée, d'un arbre, de poussière ou de neige).

A) L'ombrage partiel :

En milieu urbain, l'ombrage partiel est fréquent car il peut être difficile d'assurer une répartition uniforme de la lumière sur tous les panneaux solaires. Cela peut être dû à divers facteurs tels que les feuilles d'arbre qui tombent en automne, les ombres des bâtiments et la poussière qui recouvre les cellules solaires.



Figure II.11 : Ombrage partiel sur les panneaux photovoltaïques

B) L'ombrage total :

L'ombrage total se produit lorsque tous les panneaux solaires sont complètement cachés du soleil. Cela peut arriver si les panneaux sont couverts par des feuilles, de la saleté ou d'autres choses. Quand cela se produit, les cellules solaires ne reçoivent aucun rayon du soleil, ce qui signifie qu'aucune électricité n'est produite [32]



Figure II.12 : Ombrage total sur les panneaux photovoltaïques

II.3.3. Fonctionnement en mode ombragé

Lorsque les cellules solaires sont connectées en série, l'addition des tensions est simple tant que toutes les cellules sont identiques et reçoivent la même lumière et la même chaleur.

Cependant, en réalité, si les cellules sont un peu différentes ou si elles ne sont pas toutes uniformément éclairées, cela peut poser problème. Des études ont donc été menées pour comprendre les effets de l'ombrage sur ces cellules. Si une cellule est moins éclairée que les autres, elle peut développer une tension négative, risquant ainsi de s'endommager. C'est ce que l'on appelle un "hot spot". Une cellule a une tension d'environ 0,6 volts en fonctionnement normal, mais elle peut atteindre plus de -20 volts en mode inversé. Si une cellule reçoit moins de lumière que les autres dans un assemblage en série, elle peut fonctionner à l'envers et gaspiller de l'énergie, ce qui peut causer des dommages voire un court-circuit [32].

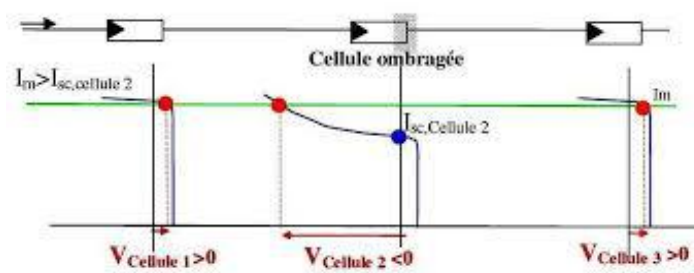


Figure II.13 : Fonctionnement en mode ombragé

Lorsque la rangée de cellules solaires produit un courant supérieur à celui d'une cellule ombragée, cette dernière peut fonctionner avec une tension négative, parfois même plus élevée que la contribution positive des autres cellules. Pour résoudre ce problème, on utilise des diodes by-pass en parallèle avec chaque groupe de cellules solaires connectées en série. Si chaque cellule était équipée d'une telle diode, les problèmes causés par l'ombrage seraient largement réduits [32].

Pour éviter les problèmes dus à l'ombrage sur un module solaire, généralement une diode by-pass est utilisée pour 18 cellules. Cela signifie que deux diodes by-pass sont installées dans la boîte de jonction pour chaque module de 12 volts. Lorsqu'une cellule est ombragée, ces diodes aident à limiter la tension inverse maximale aux bornes de la cellule ombragée à environ 11 volts ($17 \times 0,6 \text{ V} + 1 \text{ V (diode)} = 11 \text{ V}$). Ainsi, même si le courant traverse cette cellule ombragée, il ne causera pas de dommages permanents [33].

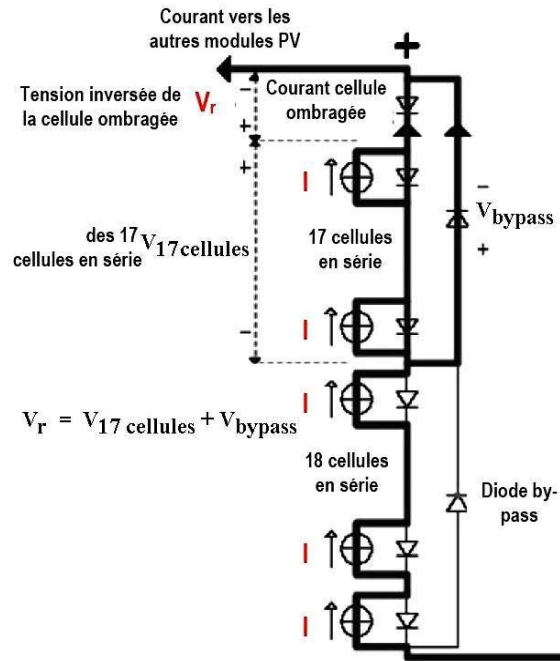


Figure II.14: Mode de protection en cas d'ombrage

II.4.Conclusion

L'entretien des panneaux solaires consiste principalement à retirer de la surface vitrée tout ce qui pourrait faire obstacle aux rayons du soleil, pour que toutes les cellules de chaque panneau photovoltaïque soient soumises au rayonnement maximal. Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents défauts (obstacles) qui peuvent altérer la production d'un système photovoltaïque. Un intérêt particulier a été porté sur l'ombrage.

Dans le chapitre suivant, nous allons évaluer les performances du générateur installé en milieu urbain où l'ombre est quasiment inévitable. Cette évaluation nous permettra de mieux comprendre l'impact des conditions urbaines sur l'efficacité des systèmes photovoltaïques et d'identifier des solutions pour maximiser leur rendement dans un environnement urbain complexe.

Chapitre III

Evaluation des performances d'un générateur installé en milieu urbain

III.1. Introduction

Les zones urbaines ont souvent une demande énergétique élevée en raison de la densité de population et de l'activité économique. L'utilisation de l'énergie solaire peut réduire la pression sur le réseau électrique et aider à réduire les coûts énergétiques globaux de la ville. Ces zones sont souvent caractérisées par des espaces restreints et des bâtiments de grande hauteur qui limitent la quantité d'espace disponible pour l'installation de panneaux solaires. Trouver des endroits appropriés pour les panneaux peut être un défi.

Les grands immeubles, les arbres et d'autres structures en milieu urbain peuvent créer de l'ombre sur les toits, réduisant ainsi l'efficacité des panneaux solaires. L'ombrage peut entraîner une perte significative de production d'énergie.

Dans ce chapitre nous allons évaluer et estimer l'impact de l'ombrage sur les performances d'un générateur photovoltaïque installé en milieu urbain.

III.2. Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans la littérature, différents modèles de cellules photovoltaïques ont été rencontrés. Ces modèles sont distingués par le nombre de paramètres qu'ils incluent pour déterminer la tension et le courant électrique produits en sortie du générateur, parmi lesquels on trouve :

III.2.1. Modèle à une diode :

Ce modèle, utilise un générateur de courant pour représenter le flux lumineux incident, une diode pour décrire les phénomènes de polarisation, ainsi que deux résistances (série et shunt). [34,35]

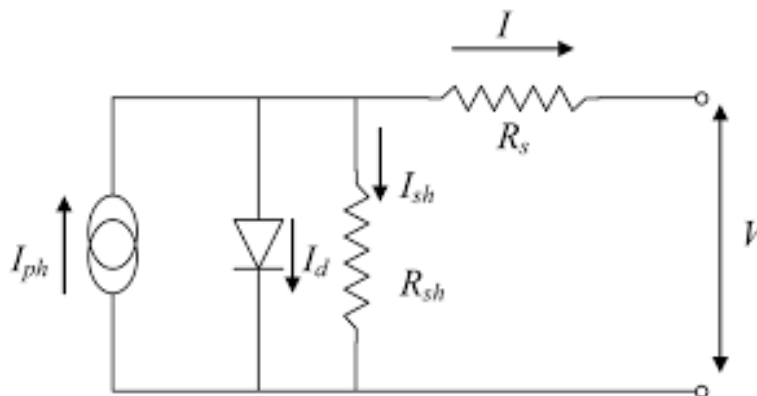


Figure III.1 : Modèle à une diode

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I - V de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule, elle représente principalement la résistance du semi-conducteur utilisé
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_0 \times \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{A K T}} - 1 \right] \quad (\text{III.1})$$

Le courant généré par la cellule *PV* est donné par la loi des nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{III.2})$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{A K T}} - 1 \right] - \left[\frac{V+R_S I}{R_{sh}} \right] \quad (\text{III.3})$$

Avec :

I_{ph} : Photo-courant du module ;

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode ;

A : Facteur d'idéalité de la jonction ($1 \leq n \leq 1.5$) ;

q : Charge de l'électron;

K : Constante de Boltzmann ;

T : Température des cellules variant en fonction de l'éclairement et de la température ambiante.

III.2.2. Modèle à deux diodes :

La représentation électrique de la cellule photovoltaïque est schématisée dans la Figure III.2. Ce schéma inclut une source de courant symbolisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, ainsi qu'une résistance shunt et une résistance en série.

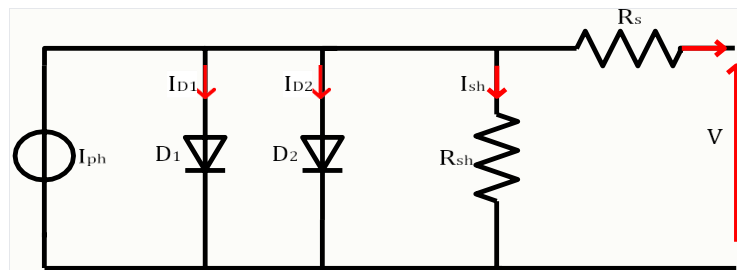


Figure III.2: Modèle équivalent à deux diodes

Le courant engendré par la cellule photovoltaïque est exprimé à travers l'application de la loi des nœuds. [36,37]

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad (\text{III.4})$$

Avec : I_{D1} et I_{D2} courant de saturation des diodes.

$$I_{D1} = I_1 \times \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{A K T}} - 1 \right] \quad (\text{III.5})$$

$$I_{D2} = I_2 \times \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{A K T}} - 1 \right] \quad (\text{III.6})$$

Au final on obtient :

$$I = I_{ph} - I_1 \times \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{A K T}} - 1 \right] - I_2 \times \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{A K T}} - 1 \right] - \left(\frac{V+R_S I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III.7})$$

III.3 : Simulation et travail réalisé

Qu'elle soit partielle ou totale, l'ombre impacte sans aucun doute la production solaire. Mais comment gérer efficacement cette situation. Dans la suite de cette partie nous allons évaluer l'impact de cet obstacle et proposer une solution (reconfiguration du générateur) pour optimiser l'exposition des panneaux, minimiser les inconvénients de l'ombrage et maximiser l'énergie produite, même dans des conditions ombragées.

III.3.1. Architectures adoptées

Le travail consiste à étudier l'aspect et l'impact crucial du positionnement de l'ombre et nous explorerons plusieurs configurations architecturales (4 architectures) d'un générateur photovoltaïque. Notre analyse portera sur les diverses directions d'ombrage (horizontal, vertical et diagonal), et leur influence sur l'efficacité et le rendement du générateur photovoltaïques pour chaque architecture proposée.

La figure ci-dessous illustre les quatre configurations étudiées, le générateur photovoltaïque est formé de 3x3 panneaux (3 branches en parallèle, chacune est constituée de 3 panneaux en série)

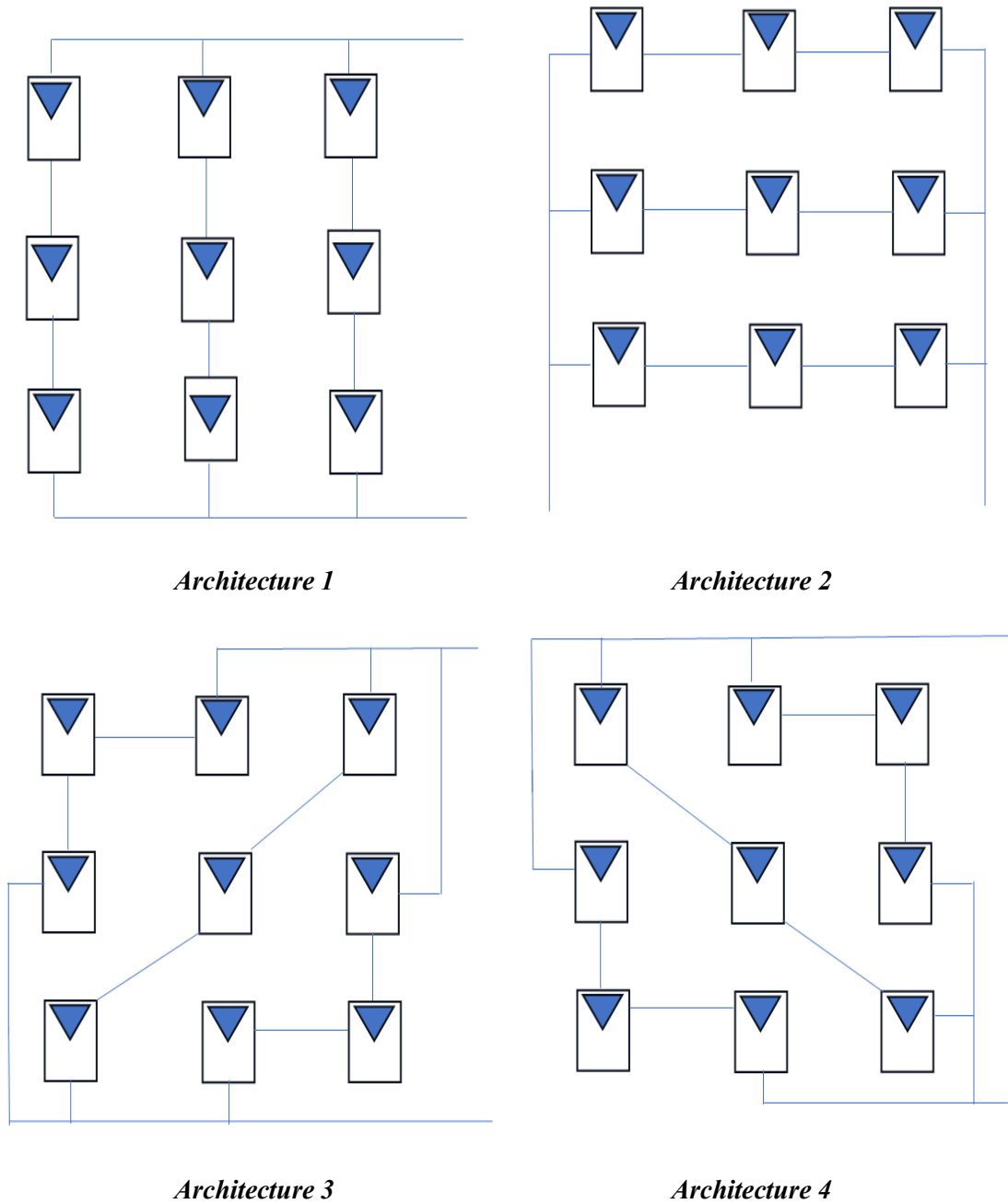


Figure III.3: Architectures adoptées

Dans les quatre configurations étudiées, le générateur photovoltaïque est composé de neuf panneaux solaires, disposés en une grille de trois sur trois, soit trois branches en parallèle de trois panneaux en série. La différence principale réside dans l'interconnexion entre ces panneaux. Pour la première configuration, les branches sont disposées sur des lignes verticales, tandis que dans la configuration 2 elles ont été branchées sur lignes horizontales.

La troisième configuration implique une connexion diagonale (milieu du générateur) droite entre les panneaux en commençant du coin supérieur gauche. À l'inverse de l'architecture 3,

dans la quatrième configuration la connexion diagonale (milieu du générateur) est gauche entre les panneaux en commençant du coin supérieur droit.

⇒ Premièrement nous allons simuler notre générateur dans les conditions STC, le tableau suivant représente les paramètres du panneau étudié, la figure III. 4 représente les caractéristiques électriques dans les conditions STC :

Paramètre	Valeur
P_{max}	110W
V_{pm}	35V
I_{pm}	3.15A
V_{co}	43.5V
I_{cc}	3.45A

Tableau III.1 : Paramètres du panneau utilisé

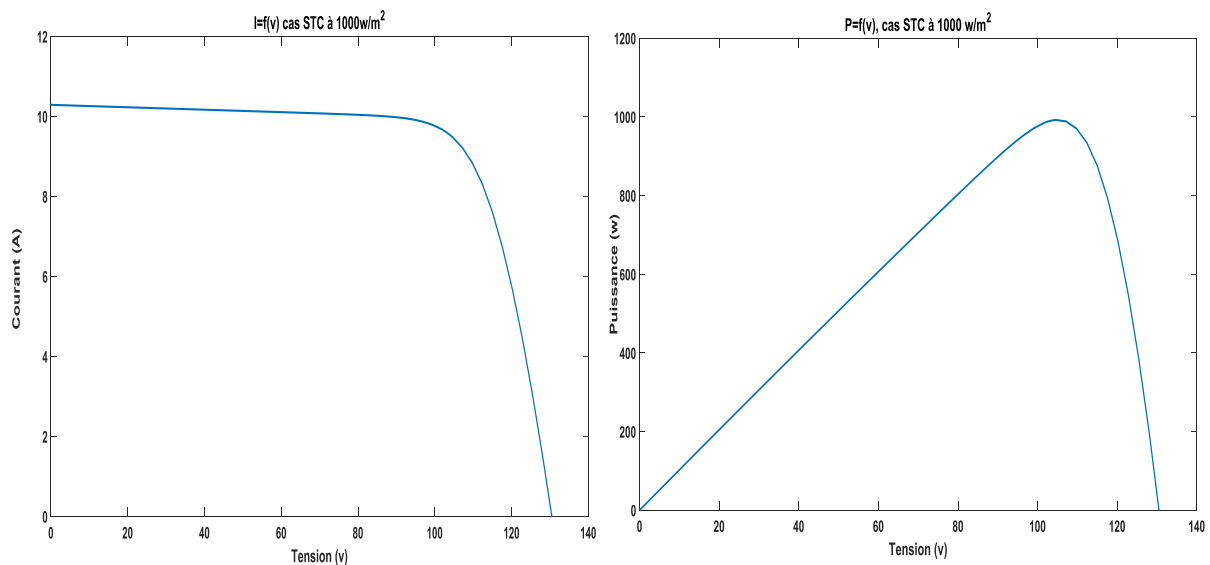


Figure III.4: Caractéristiques électriques du générateur dans les conditions STC

III.3.2. Cas d'ombre horizontale

Nous allons analyser un exemple d'ombrage horizontal sur chacune des quatre configurations. La figure III.6 décrit le principe et les panneaux touchés par ce type d'ombrage ; Avant ça nous avons effectué une simulation du générateur à l'état sain et le générateur a été exposé intégralement à un ensoleillement homogène de $800 W/m^2$:

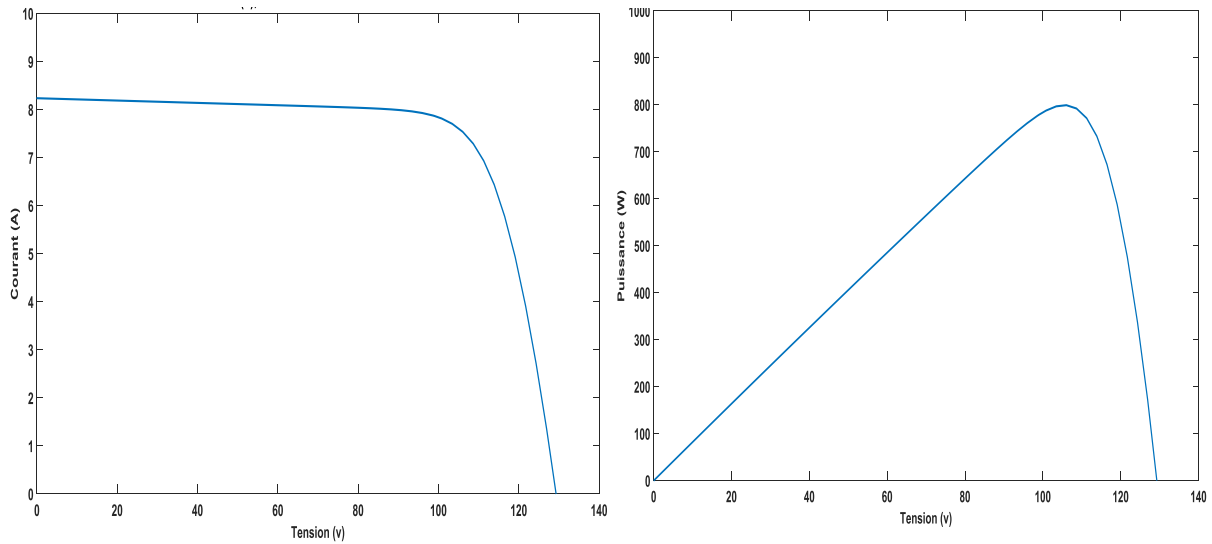
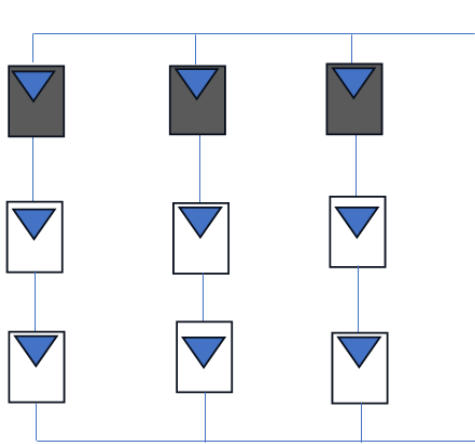
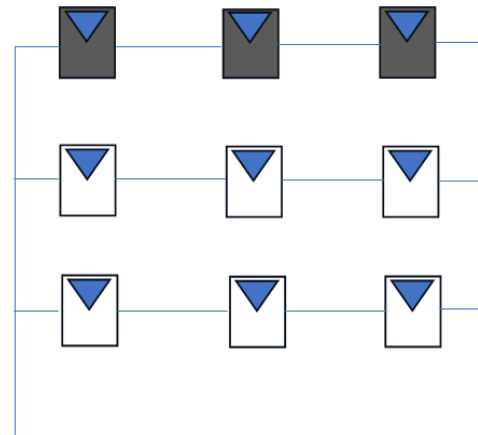


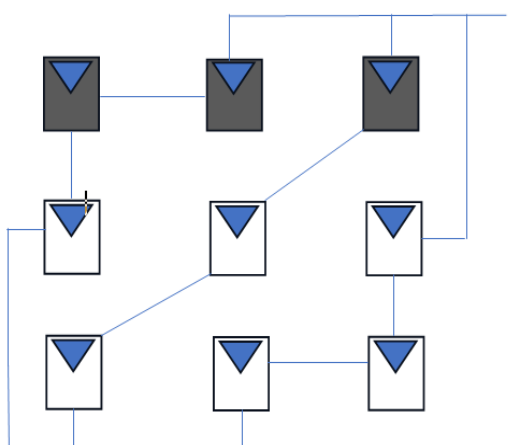
Figure III.5: Caractéristiques électriques du générateur à l'état sain (800 W/m^2)



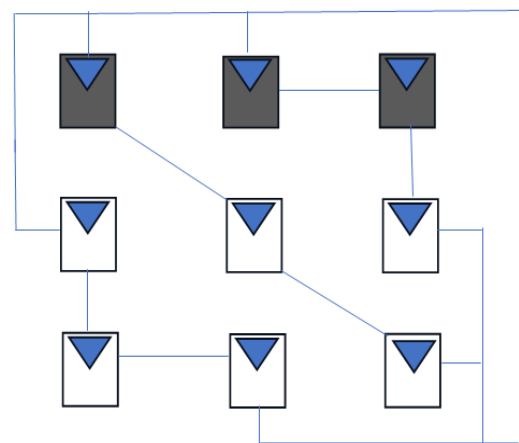
Architecture 1



Architecture 2



Architecture 3



Architecture 4

Figure III.6: Cas d'ombrage horizontal

Dans ce cas d'ombrage, les quatre configurations seront exposées à un ombrage horizontal affectant la première rangée de notre générateur, entraînant une réduction de 350 W/m^2 sur cette partie spécifique du système. Cela signifie que les cellules ombragées recevront un ensoleillement de 450 W/m^2 , tandis que le reste du générateur sera exposé à 800 W/m^2 . Les résultats obtenus sont représentés ci-après.

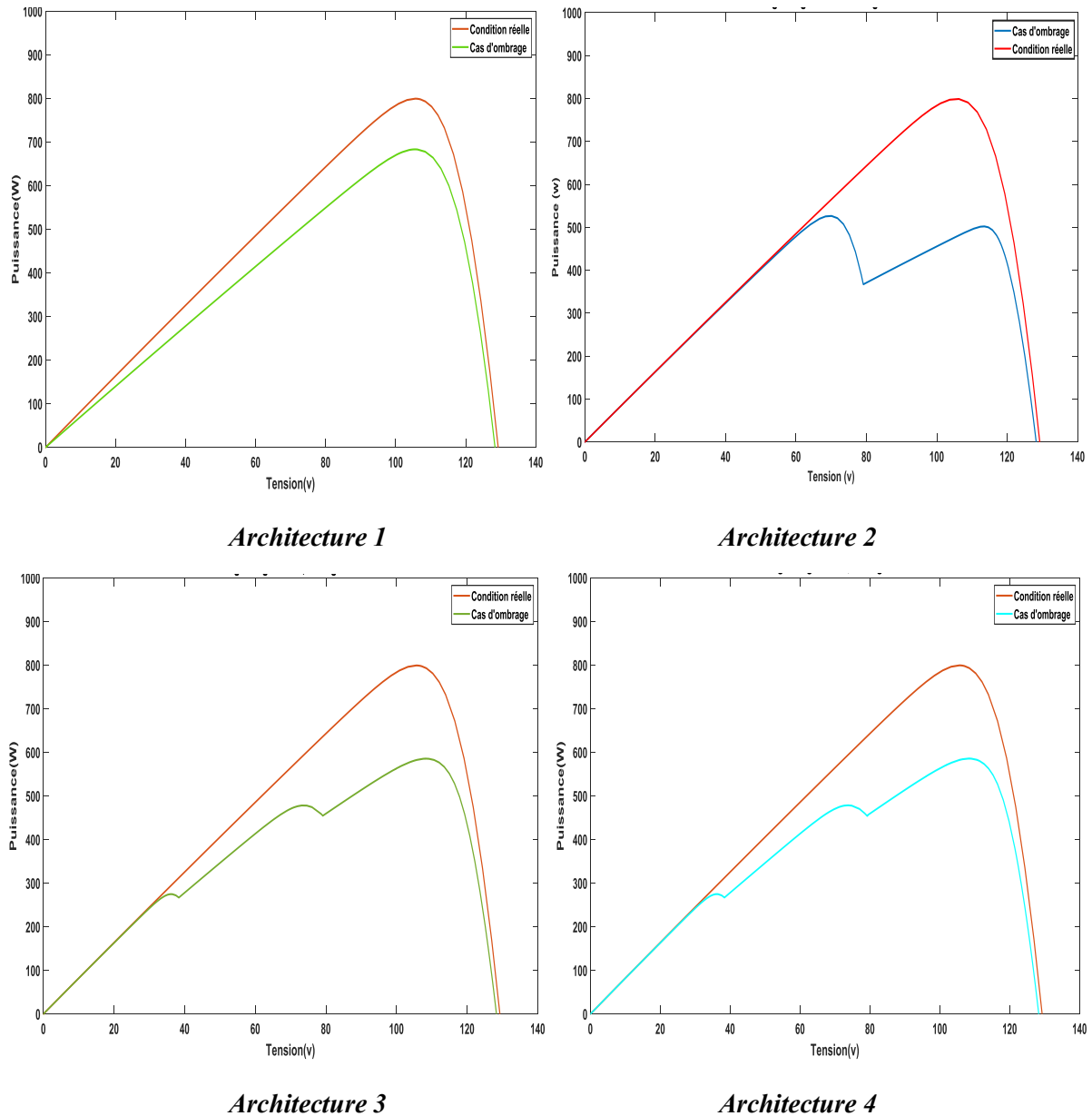


Figure III.7: Résultats obtenus pour un cas d'ombrage horizontal

La figure suivante représente une comparaison des résultats obtenus par les différentes architectures adoptées pour une ombre qui se positionne d'une manière horizontale sur la surface du générateur :

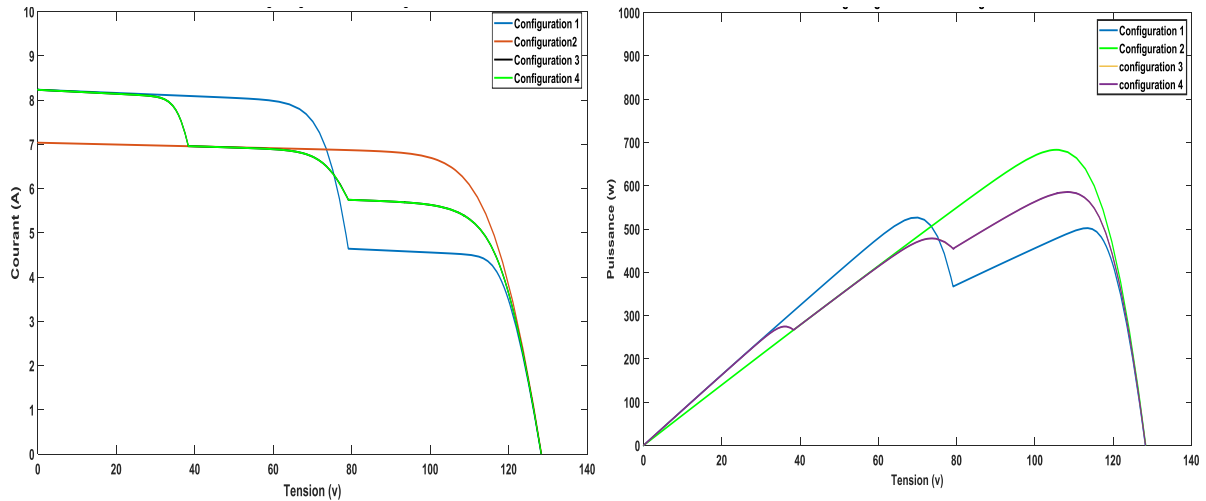


Figure III.8: Comparaison des architectures adoptées dans le cas d'une ombre horizontale

III.3.3. Cas d'ombre verticale

Nous allons examiner une ombre verticale sur chacune des quatre configurations. La figure III.9 décrit la façon dont les branches du générateur seront atteintes par cette position d'ombrage (même valeur d'ensoleillement ont été maintenues) :

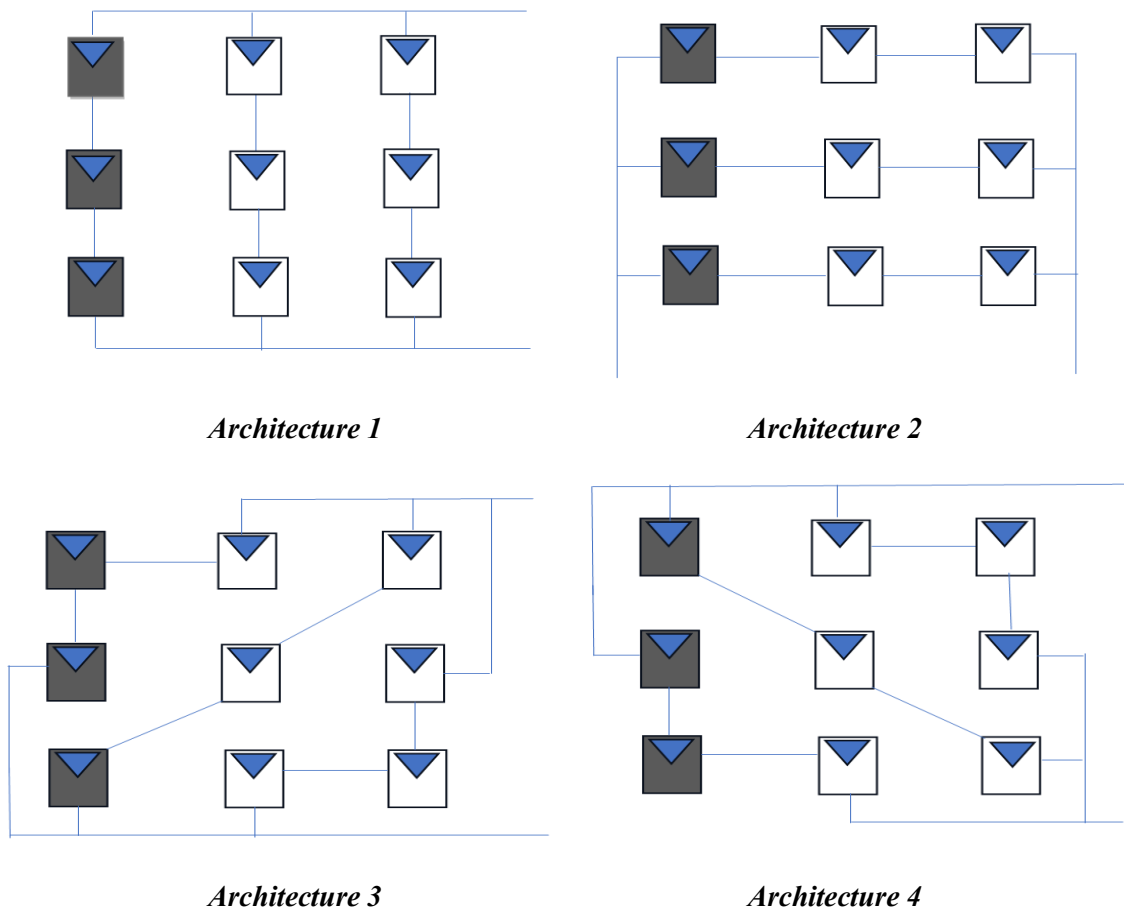


Figure III.9: Cas d'ombrage vertical

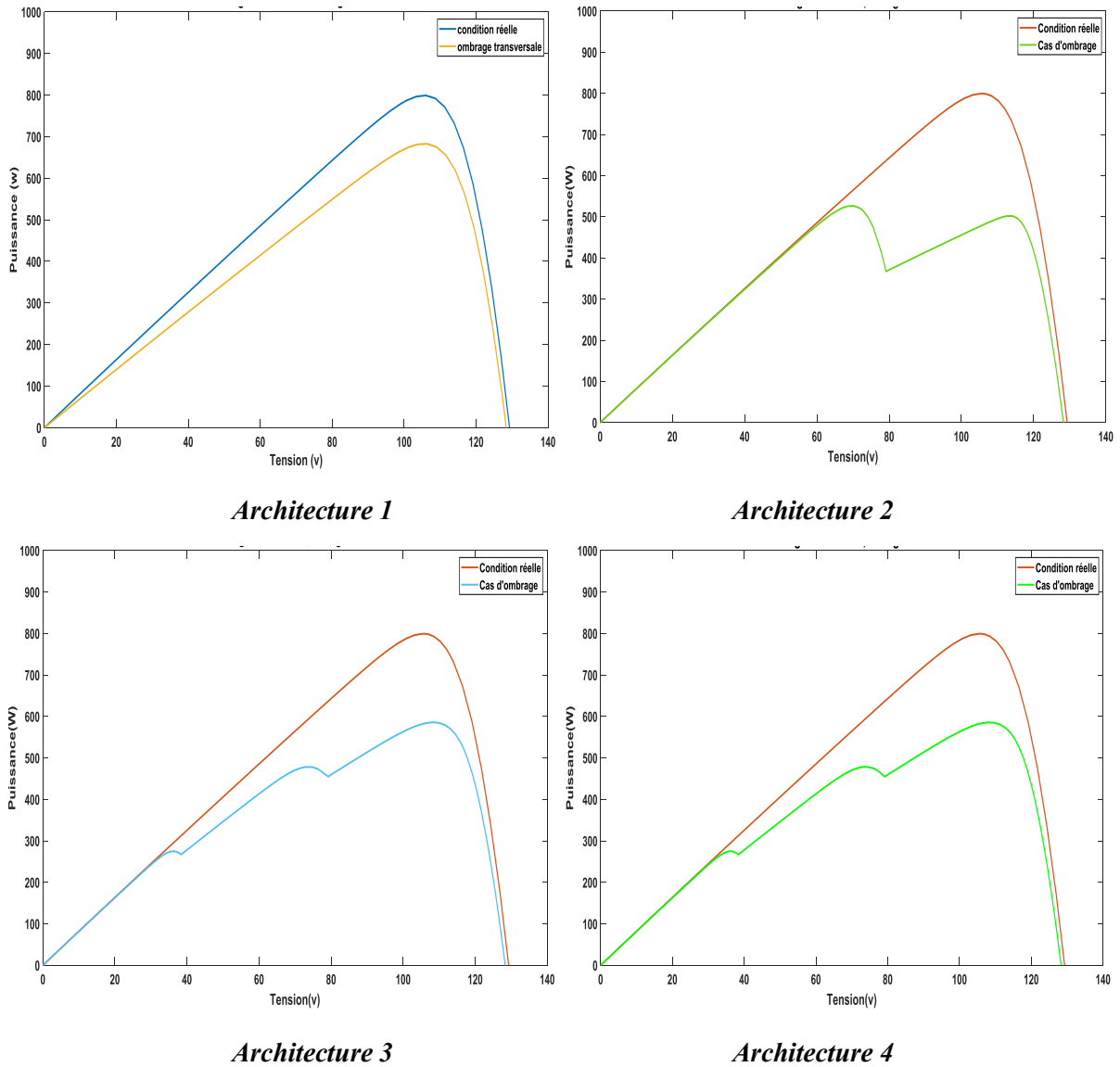


Figure III.10: Résultats obtenus pour un cas d'ombrage vertical

La figure ci-dessous représente une comparaison entre les 4 configurations :

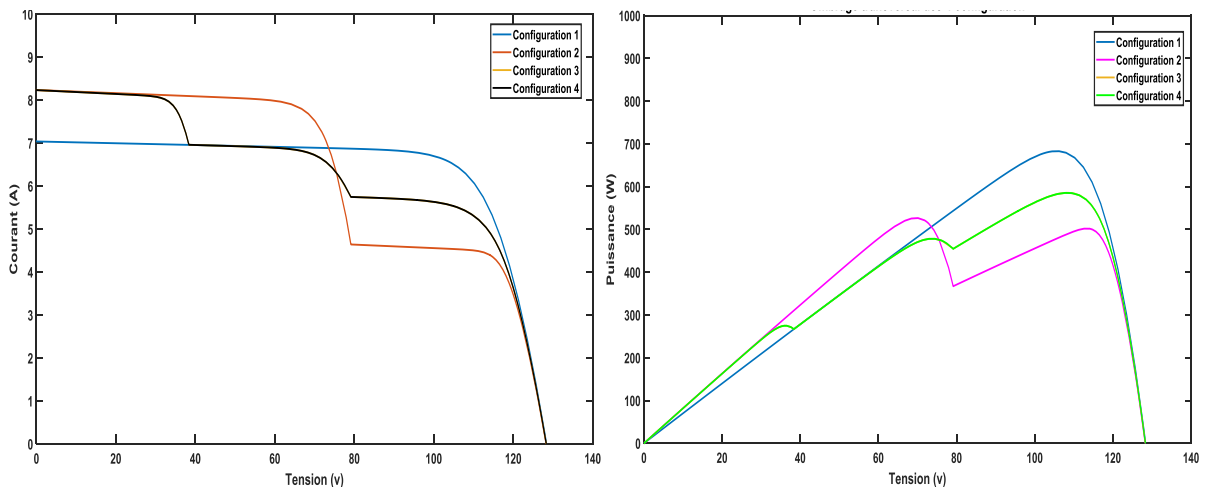


Figure III.11: Comparaison des architectures adoptées dans le cas d'une ombre verticale

III.3.4. Cas d'ombre diagonal

Nous allons explorer une ombre positionnée d'une manière diagonale sur chacune des quatre configurations. La figure III.12 décrit la focalisation de l'ombre sur la surface du générateur (même valeur d'ensoleillement ont été maintenues) :

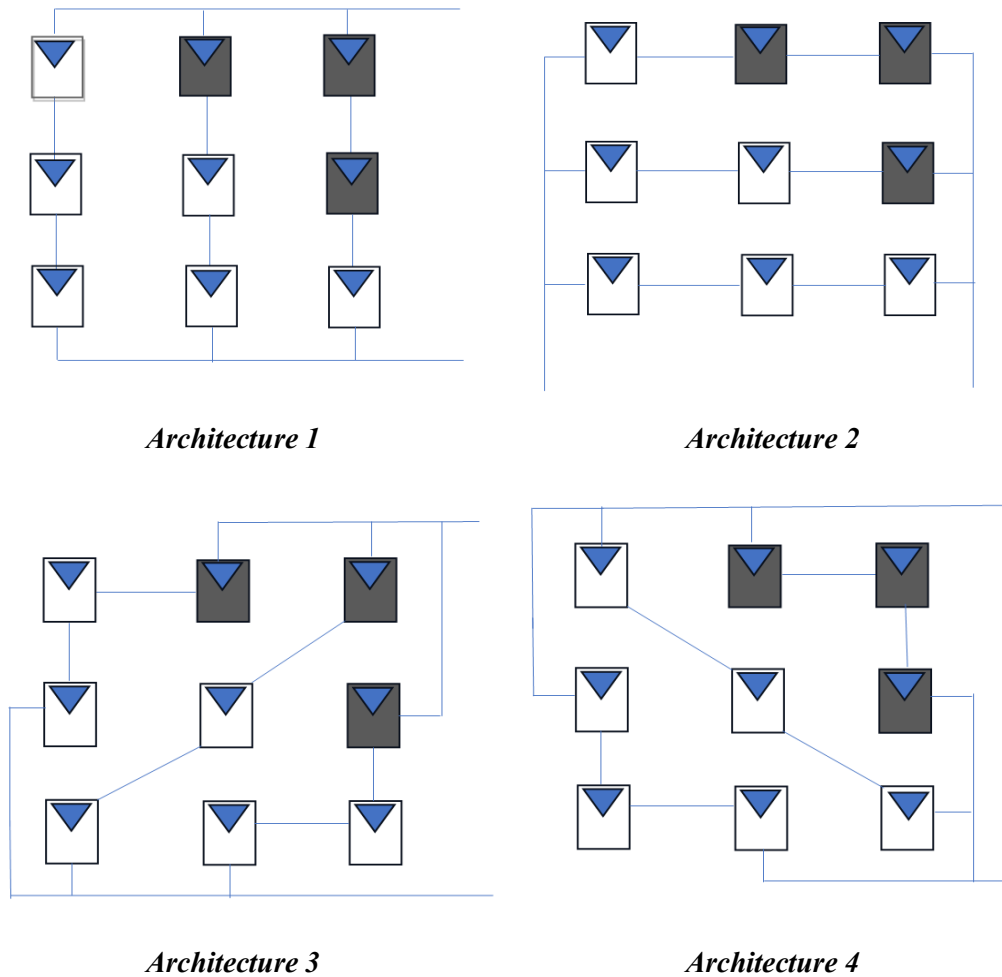
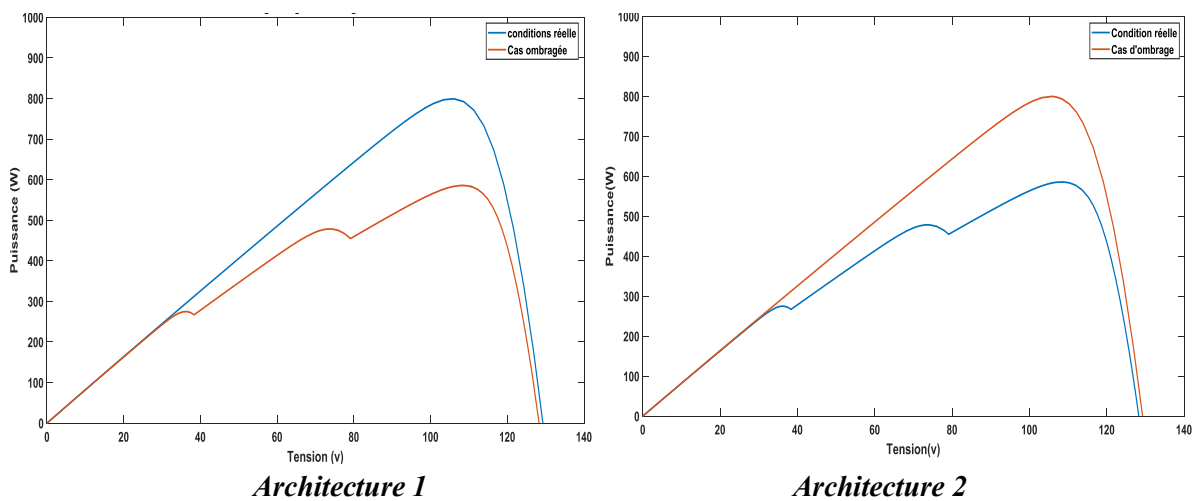


Figure III.12: Cas d'ombrage diagonal



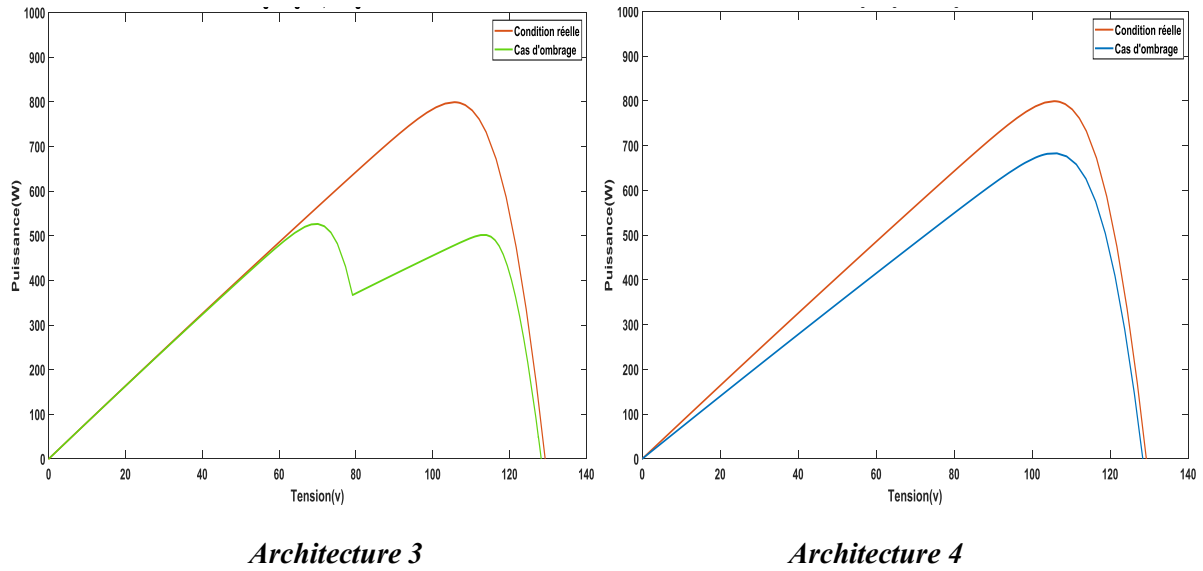


Figure III.13: Résultats obtenus pour un cas d'ombrage diagonal

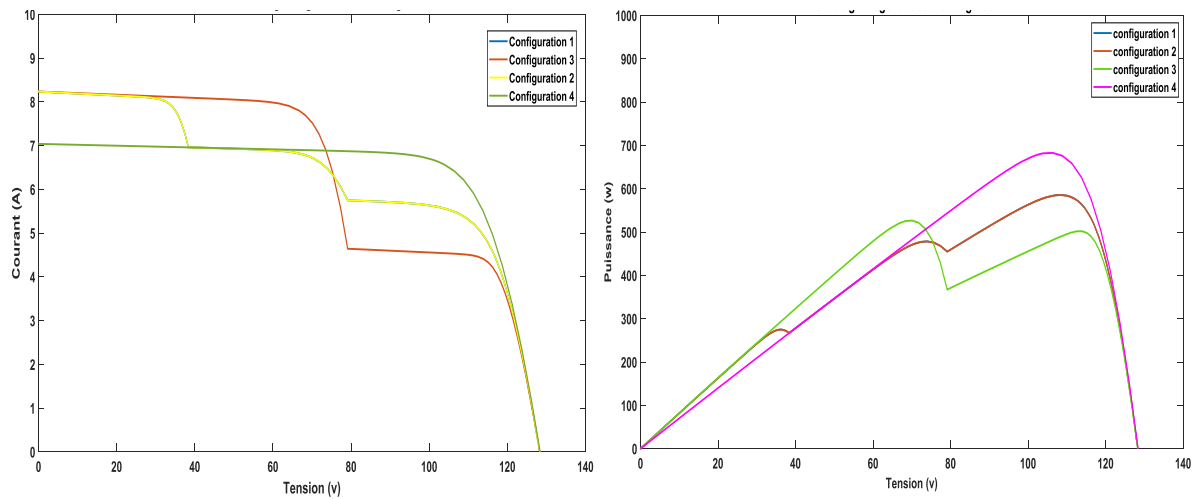


Figure III.14: Comparaison des architectures adoptées dans le cas d'une ombre diagonale

Nous avons également entrepris le même travail en appliquant cette fois un ombrage sur deux rangées, et nous avons obtenu les résultats suivants :

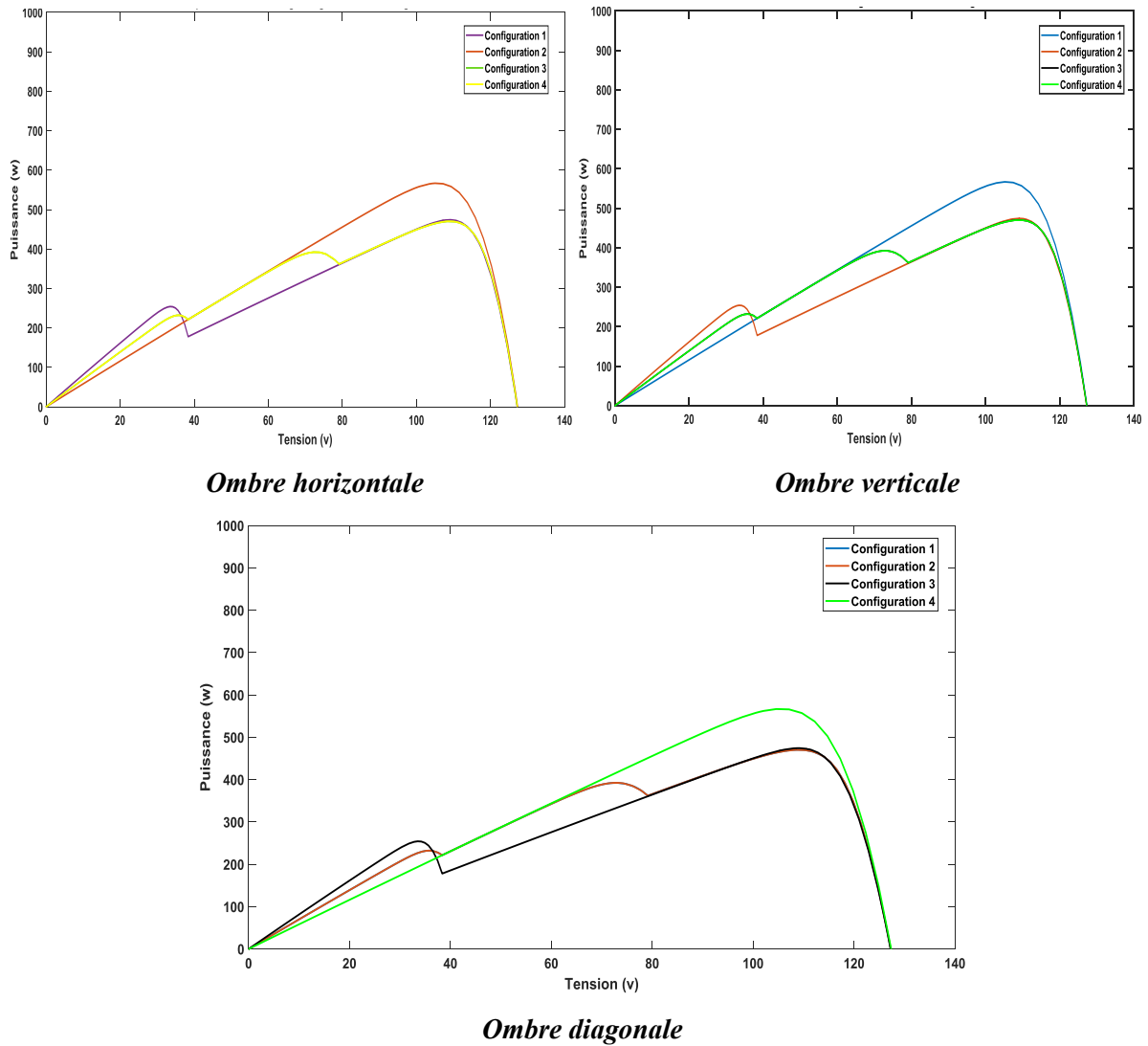


Figure III.15: Comparaison des architectures adoptées pour une ombre de 2 rangés

Le tableau suivant représente une récapitulation des résultats simulés et calculés des tests réalisés :

Types d'ombrage	Horizontale				Verticale				Diagonale			
Architecture	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
P (W) Une rangé	526.6	683.2	585.6	585.9	682.7	526.5	585.6	585.4	585.6	585.5	526.6	682.8
ΔP_1 (W)	272.65	116.00	213.6	213.24	116.50	272.70	213.60	213.80	213.60	213.70	272.60	116.40
FF₁ (%)	38,98	50,58	43,35	43,38	50,54	38,98	43,35	43,34	43,35	43,34	38,98	50,55
P (W) Deux rangé	474.2	566.9	470.3	470.3	566.9	474.2	469.9	496.9	470.3	470.3	474.2	566.6
ΔP_2 (W)	325.00	232.30	328.9	328.90	232.30	325.00	329.30	302.30	328.90	328.90	325.00	232.60
FF₂ (%)	35,10	41,97	34,81	34,81	41,97	35,10	34,79	36,78	34,81	34,81	35,10	41,94
P (W) Cas sain	799.205											

Tableau III_2 : Tableaux récapitulatif des résultats

III.4. Discussion des résultats

Quatre architectures différentes ont été simulées sous trois types d'ombrage partiel (horizontal, vertical, diagonal) afin de déterminer la configuration optimale pour minimiser les pertes de puissance. L'objectif principal était de trouver la meilleure architecture capable de maximiser la production d'énergie solaire même en présence d'ombrage.

Les résultats montrent que les pertes de puissance sont minimisées jusqu'à 116 W par rapport aux autres cas lorsque les trois panneaux sont connectés en série, par exemple dans l'architecture 1 avec ombrage vertical, l'architecture 2 avec ombrage horizontal, et l'architecture 4 avec ombrage diagonal.

En revanche, lorsque l'ombrage touche plus d'une branche (panneau en parallèle), les pertes de puissance deviennent significatives. Dans l'architecture 1 avec ombrage horizontal, l'architecture 2 avec ombrage vertical, et l'architecture 3 avec ombrage diagonal, les pertes peuvent atteindre jusqu'à 272 W, accompagnées d'une diminution du facteur de forme jusqu'à 38.9%.

Il est clair que l'ombrage affecte différemment les configurations de panneaux en série et en parallèle : une branche série complètement ombragée présente moins de pertes et un facteur de forme plus élevé (jusqu'à 50%), tandis qu'une branche parallèle partiellement ombragée subit des pertes plus élevées et un facteur de forme réduit.

En conclusion, choisir l'architecture des panneaux adaptée à chaque type d'ombrage est essentiel pour maximiser l'efficacité énergétique du générateur photovoltaïque.

III.5. Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, nous avons analysé un générateur photovoltaïque sous quatre architectures distinctes, confrontées à trois types d'ombrage (horizontal, vertical, diagonal).

Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact significatif de l'ombrage partiel sur les performances des systèmes photovoltaïques. Nous avons observé que l'interconnexion des panneaux (série ou parallèle) joue un rôle crucial dans la quantité de puissance générée, en fonction du type d'ombrage rencontré.

Une conclusion claire de notre étude est les performances d'un générateur photovoltaïque fonctionnant en mode ombragé sont fortement liées à l'angle d'ombrage, la portion ombragée du générateur et surtout la connexion entre les panneaux (Architecture)

On conclut que pour chaque matérialisation d'ombrage correspond une architecture qui démontre une capacité supérieure à minimiser les pertes de puissance, assurant ainsi une production d'énergie la moins dégradée même dans des conditions d'ombrage partiel.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les zones urbaines, marquées par une forte densité de population et une consommation énergétique élevée, peuvent bénéficier de l'énergie solaire comme solution viable pour répondre à leurs besoins énergétiques. En effet, pour capter l'énergie solaire et la convertir en électricité plusieurs locaux peuvent être exploités ; tel que les toits des bâtiments, les espaces publics, les façades des immeubles, et même les fenêtres. En intégrant des panneaux solaires dans l'infrastructure urbaine, en adoptant des technologies novatrices, nous pouvons contribuer à rendre nos villes plus propres et énergétiquement indépendantes.

Mais l'intégration de cette énergie est confrontée à un problème crucial qui est l'ombrage sur les générateurs photovoltaïques ; ce phénomène impact considérablement la production électrique de ces systèmes.

Ce travail a examiné et évalué les performances d'un générateur photovoltaïque en présence de plusieurs scénarios d'ombrage qui peuvent être d'origine urbaine (bâtiments...) Afin de réduire la perte de puissance en cas d'ombrage, il est préférable de veiller à une répartition intelligente des modules et de les raccorder de manière appropriée. Plusieurs architectures du champ photovoltaïque ont été testées dans ce mémoire dans le but de minimiser les pertes dues à cet ombre, autrement dit maximiser l'efficacité de la conversion.

Notre mémoire est scindé en trois parties :

Dans le premier chapitre, nous avons étudié l'énergie photovoltaïque, ses types et son rôle dans la transition énergétique mondiale. Nous avons exploré ses avantages et inconvénients en soulignant son potentiel.

Le deuxième chapitre a mis en lumière les défis auxquels font face les générateurs photovoltaïques, tels que les pertes dues à l'ombrage et à d'autres facteurs. Nous avons identifié l'ombrage comme un problème majeur qui réduit l'efficacité des systèmes solaires.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons approfondi notre étude en modélisant et en simulant sous MATLAB un générateur photovoltaïque dans quatre configurations différentes, soumises à trois types d'ombrage distincts (horizontal, vertical, diagonal). Nos résultats ont clairement démontré que pour chaque évolution d'ombre correspond une architecture bien choisie du générateur en minimisant les pertes de puissance et en maintenant une production d'énergie plus stable même en présence d'ombrage important.

Bibliographique

Bibliographique :

[01] : Corinne ALONSO. « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III. 2003.

[02] : <http://samuel.benoit.online.fr/sources-energie-fossiles-petrole-gaz-naturel-charbon-introduction>. Consulter le 25 mai 2024.

[03] :Kawther A. « Production d'énergie électrique à partir de l'énergie photovoltaïque ».

[04] : Maëla JAOUEN « Les énergies renouvelables Etat des lieux et perspectives en Italie ». Chargée de Mission Cathy RACAULT, Attachée Scientifique. Juin 2005.

[05] :Soltane B. « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ».Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010

[06] : FPGA en utilisant la carte ML605. Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2018

[07]: Tetsuya T., Susumu T., Kohjiro H., Kiyoshi Y. « Control of measurment environment for high-efficiency organic photovoltaic cells ». Japanese Journal of applied physics vol. 45 n° 8-2006.

[08] : « L'énergie photovoltaïque», définition et origine. Encarta 2005

[09]: B.Azoui. « Concept and realisation of a three phase Brushless DC Motor *BLDCM. for solar application ». Thesis of doctorat of science, University of Batna 2002

[10]:Vighetti Stéphane. « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et Dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut Polytechnique de Grenoble, 2010.

[11] : Loïc Bailly. « Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface ». Thèse de doctorat.

[12] : Helali Kamelia. « Modélisation d'une cellule photovoltaïque, Etude comparative » Thèse de doctorat Université de Tizi Ouzou, Algeria, 2012.

[13]: E. Karatepe, M. Boztepe and M. Colak. « Neural Network Based Solar-Cell Model Energy. Conversion and Management ». Vol. 47, N°9-10, pp. 1159-1178, 2006.

[14]: W. DeSoto, S.A. Klein, W.A. Beckman. « Improvement and validation of a model for

[15] :A. Chouder, S. Silvester and A. Malek. « Simulation of photovoltaic grid connected inverter in case of grid-failure ». Revue des Energies Renouvelables. Vol. 9, N°4, pp.285-296,

[16] : Souheyla Merad née Mamoun. « Dimensionnement d'une Installation Photovoltaïque d'un lieu peu fréquenté : Cas d'un Cabanon Situé à Marsat Ben M'Hidi (Tlemcen) ». master

LMD, L'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2010. 2006.photovoltaic array performance ». Solar Energy 80, pp. 78-88, 2006.

[17]: Antonio Luque and Steven Hegedus. « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering ». John Wiley & Sons Ltd, 2003.

- [18] : Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun et Benjamin Faraggi « Cellules solaires Les Bases De L'énergie Photovoltaïque ». 5^{ème} Editions Techniques Et Scientifiques Françaises, 2010.
- [19] : Soler Robert. « L'énergie solaire Des fondamentaux aux technologies d'aujourd'hui et de demain ». Lavoisier, Paris. 2019.
- [20]: Solar Power. « The Future Energy Source, Energy Education Science and Technology ». Part B: Social and Educational Studies, vol. 2, no. 2, pp., 2010.
- [21] : Sunpower maxeon. « Technologies Solaire ». 30 Janvier 2023
- [22]: Solar Energy. « Renewable Energy ,Progress in Photovoltaics: Research and Applications ».
- [23]: V. Sharma and S.S. « Chandel Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: a review, Renewable Sustainable Energy Review ». Vol. 27, pp. 753 - 767, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2013.07.046.
- [24]: G. Illya, V. Handara, L. Yujing, R. Shivakumar and A. Suriadi. « Backsheet Degradation under Salt Damp Heat Environments - Enabling Novel and Innovative Solar Photovoltaic Systems Design for Tropical Regions and Sea Close Areas ». Procedia Engineering, Vol. 139, pp. 7 - 14, 2016. doi: 10.1016/j.proeng.2015.09.233.
- [25] : France dépannage photovoltaïque. « Les 3 problèmes les plus courants sur une installation photovoltaïque ». 22 février 2022.
- [26] : LAHLOU Samir. « Détection et localisation des défauts convertisseurs statiques dans un système Photovoltaïque raccordé au réseau moyenne tension ». Mémoire de fin d'études. Université M'Hamed BOUGARA – Boumerdes, Juin 2016.
- [27] : Mapperx, octobre 2023. « Défauts et causes du système photovoltaïque ». octobre 2023.
- [28]: M. A. Munoz, M. C. Alonso-García, N. Vela, and F. Chenlo. « Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions ». Sol. Energy, vol. 85, no. 9, pp. 2264– 2274, 2011
- [29]: F. PERN and A. CZANDERNA. « Characterization of ethylene vinyl acetate (EVA) encapsulant: Effects of thermal processing and weathering degradation on its discoloration ». Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 25, no. 1–2, pp. 3–23, Jan. 1992.
- [30] : J. Royer, T.djiako, E.schiller, B. Sada, «Le pompage photovoltaïque», Institut de l'Energie Des Pays Francophone ,1998.
- [31] : B.wafa « Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau ». Mémoire de magistère Université Mohamed Khider – Biskra.

[32] : K. RIAD. « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques ». Thèse Doctorat, Université Ferhat Abbas-Sétif 1.

[33]: H.Oldenkamp. «Detailed Analysis of Currents in PV-Shunts ». 2002

[34]: O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed. « Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models ». 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal . Août 2002.

[35] : G.Notton et al. « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un Module photovoltaïque en silicium monocristallin ». Revue des Energies Renouvelables. France, 2010, Vol 13, N°1, pp. 49 – 62,

[36]: H. L. Tsai, C. S. Tu, and Y. J. Su « Development of generalized photovoltaic model using Matlab/Simulink ». Proceedings of the World congress on Engineering and Computer Science. San Francisco, USA, 2008, Vol 2, N°2, pp. 1–6.

[37]:AkihkiroOi. « Design and simulation of photovoltaic water pumping system »Master thesis of California University. September 2005.