

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira – Béjaïa



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en énergies renouvelables en
électrotechnique

Filière : Energies renouvelables

Thème

Étude de fonctionnement perturbé d'une chaîne de conversion photovoltaïque.

Réalisé par :

MAAMERI Aghilas

KHIMOUZI Lyes

Encadré par :

Mr. MOHAMMEDI Ahmed

Examiné par :

Mr. REKIOUA Toufik

Mme. RAHRAH Karima née AMOKRANE

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous remercions ALLAH le Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à notre encadrant Mr. MOHAMMEDI Ahmed. Nous le remercions de nous avoir, orienté, aidé et conseillé. Lui qui nous a guidés avec ses orientations et ses conseils tout au long de ce travail. On ne peut que lui être reconnaissant surtout pour ses qualités intellectuelles et humaines.

Nous tenons à rendre grâce à monsieur et madame Rekioua pour la mise on notre disposition le matériels nécessaires pour l'accomplissement de la partie pratique.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé notre réflexion et transmis leurs savoir-faire.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements à nos familles qui ont toujours été là pour nous. Nous remercions nos ami(e)s pour leur encouragement, pour leur sincère amitié et confiance. À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

*A mes chers parents avec tous mes sentiments de respect,
d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous leur
sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon
éducation dans les meilleures conditions, pour leurs tendresse,
leurs amour, leur soutien tout au long de ma vie.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués
et le fruit de votre soutien infailible.*

*A mes chères frères et sœurs Alia, Ali, Nessma, Sabrina et
Amine, pour leurs encouragements permanent et leur soutien
moral.*

*A mes chers amis et à la personne angélique qui m'a aidé, épaulé
dans la vie quotidienne.*

A. Maameri

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

*A mes chers parents avec tous mes sentiments de respect,
d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous leur
sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon
éducation dans les meilleures conditions, pour leurs tendresse,
leurs amour, leur soutien tout au long de ma vie.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués
et le fruit de votre soutien infailible.*

*A mes chers frères, Billal et Youghorta pour leurs encouragements
permanent et leur soutien moral.*

*A mes chers amis et à la personne angélique qui m'a aidé, épaulé
dans la vie quotidienne.*

L. Khimouzi

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Etat de l’art sur les énergies renouvelables	
I. Introduction.....	2
II. Energies non renouvelables.....	2
III. Energies renouvelables.....	3
III.1. Energie éolienne	3
III.1.1. Définition	3
III.1.2. Principe de la conversion éolien	3
III.1.3.Types d’éoliennes	4
III.1.4. Avantages et inconvénients de l’énergie éolienne	4
III.2. Energie hydro-électrique	5
III.2.1. Définition	5
III.2.2. Principe de fonctionnement de centrale hydraulique.....	5
III.2.3. Avantage et inconvénients de l’énergie hydraulique	6
III. 3. La Biomasse.....	6
III.3.1. Définition	6
III.3.3. Avantages et inconvénients de la biomasse	7
III.4. Géothermie	7
III.4.1. Définition	7
III.4.2. Avantages et inconvénients de la géothermie	8
III.5. Energie des marées	8
III.5.1. Définition	8
III.4.2. Avantages et inconvénients de l’énergie des marées	9
III.6. Energie solaire.....	10
III.6.1. Définition	10

III.6.2. Energie solaire thermique	10
III.6.2.1. Définition	10
III.6.2.2. Principe de fonctionnement	10
III.6.2.3. Type de panneaux solaire thermique	10
III.6.3. Energie solaire photovoltaïque	11
III.6.3.1. Définition et Historique	11
III.6.3.2. Les Rayonnements Solaires	12
III.6.3.3. La cellule photovoltaïque.....	13
III.6.3.4. L'effet photovoltaïque	13
III.6.5. Dopage des semi-conducteurs	14
III.6.5.1. Dopage de type N	14
III.6.5.2. Dopage de type P	15
III.6.6. La jonction P-N.....	15
III.6.7. Avantages et inconvénients de la technologie solaire	16
IV. Conclusion	16

Chapitre 2 : Identification des caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

I. Introduction.....	17
II. Caractéristiques et propriétés du générateur photovoltaïque	17
II.1. Courant de court-circuit « I_{cc} »	18
II.2. Tension de circuit ouvert « V_{co} ».....	18
II.3. Puissance maximale « P_{max} »	18
II.4. Facteur de forme «FF»	18
II.5. Rendement PV « η »	18
III. Association des cellules PV	19
III.1. Association en série	19
III.1. Association en parallèle	20

III.3. Association en hybride.....	20
IV. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	21
IV.1 Modèle idéal	21
IV.2 Modelé explicite	23
IV.3 Modèle à une diode.....	24
V. Résultats de simulation	24
V.1. Théorique	25
V.2. Pratique	27
VI. Conclusion	28

Chapitre 3 : Etude de fonctionnement perturbé d'un générateur photovoltaïque

I. Introduction.....	29
II. Dégradation des performances des systèmes photovoltaïques.....	29
II.1. Problèmes liés aux convertisseurs (onduleurs, hacheurs, MPPT, ...).....	29
II.2. Problèmes liés aux panneaux solaires	30
III. Inclinaison du générateur photovoltaïque.....	30
IV. Ombrage sur le générateur photovoltaïque.....	31
IV.1. Ombrage Total	31
IV.2. Ombrage Partiel.....	31
V. Mismatch photovoltaïque	31
V.1. Mismatch structurel	32
V.2. Mismatch fonctionnel	32
VI. Impact d'une perturbation (inclinaison) sur la puissance PV produite	32
VII.Impact de deux perturbations (ombrage et inclinaison) sur la puissance PV produite... ..	34
VIII. Conclusion	42
Conclusion générale	43

Chapitre I

Figure I.1 : conversion de l'énergie cinétique du vent	4
Figure I.2 : Eolienne a axe vertical et horizontal.....	4
Figure I.3 : Principe de fonctionnement de la centrale hydraulique	5
Figure I.4 : Source de biomasse.....	6
Figure I.5 : Exemple d'exploitation de la géothermie	7
Figure I.6 : Les technologies de production d'énergie océanique.....	8
Figure I.7 : Exemple des capteurs solaires thermiques.....	11
Figure I.8 : Champ photovoltaïque	12
Figure I.9 : Constitution d'une cellule PV	13
Figure I.10 : Dopage de type N du Silicium	14
Figure I.11: Dopage de type P du Silicium.....	15
Figure I.12 : Jonction P-N et mouvement des électrons et des trous.....	15

Chapitre II

Figure II.1 : Caractéristiques électriques d'une cellule élémentaire	17
Figure II.2 : Association des (cellules) panneaux PV en série	22
Figure II.3 : Association des (cellules) panneaux PV en parallèle	22
Figure II.4 : Association des (cellules) panneaux PV en hybride	22
Figure II.5 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	22
Figure II.6 : Caractéristiques électriques du générateur étudié sous conditions STC	25
Figure II.7 : Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du générateur étudié ...	26
Figure II.8 : Influence de la température sur les caractéristiques du générateur étudié	26
Figure II.9 : Différentes associations des générateurs étudiés.....	27
Figure II.10 : Montage voltampèremétrique utilisé.....	27
Figure II.11: Caractéristiques électriques pratiques I-V et P-V du générateur utilisé.....	28

Chapitre III

Figure III.1 : Exemple d'inclinaison du panneau photovoltaïque.....	30
Figure III.2 : Exemple d'ombrage total et partiel.....	31
Figure III.3 : Exemple des causes de mismatch fonctionnel.....	32
Figure III.4 : Exemple du banc expérimental à l'essai (a) et (c)	33
Figure III.5 : Influence de l'angle d'inclinaison sur les caractéristiques électriques du générateur à l'état sain a) $\vartheta = 0^\circ$, b) $\vartheta = 30^\circ$, c) $\vartheta = 45^\circ$, d) $\vartheta = 60^\circ$	33
Figure III.6 : Exemple du banc expérimental à l'essai (c_{11}), (b_{22})	35
Figure III.7 : Influence de l'angle d'inclinaison et d'ombrage transparent à 50% sur les	

caractéristiques électriques du générateur PV a) $\vartheta = 0^\circ$, b) $\vartheta = 30^\circ$, c) $\vartheta = 45^\circ$, d) $\vartheta = 60^\circ$ **35**

Figure III.8 : Influence de l'angle d'inclinaison et d'ombrage transparent à 100% sur les caractéristiques électriques du générateur PV a) $\vartheta = 0^\circ$, b) $\vartheta = 30^\circ$, c) $\vartheta = 45^\circ$, d) $\vartheta = 60^\circ$ **36**

Figure III.9 : Exemple du banc expérimental (c_0) et (c_2) **37**

Figure III.10 : Influence de l'angle d'inclinaison et d'ombrage opaque à 50% sur les caractéristiques électriques du générateur PV a) $\vartheta = 0^\circ$, b) $\vartheta = 30^\circ$, c) $\vartheta = 45^\circ$, d) $\vartheta = 60^\circ$ **37**

Figure III.11: Puissance générée par le générateur PV à l'état sain pour différentes inclinaisons..... **38**

Figure III.12: Puissance générée par le générateur PV à l'état ombrage total à 50% pour différentes inclinaisons..... **38**

Figure III.13: Puissance générée par le générateur PV à l'état ombrage total à 100% pour différentes inclinaisons..... **39**

Figure III.14: Puissance générée par le générateur PV à l'état ombrage partiel à 50% pour différentes inclinaisons..... **39**

Figure III.15: Puissance générée par le générateur PV à l'état ombrage partiel à 100% pour différentes inclinaisons..... **39**

Figure III.16: Comparaison des puissances PV dans le cas des deux perturbations **40**

Figure III.17: Comparaison des puissances PV dans le cas d'une inclinaison fixe à 45° et différents états du générateur PV **40**

Figure III.18: Pertes de puissance pour différents états du générateur et une inclinaison de 45° **40**

Figure III.19: Gains (pertes) en puissances entre l'inclinaison de 45° et les autres inclinaisons pour différents états du générateur PV..... **41**

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Paramètres du générateur PV utilisé **26**

Tableau III.1 : Résultats d'influence de l'angle d'inclinaison et d'ombrage opaque à 100% sur les puissances du générateur PV **37**

Tableau des abréviations et symboles

CO2	Monoxyde de carbone
P-N	Positive-négative
ni	La concentration intrinsèque
Si	Silicium
PV	Panneau photovoltaïque
FF	Facteur de forme
Icc	Courant de court-circuit
Vco	Tension circuit-ouvert
PPM	Point de puissance maximale
Ippm	Courant au point de puissance maximal
Vppm	Tension au point de puissance maximal
η	Le rendement
Npv	Nombre de panneaux photovoltaïque
Iph	Photocourant ou courant généré par l'éclairement
Id0	Courant de saturation de la diode
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance shunt
K	Constante de Boltzmann
q	Charge d'électron
A	Coefficient d'idéalité de la cellule
Tj	Température de la cellule
Tjréf	la température référence
Ta	la température référence
α	Coefficient du courant en fonction de la température
β	Coefficient de la tension en fonction de la température
Eg	Energie de gap
Eréf	L'irradiation solaire référence
P	Puissance
V	Tension
I	Courant
μm	Nanomètre (10e-9 m)
W	Unité de mesure de puissance (Watt)
V	Unité de mesure de tension (Volte)
A	Unité de mesure de courant (Ampère)
°C	Unité de mesure de la température (degré Celsius)

Tableau des abréviations et symboles

Ω	Unité de mesure de résistance (ohm)
ϑ	Inclinaison
$^{\circ}$	Degré : unité de mesure d'angle
%	Pourcentage
ΔP	Perte en puissance
SI	Le Système International d'unités
Max	Maximum

Introduction générale

Introduction générale

Dans la conjoncture actuelle plusieurs sources sont utilisées pour produire de l'énergie électrique. Le terme mix électrique est souvent assimilé afin de définir les sortes de sources utilisées dans la production ; en premier lieu, les énergies non renouvelables telles que le nucléaire, le pétrole et le gaz naturel, leur exploitation sont souvent critiqués vu leurs reflets dangereux et leurs effets néfastes sur la vie humaine et la vie terrestre en général.

Les énergies renouvelables prennent une place importante dans le domaine électrique, aussi appeler énergies propres (vertes) réfèrent à leur rôle de protectrice de la planète et la facilité d'exploitation de ces sources. Différentes sources d'énergies renouvelables coexistent dans le processus d'obtention d'énergie électrique, il subsiste cinq grandes familles d'énergies renouvelables : énergie solaire, éolienne, hydraulique, biomasse et géothermie. Parmi les énergies évoquées ci-dessus, on distingue une on particulier qui est l'énergie solaire. Cette dernière est exploitable dans deux cas, la première est l'énergie solaire thermique, la deuxième est l'énergie solaire photovoltaïque. Elles ont le même mode de fonctionnement compte tenu du captage du rayonnement solaire.

L'énergie solaire photovoltaïque connaît une progression remarquable malgré divers facteurs qui empêche la bonne utilisation et l'efficacité de ce processus de production. Depuis de longues années d'existence, le solaire photovoltaïque à connu des difficultés et des problèmes d'exploitation, un générateur photovoltaïque ne peut être utilisable sauf s'il est dans un milieu parfait. Par ailleurs, les complications rencontrer en site : l'ensoleillement irrégulier et instable, le degré d'inclinaison et la fluctuation de la température, ce qui engendre le faible rendement énergétique par rapport aux autres énergies.

Dans le travail illustré, on propose dans le premier chapitre un bref passage sur les énergies non renouvelables, puis un état de l'art sur énergies renouvelables sera présenté avec un intérêt particulier à l'énergie solaire photovoltaïque.

Au second chapitre nous mettons en relief la modélisation d'un générateur photovoltaïque, pour d'une éventuelle caractérisation. Un volet de la caractérisation par une méthode pratique sera abordé.

Le troisième chapitre sera consacré à l'introduction de certaines perturbations qui peuvent affecter la production du générateur photovoltaïque, on va se contenter de deux paramètres à savoir l'ensoleillement non homogène (ombrage) et le défaut d'inclinaison.

Chapitre 01 : Etat de l'art sur les énergies renouvelables

I. Introduction

Dans le monde d'aujourd'hui on distingue deux classifications majeures d'énergies qui sont les énergies non renouvelables et d'autres renouvelables.

Les énergies non renouvelable sont des sources d'énergies qui ne peuvent pas être régénérer rapidement, elles sont issue par la transformation des matières organiques ensevelie depuis des millions d'année sous terre. Appeler aussi énergies fossiles, il existe plusieurs types de sources tels que : le pétrole, le gaz naturel et le charbon ainsi que le nucléaire qui sont utiliser dans le domaine énergétique aux quatre coins du monde. Leurs utilisation est bien bénéfique en vue de leur rendement énergétique, mais elle pose des problèmes environnementaux majeurs comme l'émission de gaz à effet de serre, la pollution d'air et des eaux et elles ont un retour négatif sur le milieu naturelle tel que habitat et l'être humain en général.

En raison de certains problèmes causés par leur exploitation les gouvernements et les organisations encourage de plus en plus la transition énergétique du non renouvelable au renouvelable. La transition énergétique consiste au passage vers l'utilisation des énergies renouvelables. Les énergies renouvelables sont toute énergie naturelle et non épuisable, elles sont caractérisées par leur renouvellement rapide et infini tels que le soleil, le vent et l'eau. Leur utilisation est simple, rapide et efficace. Elles sont la solution globale pour limiter la pollution et mettre fin aux effets néfastes de la non-renouvelable sur l'humanité.

L'énergie électrique provenant de diverses sources renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, biomasse, géothermique et marémotrice, est considérée comme une alternative de production dans les systèmes électriques du monde aujourd'hui.

Dans ce chapitre sont présentés les différents types d'énergie, leurs définitions ainsi que leurs avantages et inconvénients. Pour mieux cerner la thématique du projet un intérêt particulier sera consacré à la technologie solaire photovoltaïque.

II. Energies non renouvelables

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire. Cependant ces formes de production engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème aujourd'hui non résolu, du

stockage des déchets radioactifs [1]. Actuellement, le paysage énergétique change radicalement car plusieurs ressources fossiles sont en voie de disparition et de nouvelles ressources associées à des technologies plus performantes, propres et fiables sont indispensables pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

III. Energies renouvelables

L'énergie est dite renouvelable quand il s'agit de sources reconstituées naturellement, elles sont des énergies provenant de sources qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. La lumière du soleil et le vent, par exemple, constituent de telles sources qui se renouvellent constamment. Leur répartition régionale est beaucoup moins inégalitaire que celle des énergies fossiles. Pratiquement, chacune des régions du monde dispose, au niveau local, sous une forme ou une autre (soleil, biomasse, vent, hydraulique, etc.), de ressources renouvelables importantes dont l'exploitation potentielle pourrait jouer un rôle majeur dans leurs bilans énergétiques [1].

III.1. Energie éolienne

III.1.1. Définition :

L'énergie éolienne est un type d'énergie "renouvelable" qui ne se dégrade pas géographiquement au cours des changements de saisons, elle utilise l'énergie cinétique du vent comme énergie de base pour ça chaîne de conversion. C'est une énergie qui ne crée pas de déchets radioactifs et elle n'a pas d'effet sur le changement climatique, ni des dégâts sur l'environnement[2].

III.1.2. Principe de la conversion éolien

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice[2].

Pour des applications en génie énergétique éolien, l'estimation de la puissance moyenne produite par un aérogénérateur, passe nécessairement par la connaissance de la vitesse du vent à la hauteur de son moyeu. Pour obtenir des données de vitesses du vent à une hauteur désirée, on doit procéder à une extrapolation verticale des vitesses du vent

mesurées généralement à la hauteur normalisée de 10 mètres du sol, au moyen du modèle de puissance, souvent utilisé dans la littérature existante.

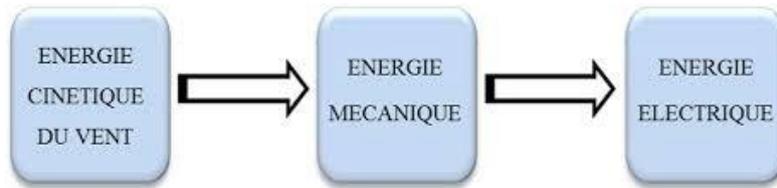


Figure I.1 : conversion de l'énergie cinétique du vent

III.1.3. Types d'éoliennes :

Il existe deux types majeurs d'éoliennes qui sont les éoliennes à axe horizontale et des éoliennes à axe de verticale, ces dernières utilisent des différentes technologies pour capter l'énergie cinétique du vent.

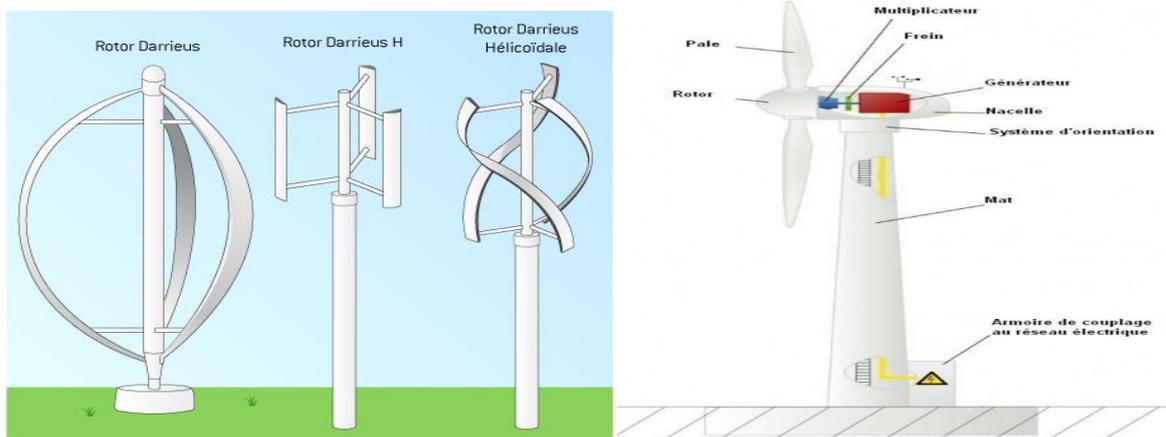


Figure I.2 : Eolienne a axe vertical et horizontal

III.1.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

✓ Avantages :

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement.
- ✓ L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
- ✓ Mode d'exploitation très simple avec une possibilité d'arrêt de production à n'importe quel moment.
- ✓ Un très bon rendement énergétique.

➤ Inconvénients :

- La puissance et la nature du vent ont une influence sur la qualité de la puissance produite.
- Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Bruit : il a notamment diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs.

III.2. Energie hydro-électrique

III.2.1. Définition :

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus communément converti en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique. L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique lié au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages. Cette source d'énergie est indirectement alimentée par l'énergie solaire, toutes comme de nombreuses autres sources d'énergies renouvelables exploitées [3].

III.2.2. Principe de fonctionnement de centrale hydraulique :

Le barrage retient une partie de l'eau qui s'écoule et crée un lac de retenue. Ce lac constitue un stock d'eau, c'est donc un moyen de stocker de l'énergie renouvelable. Dans le cas de centrales au fil de l'eau, cette réserve n'existe pas et il n'est pas possible de moduler le débit de l'eau en fonction des besoins.

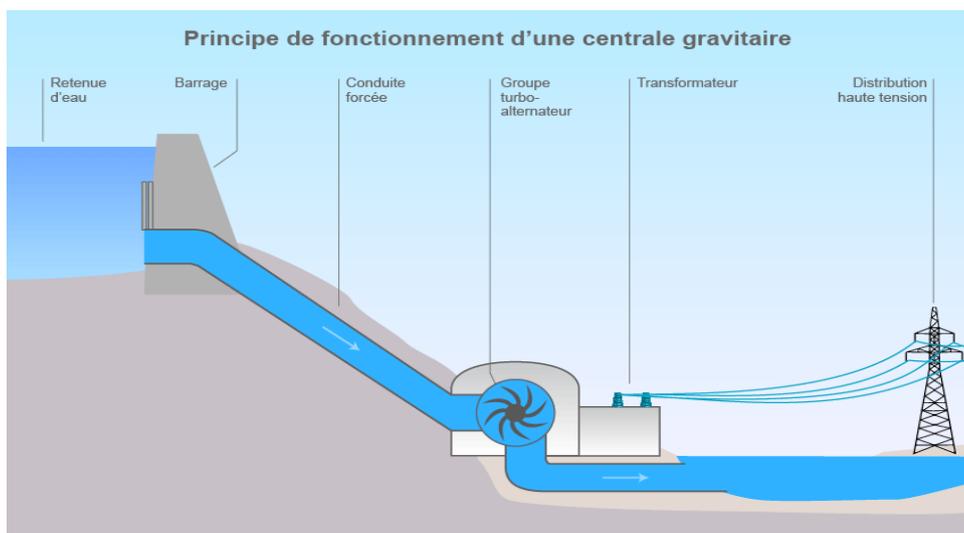


Figure I.3 : Principe de fonctionnement de la centrale hydraulique

Le débit du cours d'eau ou l'ouverture des vannes du barrage entraîne l'eau dans un canal de dérivation jusqu'aux turbines électriques. Plus le débit et la hauteur de chute d'eau sont importants, plus l'eau transporte de l'énergie. Cette eau actionne les turbines qui entraînent à leur tour des alternateurs pour produire du courant électrique. Un transformateur injecte ensuite cette électricité dans le réseau, où elle est transportée par des lignes à haute ou très haute tension[3].

III.2.3. Avantage et inconvénients de l'énergie hydraulique :

✓ **Avantage :**

- ✓ Une énergie entièrement maîtrisée.
- ✓ Des rendements intéressants.
- ✓ Une flexibilité de la production.
- ✓ Une sécurité absolue.

➤ **Inconvénients :**

- Des tarifs investissements énorme.
- Des impacts environnementaux à la construction.
- Le risque de sécheresse.

III. 3. La Biomasse

III.3.1. Définition :

Dans le domaine d'énergie, le terme biomasse fait référence à l'énergie qui provient de la décomposition des matières organiques. En écologie, la biomasse est la masse totale d'espèces vivantes présente dans un milieu naturel donné.

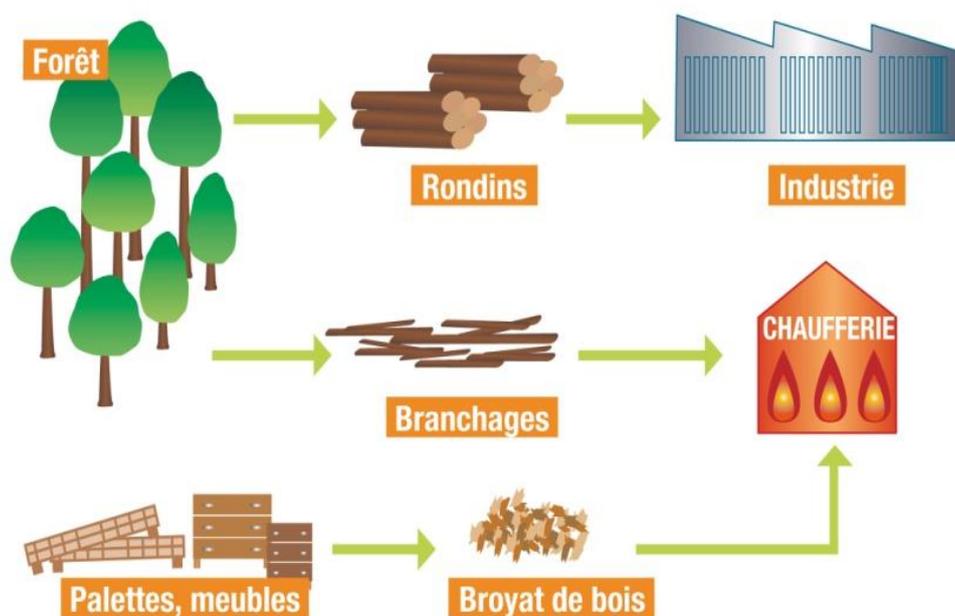


Figure I.4 : Source de biomasse

III.3.3. Avantages et inconvénients de la biomasse

✓ *Avantage :*

- ✓ La bioénergie, exploitée de manière durable et renouvelable, ne participe pas au réchauffement climatique grâce à son cycle neutre du carbone.
- ✓ La biomasse est biodégradable, les risques de pollution sont très réduits.
- ✓ La production de la biomasse est locale (contrairement aux combustibles fossiles) et évite les transports sur de longues distances, le gaspillage d'énergie et l'augmentation des coûts.

➤ *Inconvénients :*

- les coûts de transport et de mobilisation seront trop élevés.
- Il est important de n'utiliser que du bois sec et propre (c'est-à-dire pas de bois traité de récupération) dans les installations de chauffage au bois. L'utilisation de bois humide et de bois traité, à l'encontre des recommandations du constructeur, peut mener à des émissions de substances nocives.
- Toute installation de combustion peut émettre du CO et des particules fines nocives pour la santé

III.4. Géothermie

III.4.1. Définition :

La chaleur terrestre est une source d'énergie durable pour la production de chaleur et d'électricité, qui ne dépend ni des conditions climatiques, ni de la saison ou du moment de la journée. La diversité des températures et des profondeurs autorise une multitude de variantes d'utilisation. L'énergie géothermique, c'est la chaleur stockée au-dessous de la surface du sol. Cette chaleur provient pour l'essentiel de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, et pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones plus profondes de la Terre. Ce que l'on appelle géothermie, c'est l'utilisation de cette chaleur.

Dans la plupart des régions, les roches possèdent une température d'environ 25-30°C à 500 m de profondeur, et de 35-45°C à 1000 m. Dans d'autres régions, où les conditions géologiques sont différentes (écorce terrestre amincie, volcanisme), ces températures peuvent atteindre 100°C, voire 200°C ou plus ! La chaleur terrestre est une source d'énergie quasiment inépuisable. Sur la base de ce constat, la géothermie a sensiblement gagné en importance ces dernières années et suscite de grands espoirs dans le domaine de l'approvisionnement en

énergie. L'importance de la géothermie dans les scénarios d'avenir en matière de politique énergétique ne cesse de croître [4].

Il existe deux grands types de géothermie :

- La Géothermie de surface.
- La Géothermie dite « verticale » ou en profondeur.

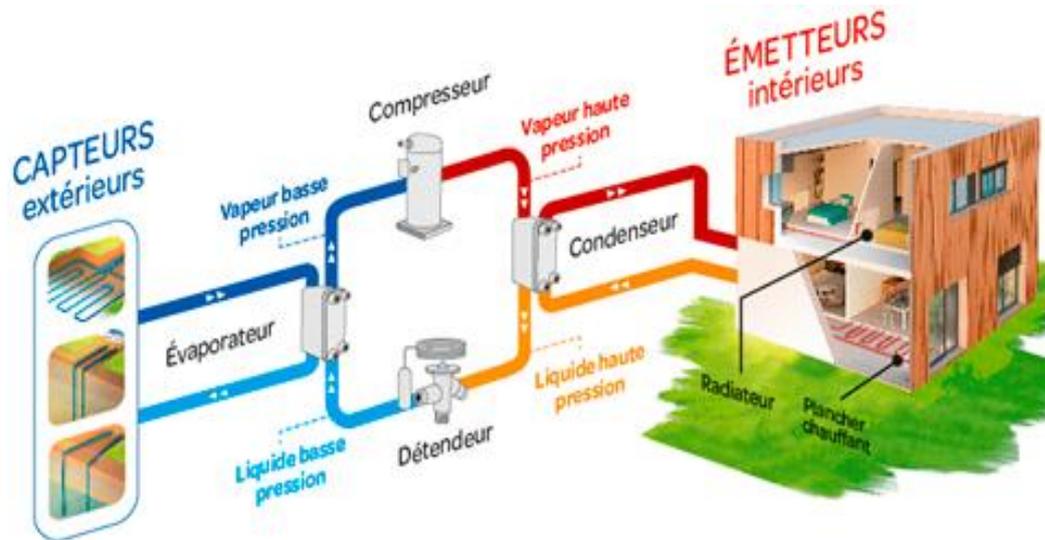


Figure I.5 : Exemple d'exploitation de la géothermie

III.4.2. Avantages et inconvénients de la géothermie

✓ **Avantage :**

- ✓ Energie inépuisable.
- ✓ Fonctionnement double : en Hiver, avec le chauffage. En Eté, avec le refroidissement.
- ✓ Energie propre : aucune pollution n'est dégagée. Pas d'émission de CO₂.

➤ **Inconvénients :**

- Prix d'installation relativement élevé.
- Géothermie verticale : il faut se situer sur une zone propice à l'installation de tuyaux pouvant descendre loin en profondeur.
- N'est utilisable en domestique que pour le chauffage, l'électricité pouvant être développée en centrale Géothermique. [4]

III.5. Energie des marées

III.5.1. Définition :

Le contact du vent avec la surface de la mer crée des vagues dont le mouvement ondulatoire appelé houle s'étend sur plusieurs kilomètres. L'exploitation de leur énergie est appelée l'énergie houlomotrice et comme le vent elle est aussi aléatoire.

Les systèmes développés actuellement exploitent l'énergie de déferlement des vagues, plus nombreux sont ceux qui exploitent l'ondulation des vagues en pleine mer.

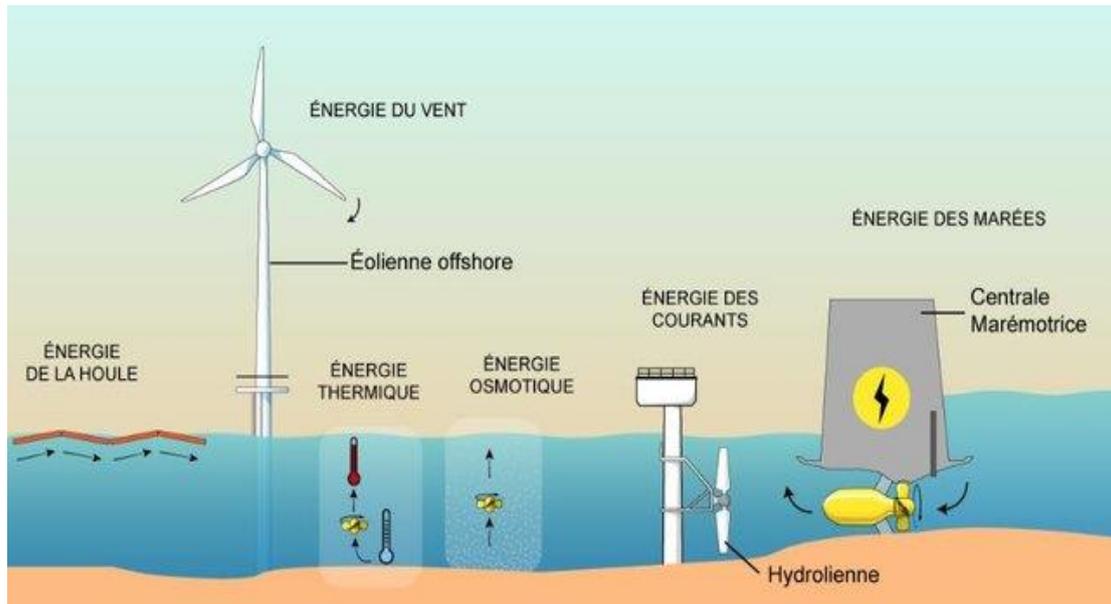


Figure I.6 : Les technologies de production d'énergie océanique

III.4.2. Avantages et inconvénients de l'énergie des marées

✓ **Avantage :**

- ✓ C'est une énergie propre, son utilisation n'émet pas de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.
- ✓ Ses installations sont silencieuses, grâce à cela il n'y a pas de pollution sonore.
- ✓ Une fois les installations construites, elles sont faciles à entretenir et la production d'électricité est économiquement abordable.

➤ **Inconvénients :**

- La conception et la construction de ses infrastructures entraînent un coût élevé.
- Altération des habitats marins, car les grandes dimensions des infrastructures modifient la zone où elles sont construites.
- Elles affectent la salinité et la qualité de l'eau.

III.6. Energie solaire

III.6.1. Définition :

Est une forme d'énergie renouvelable qui est produite à partir de la lumière du soleil. Il existe deux formes de cette énergie : l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque. Cette dernière peut être capté et transformé en électricité à l'aide de technologie telle que les panneaux solaires photovoltaïques, tandis que l'autre emmagasine la chaleur issue captage de rayon de soleil pour réchauffer un fluide qui se trouve sous les panneaux photovoltaïques thermique.

III.6.2. Energie solaire thermique

III.6.2.1. Définition :

L'énergie solaire thermique est l'énergie thermique du rayonnement solaire. Elle est captée dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçu par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entrainer des alternateurs et ainsi obtenir d l'énergie électrique, production de froids, etc), c'est ainsi une forme d'énergie solaire, provenant de la chaleur transmise par le soleil par le rayonnement.[5]

III.6.2.2. Principe de fonctionnement :

Les panneaux solaires thermiques quant à eux, ne captent pas les rayons du soleil, mais emmagasinent plutôt la chaleur qui en est issue et la transmettent au ballon d'eau chaude pour réchauffer l'eau qui s'y trouve à travers un circuit fermé. Cette eau peut alors être distribuée dans toute la maison. On peut utiliser ce système pour chauffer les locaux, les piscines, sécher les récoltes ou encore faire cuire des aliments (fours thermiques). [6]

III.6.2.3.Type de panneaux solaire thermique :

Les panneaux solaire thermique sont des capteurs thermique.il en existe plusieurs sortes tels que :

- les capteurs plans vitrés : ce sont les plus courants dans le secteur résidentiel. Ils se constituent d'une plaque en métal noir qui absorbe le rayonnement solaire et est en contact avec les tubes contenant le fluide caloporteur. Un isolant résistant aux fortes températures est placé sous l'ensemble pour garder la chaleur dans les tubes. Un vitrage en verre trempé recouvre les tubes pour les protéger et crée un effet de serre pour chauffer encore plus le fluide caloporteur.
- les capteurs tubulaires sous vide : ils se composent de plusieurs tubes en verre placés les uns à côté des autres et dans lesquels une plaque métallique noire absorbe l'énergie

solaire. Ces tubes sont placés sous vide pour limiter les pertes de chaleur. Ce type de capteurs s'avère vraiment intéressant pour des conditions plus extrêmes. En temps normal, des capteurs plans vitrés peuvent suffire.

- les capteurs plans non vitrés : ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines. Moins coûteux, ils sont également moins performants et plus sujets à des dégradations puisqu'ils ne sont pas protégés par une vitre.
- les capteurs monoblocs : ils sont munis d'un ballon de stockage placé directement sur le toit. L'avantage est la proximité entre le ballon d'eau et le panneau. En revanche, le ballon est plus sujet aux pertes de chaleur sur le toit puisqu'il est en contact avec l'air extérieur. [7]



Figure I.7 : Exemple des capteurs solaires thermiques

III.6.3. Energie solaire photovoltaïque

III.6.3.1. Définition et Historique :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des nombreuses énergies alternatives actuellement disponibles, elle est la plus propre, la plus silencieuse et la plus « élégante » moyen d'utiliser l'énergie solaire dans le but de générer de l'électricité, produite à partir du rayonnement solaire, via un composant électronique : la cellule photovoltaïque.

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu[8].

❖ *l'historique du système photovoltaïque :*

En 1839 Le physicien français EDMOND BECQUEREL a découvert l'effet photovoltaïque. Après quelque année et plus exactement en 1875 WERNER VON SIEMENS

expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, Malheureusement, le phénomène est encore considéré comme anecdotique jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale. En 1883, FRITTS réalise des cellules solaires de grande surface à base de Silicium. Ces cellule atteignait un rendement de près de 1 %, et utilisait de l'or et du sélénium, des matériaux coûteux. Les années suivant cette découverte et plus précisément en 1954 Trois chercheurs américains CHAPIN, PEARSON et PRINCE, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

Une cellule avec un rendement de 9% est mise au point en 1958. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. Au cours de l'année 1973 La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware. En 1983, l'australien Hans Tholstrup construit le "Quiet Achiever", première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourant une distance de 4 000 km en Australie



Figure I.8 : Champ photovoltaïque

III.6.3.2. Les Rayonnements Solaires:

Le rayonnement solaire est composé de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$).

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [9]

- **Rayonnement direct :**

Flux solaire reçu par la terre sous forme de rayons parallèles, provenant du soleil et n'ayant subi aucune réflexion ou dispersion dans l'atmosphère [9].

- **Rayonnement diffus:**

C'est la partie du rayonnement solaire, ayant subi multiples réflexions (Dispersion), dans l'atmosphère [10].

- **Rayonnement réfléchi (Albédo):**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol. Ce dernier dépend directement de la nature du sol (nuage, sable, roches...etc.) [9].

III.6.3.3. La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque. Elle permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Il existe plusieurs types de cellules, parmi les plus utilisées on trouve:

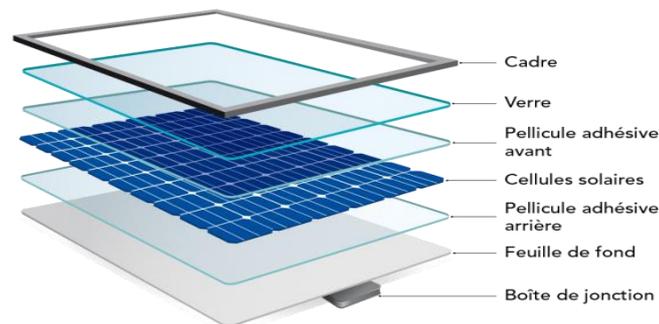


Figure I.9 : Constitution d'une cellule PV

➤ **Les cellules mono-cristallines**

- Première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en laboratoire.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

➤ **Les cellules poly-cristallines**

- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

➤ **Les cellules amorphes**

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en laboratoire.

III.6.3.4. L'effet photovoltaïque :

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photovoltaïque. L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le Soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire, l'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une

barrière de potentiel dans Le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé.

Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives. [11]

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le Germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

III.6.5. Dopage des semi-conducteurs :

Le dopage d'un matériau consiste à introduire dans sa matrice des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire d'avantage d'électrons ou de trous. Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial. Dans un semi-conducteur intrinsèque, ou pur, il n'y a aucun atome dopant. Tous les électrons présents dans la bande de conduction proviennent donc de la bande de valence. Il y a donc autant d'électrons que de trous : $n = p = n_i$;

- n_i : est la concentration intrinsèque.

Tout dopage sert à modifier cet équilibre entre les électrons et les trous, pour favoriser la conduction électrique par l'un des deux types de porteurs [12]

Il existe deux types de dopage :

III.6.5.1. Dopage de type N :

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe qui va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.

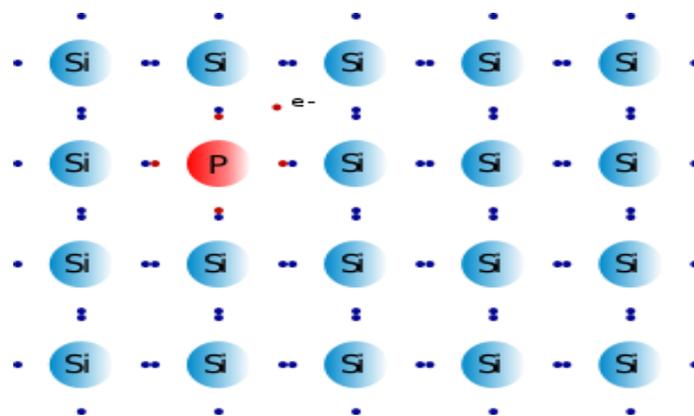


Figure I.10:Dopage de type N du Silicium

III.6.5.2. Dopage de type P :

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe qui va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.

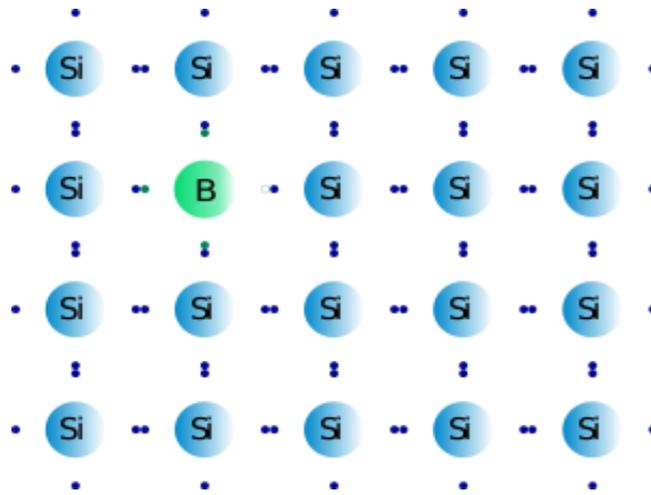


Figure I.11: Dopage de type P du Silicium

III.6.6. La jonction P-N :

Une jonction P-N est créé en juxtaposant un semi-conducteur dopé P avec un semi-conducteur dopé N. On l'utilise dans de nombreux dispositifs électroniques. Les électrons en excès de la région dopée N ont tendance à diffuser vers la région P (où ils sont minoritaires). Il en est de même pour les trous en sens inverse.

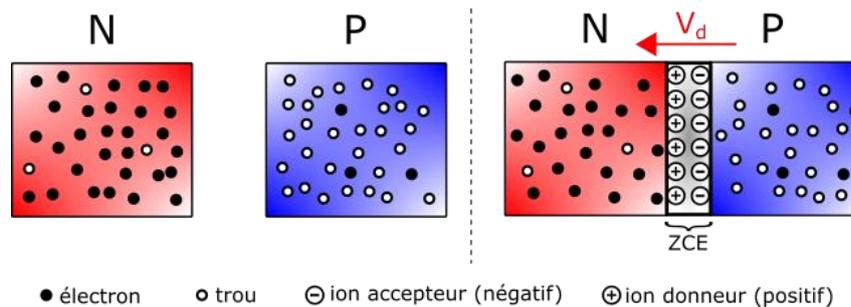


Figure I.12 : Jonction P-N et mouvement des électrons et des trous

Les électrons et les trous se concentrent alors au niveau de l'interface entre les deux tranches. Cela a pour effet de créer un champ électrique créant une barrière de potentiel au niveau de la zone centrale. Cette zone devient un isolant et s'appelle la jonction P-N. Le champ électrique ainsi créé a tendance à repousser les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P. De ce fait, lorsque la zone dopée N est exposée au rayonnement lumineux, un électron de la couche de valence du silicium est arraché, laissant parallèlement un trou. Sous

l'effet de champ électrique créé par la jonction P-N, l'électron diffuse à l'extrémité de la zone N, et le trou se déplace à l'extrémité de la zone P. Lorsque les deux faces de ces deux zones sont reliées par un conducteur, un courant se crée, car l'électron va combler le trou. Une cellule photovoltaïque est constituée d'une tranche dopée N posée sur une tranche dopée P. L'interface entre les deux tranches s'appelle la jonction P-N. La tranche dopée N correspondra à la partie de la cellule exposée au rayonnement solaire. [13]

III.6.7. Avantages et inconvénients de la technologie solaire :

✓ Avantages

- ✓ Une haute fiabilité.
- ✓ Le montage des panneaux solaires est simple et adaptable à des besoins énergétiques différents. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications à différentes puissances de la plus basse à la plus haute.
- ✓ Le coût faible de fonctionnement vu les entretiens minimiser et il ne nécessite ni transport, ni personnel spécialisé.

➤ Inconvénients

- Le coût d'investissements élevé pour fabrication du module PV.
- Le rendement d'un module PV est faible,
- Dépend des conditions météorologiques (L'ensoleillement).

IV. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une synthèse de l'ensemble des technologies de production d'énergie par voies renouvelable ; ce sont ces énergies dont la source est illimité et dont l'exploitation cause le moins de dégât écologique. Un intérêt particulier est porté à la technologie solaire photovoltaïque pour mieux cerner notre problématique.

Au chapitre suivant nous allons s'intéresser à l'identification du générateur photovoltaïque par méthode théorique et pratique.

Chapitre 02 : Identification des caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

I. Introduction

La conversion solaire photovoltaïque est assurée à partir de la transformation en électricité des rayonnements solaire par des cellules photovoltaïque (photopiles). En réalisant une interconnexion entre elles, on forme un module (panneau), un ensemble de ces derniers nous permet d'obtenir un champ photovoltaïque.

Le module PV est l'élément de base de tout système photovoltaïque. Il comprend une quarantaine de photopiles branchées en série de façon à constituer en permanence une seule unité d'énergie électrique. Il faut cependant noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans la photopile, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas donc une pile mais un convertisseur instantané, qui pourra fournir une énergie sous forme électrique quand il reçoit une énergie sous forme de rayonnement solaire. Afin de déterminer la puissance que peuvent fournir les modules photovoltaïques à la charge électrique et aux dispositifs de stockage.

Dans ce chapitre nous allons aborder les différentes propriétés et caractéristiques du générateur photovoltaïque en commençant par une étude théorique puis une étape expérimentale.

II. Caractéristiques et propriétés du générateur photovoltaïque

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres dont le rendement de conversion, le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, et le facteur de forme (FF). Ces paramètres sont extraits des caractéristiques courantes tensions qui permettent de comparer différentes cellules dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit :

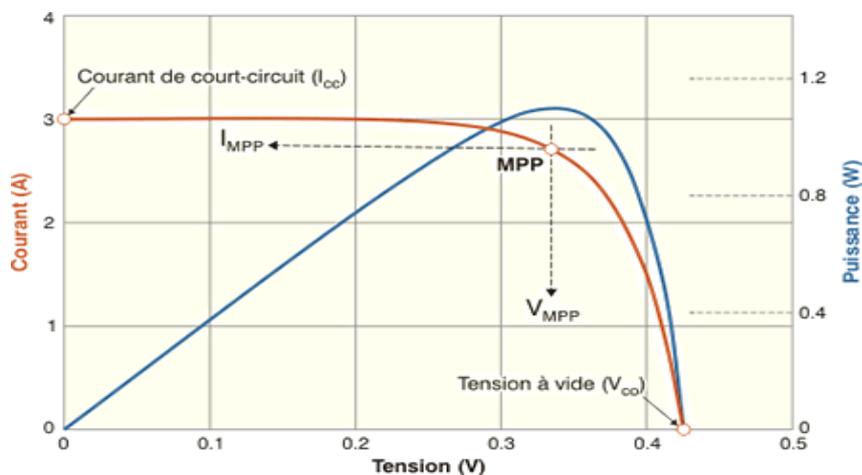


Figure II.1 : Caractéristiques électriques d'une cellule élémentaire

II.1. Courant de court-circuit « I_{cc} »

C'est le courant obtenu aux bornes de la cellule quand la tension à ses bornes est nulle, $V=0$. Il constitue le maximum de courant qui peut être obtenu d'une cellule. Sa valeur typique sera à peu près d'une dizaine de milliampères par centimètre carré de cellule.

II.2. Tension de circuit ouvert « V_{co} »

C'est la tension pour laquelle le courant aux bornes de la cellule est nul ; elle constitue la tension maximale qui peut être obtenue d'une cellule ; elle se situe autour de 0.6 V pour la cellule en silicium.

II.3. Puissance maximale « P_{max} »

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement, (I_{max} , V_{max} , P_{max}) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} , et tension comprise entre 0 et V_{co}) (Fig. II.1) [14]. Ce maximum peut être déterminé en portant sur le même graphique de la caractéristique I-V et les hyperboles de puissance constante. Le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangence des deux courbes comme le montre la figure (II.1) La puissance maximale délivrée à la charge est donnée par l'expression

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (1)$$

II.4. Facteur de forme « FF »

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage (FF), (ou fill factor en Anglais), ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximal que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle I_{cc} , V_{co} . Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température, son expression est donnée par [15] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} \quad (2)$$

II.5. Rendement PV « η »

Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses. C'est le paramètre qui définit le mieux le fonctionnement de la cellule PV, il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{cc} \cdot FF}{E \cdot S} \quad (3)$$

La puissance d'entrée qui est l'éclairement incident sur la cellule PV par unité de surface, correspondant à l'éclairement lumineux E du soleil sous forme de photons par unité de surface reçue (aux conditions standard, $1000\text{W}/\text{m}^2$), S est la surface de la cellule et FF est le facteur de forme [16].

Comme on le voit l'efficacité de conversion de puissance d'une cellule solaire est proportionnelle aux trois paramètres photovoltaïques principaux : le courant de court-circuit, tension en circuit ouvert, et le facteur de remplissage, pour un éclairement donné E ;

Avec :

- I_{cc} : Le courant de court-circuit.
- V_{co} : La tension en circuit ouvert.
- P_{max} : Puissance maximale débitée par la photodiode.
- I_{max} : Le courant au point de puissance maximale.
- V_{max} : Tension au point de puissance maximale.
- FF : Le facteur de forme.
- η : Le rendement de conversion d'énergie.

III. Association des cellules PV

Dans les conditions standard STC ($1000\text{W}/\text{m}^2$; 25°C), la puissance maximale pour une cellule au silicium de 10 cm^2 serait d'environ 1.25 W . La cellule PV élémentaire constitue donc un générateur électrique de très faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles, donc à cet effet on doit poser une question qui est : comment on peut concevoir un système qui nous fournit la bonne tension et le bon courant ? qui peut combler la demande de puissance de la charge et stocker cette énergie pour une utilisation antérieure ?

Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés des combinaisons d'association comme suit :

III.1. Association en série

Ce type d'association est fait à partir d'une connexion (branchement) entre deux ou plusieurs panneaux (la sortie du premier PV vers l'entrée du deuxième ainsi de suite), cette combinaison nous permet d'augmenter la tension délivrée par le panneau et elle nous permet

de maintenir la même valeur du courant produit par un seul panneau donc de tous les panneaux photovoltaïques installés (la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules). Pour calculer la tension totale délivrée par un générateur photovoltaïque en utilise la formule suivante :

$$V_{tot} = V_{co} \cdot N_{pv_serie} \quad (4)$$

- V_{tot} : tension totale délivré par le générateur photovoltaïque.
- V_{co} : tension de circuit-ouvert (délivré par un seul panneau).
- N_{pv_serie} : nombre de PV installé en série.

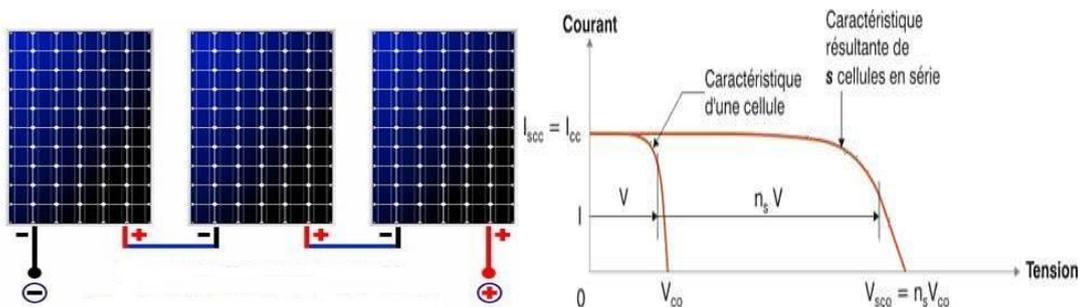


Figure II.2 : Association des (cellules) panneaux PV en série.

III.1. Association en parallèle

L'association des panneaux photovoltaïques en parallèle consiste à raccorder deux ou plusieurs modules PV afin de crée une chaîne en parallèle qui va nous permettre d'accroître le courant obtenue lors de la production, cette combinaison va nous donner l'occasion de garder une tension stable, la même tension délivrer par un seul panneau donc la même valeur pour tout le générateur (le courant résultant correspond à la somme des courants générées par chacune des cellules). Pour calculer le courant total délivré par un générateur photovoltaïque en utilise la formule suivante :

$$I_{tot} = I_{cc} \cdot N_{pv_parallèle} \quad (5)$$

- I_{tot} : courant total délivré par le générateur photovoltaïque.
- I_{cc} : courant de court-circuit (délivré par un seul panneau).
- $N_{pv_parallèle}$: nombre de PV installé en parallèle.

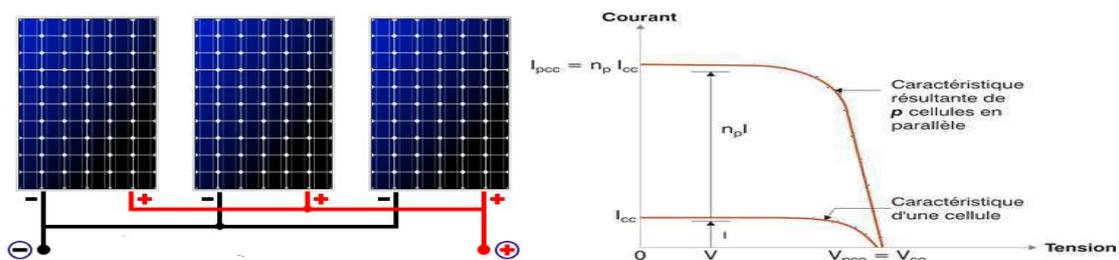


Figure II.3 : Association des (cellules) panneaux PV en parallèle.

III.3. Association en hybride

Le mot hybride veut dire le croisement et l'assemblage de deux système différent, dans notre cas ça veut dire une association ente deux combinaison différente, le montage en série et le montage en parallèle des cellules PV, la première permet d'augmenter la tension tandis que la deuxième augmente le courant du générateur. Le courant et la tension résultant correspond à la somme des courants et de tension de chaque cellule.

Pour calculer la tension et le courant résultant en utilise les expressions suivantes :

$$V_{tot} = V_{co} \cdot N_{pv_{serie}} \quad (6)$$

$$I_{tot} = I_{cc} \cdot N_{pv_{parallèle}} \quad (7)$$

- V_{tot} : tension totale délivré par le générateur photovoltaïque.
- V_{co} : tension de circuit-ouvert (délivré par un seul panneau).
- $N_{pv_{serie}}$: nombre de PV installé en série.
- I_{tot} : courant total délivré par le générateur photovoltaïque.
- I_{cc} : courant de court-circuit (délivré par un seul panneau).
- $N_{pv_{parallèle}}$: nombre de PV installé en parallèle.

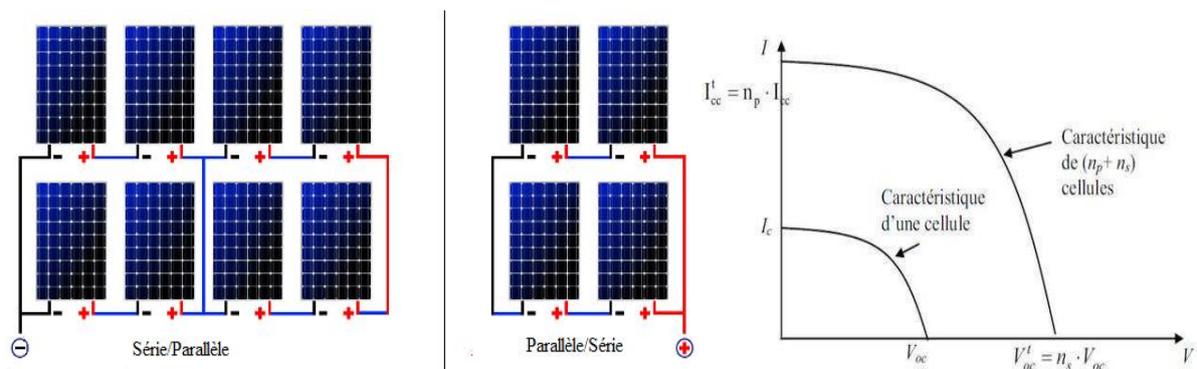


Figure II.4 : Association des (cellules) panneaux PV en hybride.

IV. Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour mieux utiliser l'énergie solaire PV, on doit connaitre d'une manière précise la caractéristique non linéaire $I-V$ du générateur, donc il est évident de modéliser ce générateur photovoltaïque. [17] Dans la littérature ; il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque [17], parmi ces modèles nous allons citer les modèles les plus utilisés.

IV.1 Modèle idéal [18] :

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant I_{ph} , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme

modélisant les phénomènes internes. Le courant I issu de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{k \cdot T_j}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (8)$$

$$I_d = I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{k \cdot T_j}} - 1 \right) \quad (9)$$

Avec :

- I_{ph} : photocourant ou courant généré par l'éclairement (A)
- I_{0d} : courant de saturation de la diode (A)
- R_s : résistance série (Ω)
- R_{sh} : résistance shunt (Ω)
- k : constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ (SI))
- q : charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C)
- T_j : température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$)

On peut déduire de cette expression un schéma équivalent, comme le montre la figure II.5

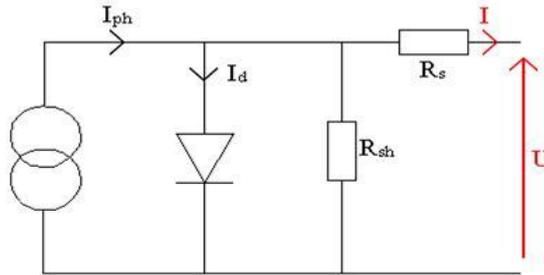


Figure II.5 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairement. Les deux résistances modélisent les pertes internes :

- Résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques du matériau.
- Résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Idéalement, on peut négliger R_s et I devant V , puis travailler avec un modèle simplifié :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{k \cdot T_j}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} \quad (10)$$

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans R_{sh} . On obtient :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{k \cdot T_j}} - 1 \right) \quad (11)$$

IV.2 modèle explicite :

C'est le modèle le plus simple, vu le nombre de paramètres qu'il nécessite. Mais la question qui se pose est sur la précision de la représentation d'une cellule solaire pratique ; ceci qui reste à vérifier. L'équation de ce modèle est : [19]

◦ **Calcul du courant I_p :**

$$I_p(i) = I_{cc} n_p \left[1 - \xi_1 \left(\exp \left(\frac{n_s \cdot V_p(i)}{c_2 \cdot V_{co}} \right) - 1 \right) \right] \quad (12)$$

Avec : $I_p = I_{max}(i) + \Delta I$

Où ξ_1 et ξ_2 sont des paramètres qui peuvent être calculés respectivement.

$$\xi_2 = \frac{\frac{V_{max}-1}{V_{co}}}{\ln \left(1 - \frac{I_{max}}{I_{cc}} \right)} \quad (13)$$

$$\xi_1 = \left(1 - \frac{I_{max}}{I_{cc}} \right) \exp \left(- \frac{V_{max}}{\xi_2 \cdot V_{co}} \right) \quad (14)$$

$$\Delta I = \alpha_{ref} \cdot \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \cdot \Delta T + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) n_p I_{cc} \quad (15)$$

Avec : $\Delta T = T_j - T_{jref}$

La température de jonction T_j de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$T_j = T_a + E \cdot \left(\frac{Noct - 20}{800} \right)$$

Avec NOCT: la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature) et T_a est la température ambiante.

◦ **calcul de la tension V_p :**

$$V_p = V_{max} \cdot \left[1 + 0.0539 \ln \frac{E}{E_{ref}} \right] + \beta_{ref} \cdot \Delta T \quad (16)$$

Avec :

- β_{ref} : Le coefficient de la tension en fonction de température (V/°C).
- E_{ref} : L'irradiation solaire de référence.
- T_{jref} : La température de référence.
- V_{max} = donnée

◦ **calcul de la puissance P_p :**

$$P_p = I_p \cdot V_p \quad (17)$$

IV.3 Modèle à une diode [20] :

C'est le modèle le plus classique de la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. A partir de la figure (II.5) nous définissons le modèle une diode du générateur :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (18)$$

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \left(1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref}) \right) \quad (19)$$

Avec :

- P_1, P_2, P_3 : paramètres constants.

$$I_d = I_{0d} \left[\exp \left(\frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V + R_s I) \right) - 1 \right] \quad (20)$$

Avec :

- I_{0d} : courant de saturation de la diode (A).
- q : Charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).
- K : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ (SI)).
- A : coefficient d'idéalité de la cellule.
- n_s : nombre de cellules connectées en série.

$$I_{0d} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j} \right) \quad (21)$$

- E_g : énergie de gap.
- P_4 : paramètre constant.

$$I_{Rsh} = \frac{V}{R_{sh}} \quad (22)$$

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur PV est la suivante :

$$I = P_1 \cdot E_s \left(1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref}) \right) - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j} \right) \cdot \left[\exp \left(\frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V + R_s I) \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (23)$$

V. Résultats de simulation

V.1. Théorique

Dans ce qui suit on va se contenter du modèle à une diode, le tableau suivant représente la plaque signalétique du générateur utilisé.

Paramètre	Valeur
<i>Puissance max</i>	80 W
<i>Courant max</i>	4.58 A
<i>Tension max</i>	21.9 V
<i>Courant de court-circuit</i>	4.95 A
<i>Tension de circuit ouvert</i>	35 V
<i>A</i>	3 mA/°C
<i>B</i>	-150 mV/°C

Tableau II.1 : Paramètres du générateur PV utilisé

Dans un premier temps nous allons simuler les caractéristiques électriques du générateur PV sous conditions STC (1000 W/m^2 , 25°C), puis nous évoquerons l'influence des deux paramètres ensoleillement et températures.

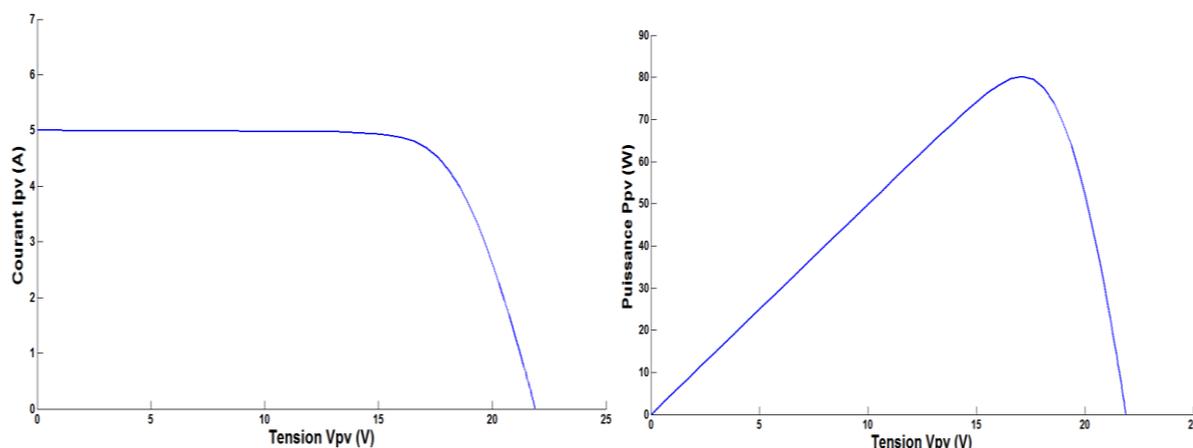


Figure II.6 : Caractéristiques électriques du générateur étudié sous conditions STC

✓ Influence de l'ensoleillement

Une simulation pour une température fixe de 25°C et différentes valeurs d'ensoleillement (1000 W/m^2 , 800 W/m^2 et 600 W/m^2) sera illustrée sur les figures suivantes : Les figures représentent un exemple de la courbe I(V) et P(V) d'un panneau pour différents ensoleillements :

⇒ Sur la courbe I(V) On remarque que la valeur du courant (I_{cc}) est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, par contre la tension ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclaircissement.

⇒ Sur la courbe P(V), on remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclairement.

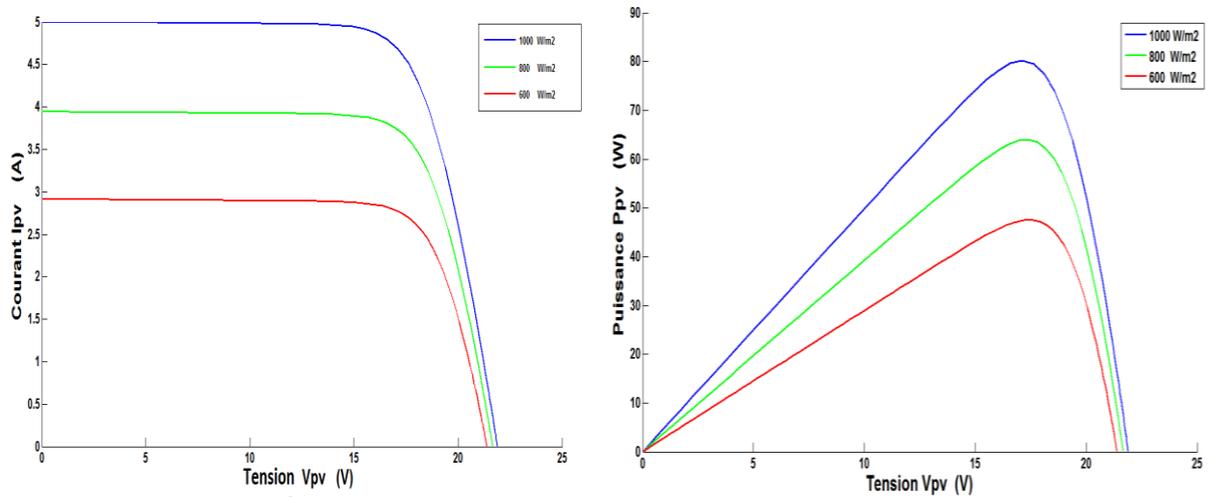


Figure II.7 : Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du générateur étudié

✓ *Influence de la température*

Une simulation pour un ensoleillement fixe de 1000 W/m² et différentes valeurs de température (25°C, 45°C et 65°C) sera illustrée sur les figures suivantes :

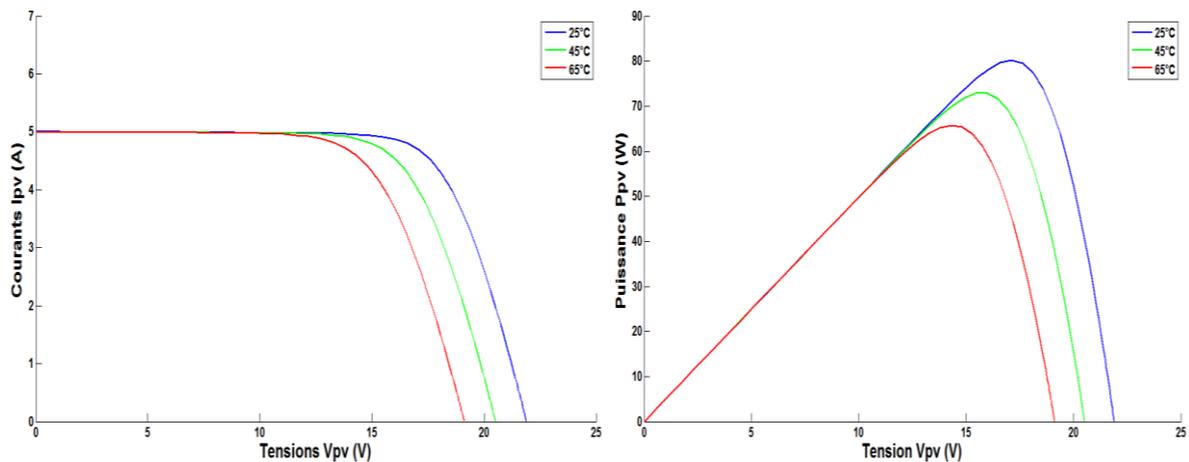


Figure II.8 : Influence de la température sur les caractéristiques du générateur étudié

Les figures représentent un exemple de la courbe I(V) et P(V) d'un panneau pour différentes températures.

⇒ Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres.

⇒ La tension à vide et la puissance maximale diminuent très faiblement lorsque la température augmente.

Dans le cas de l'association des générateurs PV, nous présenterons les caractéristiques électriques de la combinaison de deux panneaux en série et deux en parallèle

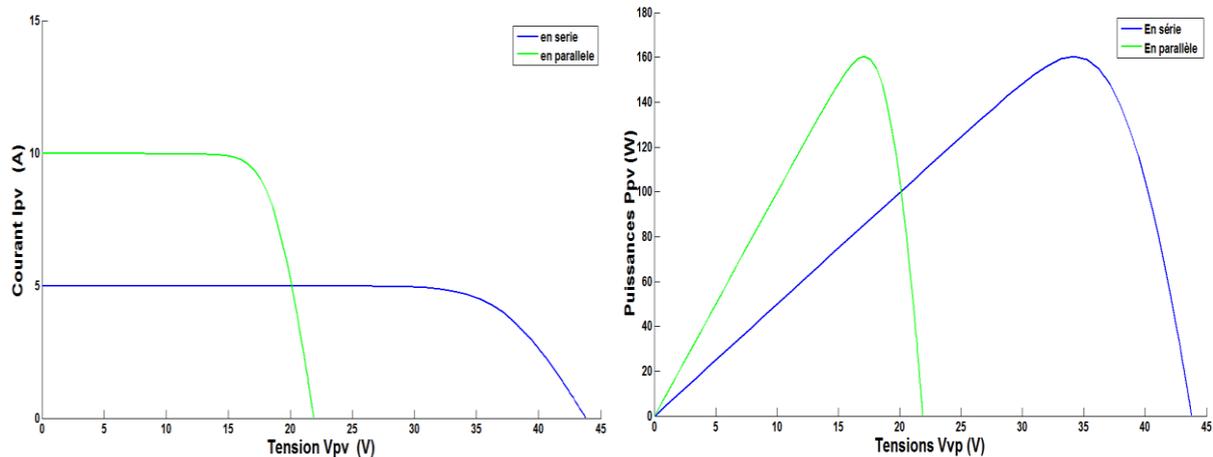


Figure II.9 : Différentes associations des générateurs étudiés

V.2. Pratique

Le montage utilisé dans cette partie a pour but la caractérisation pratique du générateur PV étudié ; un montage voltampèremétrique simple visant à modifier le point de fonctionnement du générateur grâce à un rhéostat pour imiter ces caractéristiques électriques théoriques.

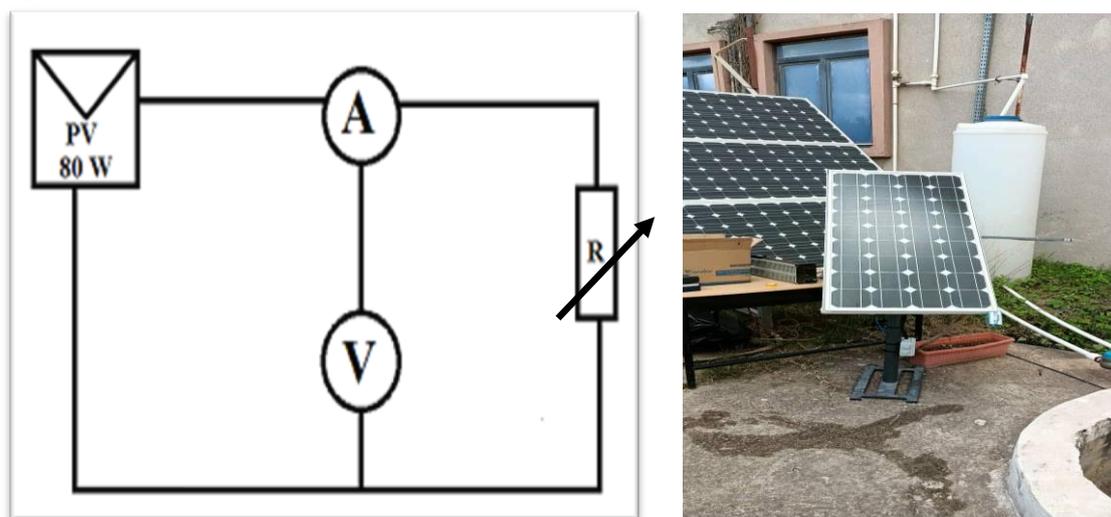


Figure II.10 : Montage voltampèremétrique utilisé.

Le matériel utilisé est simple et facilement maniable :

- ⇒ Un panneau photovoltaïque de 80W.
- ⇒ L'ampèremètre est connecté au montage en série pour mesurer le courant à la sortie de la source (le panneau photovoltaïque).
- ⇒ Le voltmètre est monté en parallèle pour obtenir la tension aux bornes de cette dernière.
- ⇒ Un rhéostat pour modifier le point du fonctionnement du générateur.

Les caractéristiques électriques obtenues sont représentées sur la figure (II.11) :

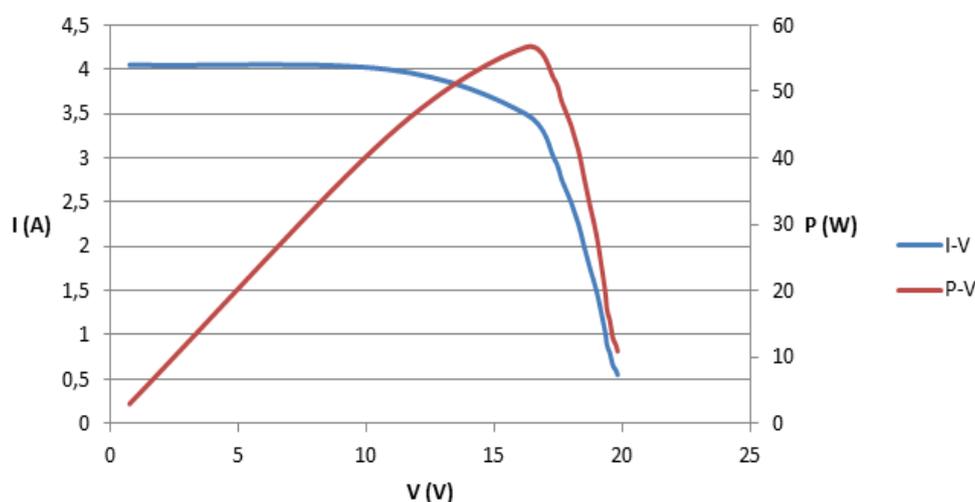


Figure II.11: Caractéristiques électriques pratiques I-V et P-V du générateur utilisé

On constate que les caractéristiques électriques obtenues pratiquement sont similaires à celles qui sont visualisées par simulation avec quelques incertitudes dus à la valeur de la résistance utilisée.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé dans MATLAB/simulink et caractérisé le fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques. Les résultats obtenus montrent que: la symbolisation du générateur PV permet de déterminer le fonctionnement électrique optimal du générateur PV en fonction des conditions météorologiques (éclairage, température,...). Une caractérisation pratique a été réalisée pour initier le chapitre suivant qui va traiter le problème du fonctionnement perturbé du générateur PV.

**Chapitre 03 : Étude de
fonctionnement perturbé d'une
chaîne de conversion photovoltaïque**

I. Introduction

Lors de l'installation des modules photovoltaïques, on doit tenir compte de plusieurs paramètres qui vont nous permettre un bon captage du rayonnement solaire et une bonne exploitation pendant les heures d'ensoleillement de la journée. Le positionnement et l'emplacement du générateur PV sont deux paramètres essentiels qui déterminent l'efficacité du système PV. Dans l'utilisation photovoltaïque, il est possible que des obstacles empêchent le bon captage du panneau, des éléments comme les bâtiments et les arbres ainsi que les nuages peuvent créer de l'ombre et affecter le rendement du générateur photovoltaïque.

L'ombrage sur les cellules qui constitue le système PV a pour effet la diminution du courant et de la tension, celui-ci donc entraîne une fluctuation de production d'énergie électrique. De même pour l'inclinaison du générateur PV ; une bonne inclinaison nous permet de maximiser le rendement de l'installation photovoltaïque.

Durant ce chapitre, on exposera les effets des deux principales perturbations des systèmes PV, ombrage (les deux types) ainsi que l'inclinaison. Une étude pratique sera faite dans le but d'obtenir des informations concrètes sur le degré de l'impact de ces deux perturbations sur la puissance PV délivrée par le générateur PV à partir de différents degrés d'inclinaisons et de pourcentage d'ombrage différents.

II. Dégradation des performances des systèmes photovoltaïques

Il existe plusieurs problématiques rencontrées lors de l'installation des systèmes photovoltaïques, une baisse importante ou totale de production peut diriger vers un dysfonctionnement de l'installation, parmi ces problèmes en propose quelques-uns les plus récurrents :

II.1. Problèmes liés aux convertisseurs (onduleurs, hacheurs, MPPT, ...)

Un mauvais fonctionnement de cette partie entraîne une surtension ou un arrêt de fonctionnement lié à un problème interne ou un choc qui va l'endommager. L'onduleur, le hacheur n'est pas toujours le centre des problèmes, tous les éléments de l'installation sont reliés les uns aux autres. La panne peut très bien venir d'un seul panneau photovoltaïque endommagé. Si c'est le cas, il n'est plus en capacité de produire de l'électricité. Sa défaillance impacte directement le fonctionnement de toute l'installation photovoltaïque, dont ces étages d'adaptation.

II.2. Problèmes liés aux panneaux solaires

Nous présentons quelques un ci-dessous

⇒ **L'enseillement** : un faible ensoleillement engendre une diminution de production électrique, vu que le rayonnement solaire est la base de la production photovoltaïque (Le mauvais temps ou la saison hivernale).

⇒ **La température** : les cellules photovoltaïques ont une température spécifique maximale, une forte température peut donc endommager des cellules ou des panneaux entièrement.

⇒ **L'inclinaison** : il faut avoir la bonne inclinaison pour pouvoir installer les modules photovoltaïques et booster le captage de rayonnement solaire.

⇒ **Le mismatch** : celui-ci est un dysfonctionnement lié aux panneaux solaires ombrés.

Dans ce manuscrit nous traiterons deux problématiques majeures lors de l'installation photovoltaïque qui sont l'inclinaison et l'ombrage avec ces différents types

III. Inclinaison du générateur photovoltaïque

L'inclinaison est l'état d'un objet par rapport un autre ou encore l'angle que fait un plan par rapport à un autre plan, cette dernière est mesurée avec le degré. Avant toute installation on doit choisir le bon angle d'inclinaisons afin de produire une bonne quantité d'énergie.

Pour avoir un bon rendement de l'installation PV, il faut prendre compte aussi que celle-ci est dans l'hémisphère nord, il faudra donc orienter les PV en direction du sud (le contraire est aussi logique).

Pour une production maximale d'électricité photovoltaïque, au moment du contacte des rayons du soleil ils doivent être perpendiculaire avec la surface du panneau.

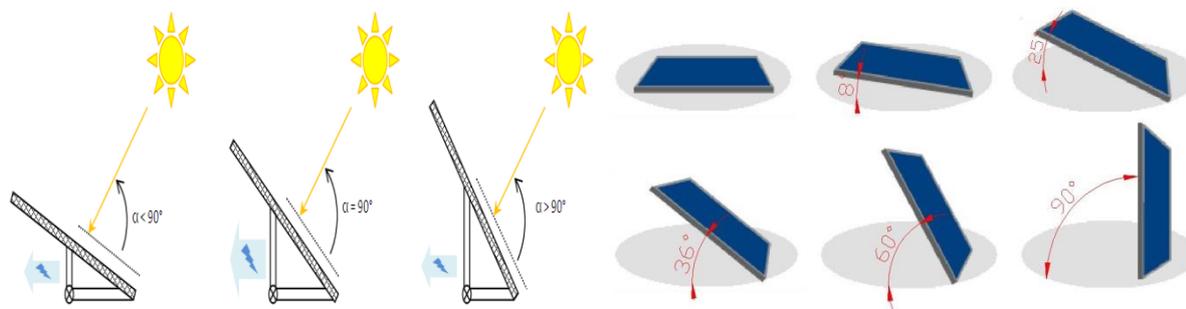


Figure III.1 : Exemple d'inclinaison du panneau photovoltaïque

IV. Ombrage sur le générateur photovoltaïque

C'est le reflet des objets qui font obstacle à la passation du rayonnement solaire sur une surface quelconque, dans notre cas on choisit les modules photovoltaïques. Les systèmes solaires photovoltaïques comprennent un certain nombre de panneaux solaires câblés en réseaux en fonction de la demande d'énergie électrique, qui à leur tour, sont composés de nombreuses cellules photovoltaïques solaires qui sont les unités essentielles impliquées dans la capture de l'énergie du soleil et sa conversion en électricité. Maintenant, si une ombre ne tombe même que sur une partie du panneau solaire de votre générateur, la production de sortie du système complet peut être potentiellement compromise, cela peut être appelé ombrage des panneaux PV, il faut donc étudier l'emplacement avant d'installer les générateurs photovoltaïques.

On distingue deux grands types d'ombrage :

IV.1. Ombrage Total

Appelé aussi ombrage complet, ce dernier empêche tout captage de rayonnement solaire par les générateurs photovoltaïques c'est-à-dire empêche tout rayonnement qu'il soit direct, réfléchit ou diffus d'atteindre la surface du générateur PV.

IV.2. Ombrage Partiel

Ce type d'ombrage laisse passer une partie du rayonnement solaire afin qu'elle soit reçue par les capteurs et convertie en énergie électrique.

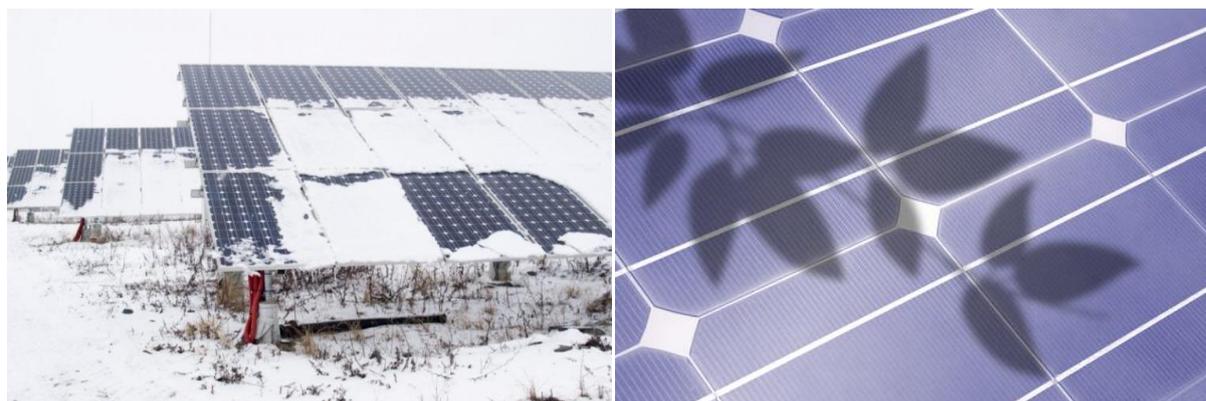


Figure III.2 : Exemple d'ombrage total et partiel

V. Mismatch photovoltaïque

Un mismatch des panneaux se manifeste lorsque ces derniers possèdent différents points de puissance maximale (MPP) dans une chaîne. Il présente un pourcentage plus grand dans

les contraintes rencontrées lors de l'installation des générateurs photovoltaïques. Il existe deux types de mismatch, un qui est structurel, l'autre fonctionnel.

V.1. Mismatch structurel

C'est l'ensemble des éventuels défauts de fabrication des cellules constituant le module photovoltaïque (caractéristiques qui les distinguent l'une à l'autre), ou une différence de puissance entre les panneaux photovoltaïques lors de l'installation.

V.2. Mismatch fonctionnel

Il est dû à des conditions différentes de fonctionnement des cellules solaires. En globalité se sont les différents obstacles rencontrés lors de la production, ceux qui ont un reflet et empêchent les rayonnements solaires d'atteindre toute la surface du panneau photovoltaïque ainsi le mauvais fonctionnement des capteurs. On donne comme exemple : L'encrassement du panneau dû aux salissures, à la neige, aux déjections d'oiseaux et l'ombrage créé par les arbres etc...

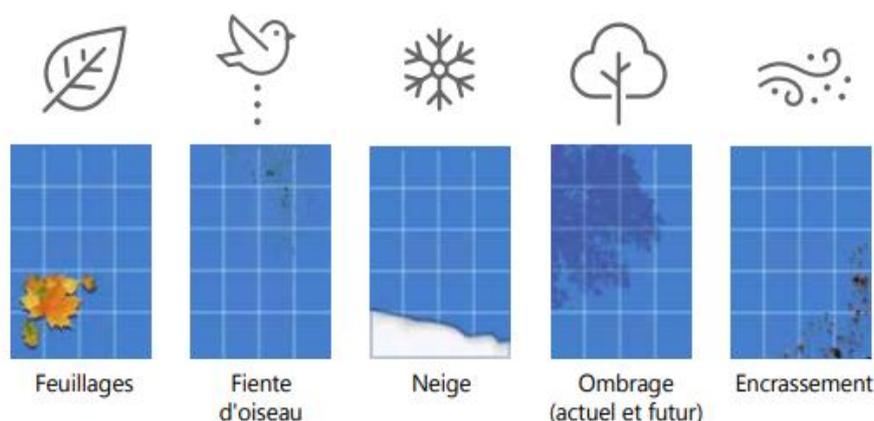


Figure III.3 : Exemple des causes de mismatch fonctionnel

VI. Impact d'une perturbation (inclinaison) sur la puissance PV produite

Afin de maximiser la production d'électricité d'une installation photovoltaïque, il convient d'incliner les modules de façon optimale afin de capter un maximum du rayonnement solaire. L'objectif de cette portion de l'expérimentale consiste à évaluer l'intérêt énergétique (la perte, le gain) l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques orientés plein sud.

Dans cette optique nous avons envisagé quatre angles significatifs « a) 0° « horizontale », b) 30°, c) 45° et d) 60°) fixés manuellement grâce au dispositif de poursuite de point de puissance maximale (Tracker). Les figures suivantes montrent les caractéristiques électriques obtenues pendant des essais pratiques effectués pour les mêmes conditions climatiques (685 W/m², 19°C).



Figure III.4 : Exemple du banc expérimental à l'essai (a) et (c)

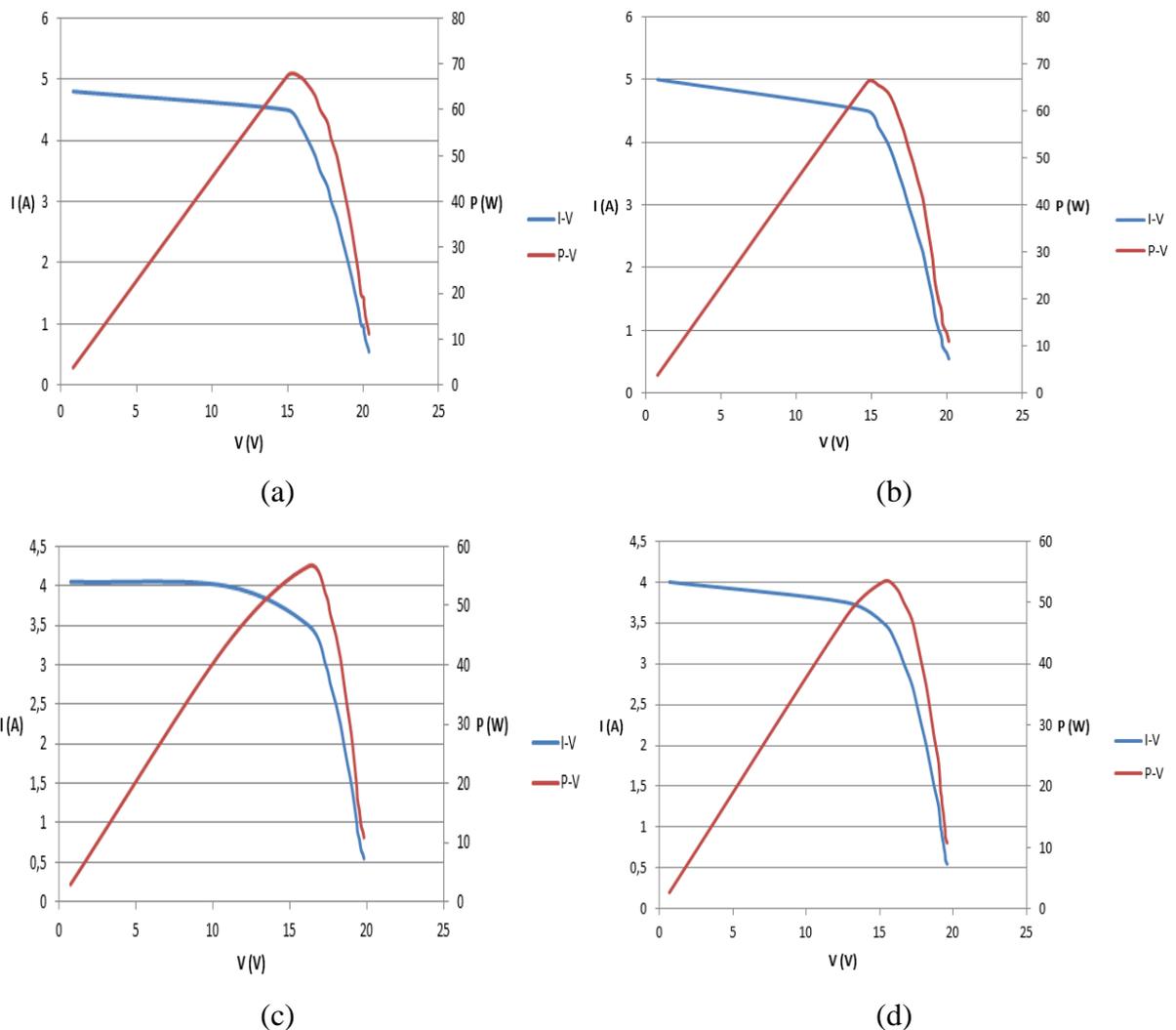


Figure III.5 : Influence de l'angle d'inclinaison sur les caractéristiques électriques du générateur à l'état sain a) $\vartheta = 0^\circ$, b) $\vartheta = 30^\circ$, c) $\vartheta = 45^\circ$, d) $\vartheta = 60^\circ$

VII. Impact de deux perturbations (ombrage et inclinaison) sur la puissance PV produite

Les propriétaires de panneaux PV se trouvent souvent confrontés à une triste réalité une fois installée, c'est l'ombre inévitable. Ce phénomène a des conséquences importantes sur le fonctionnement des panneaux solaires et sur la production d'électricité.

Quelle que soit l'origine de l'ombre portée, le résultat est le même : il y a moins de rayonnement solaire direct ou indirect sur les panneaux, ce qui perturbe le bon fonctionnement de l'installation.

Dans cette partie nous allons associer cette perturbation à la précédente, soit maintenant deux perturbations à la fois avec des portions et nature d'ombrage différentes c'est-à-dire :

- Ombrage total 'Obstacle opaque' « 0% de la surface (0), 50% de la surface (1) et 100% de la surface (2) »
- Ombrage partiel 'Obstacle transparent' « 0% de la surface (00), 50% de la surface (11) et 100% de la surface (22) »

On aura les combinaisons d'essais suivantes :

- ⇒ a_0, a_1 et a_2 Le panneau à la position horizontale et différents taux d'ombrage « obstacle opaque »
- ⇒ a_{00}, a_{11} et a_{22} Le panneau à la position horizontale et différents taux d'ombrage « obstacle transparent »
- ⇒ b_0, b_1 et b_2 Le panneau à l'inclinaison de 30° et différents taux d'ombrage « obstacle opaque »
- ⇒ b_{00}, b_{11} et b_{22} Le panneau à l'inclinaison de 30° et différents taux d'ombrage « obstacle transparent »
- ⇒ c_0, c_1 et c_2 Le panneau à l'inclinaison de 45° et différents taux d'ombrage « obstacle opaque »
- ⇒ c_{00}, c_{11} et c_{22} Le panneau à l'inclinaison de 45° et différents taux d'ombrage « obstacle transparent »
- ⇒ d_0, d_1 et d_2 Le panneau à l'inclinaison de 60° et différents taux d'ombrage « obstacle opaque »
- ⇒ d_{00}, d_{11} et d_{22} Le panneau à l'inclinaison de 60° et différents taux d'ombrage « obstacle transparent »

Les essais ont été effectués pour les mêmes conditions climatiques que les essais précédents

❖ Ombrage partiel (obstacle transparent)



Figure III.6 : Exemple du banc expérimental à l'essai (c₁₁), (b₂₂)

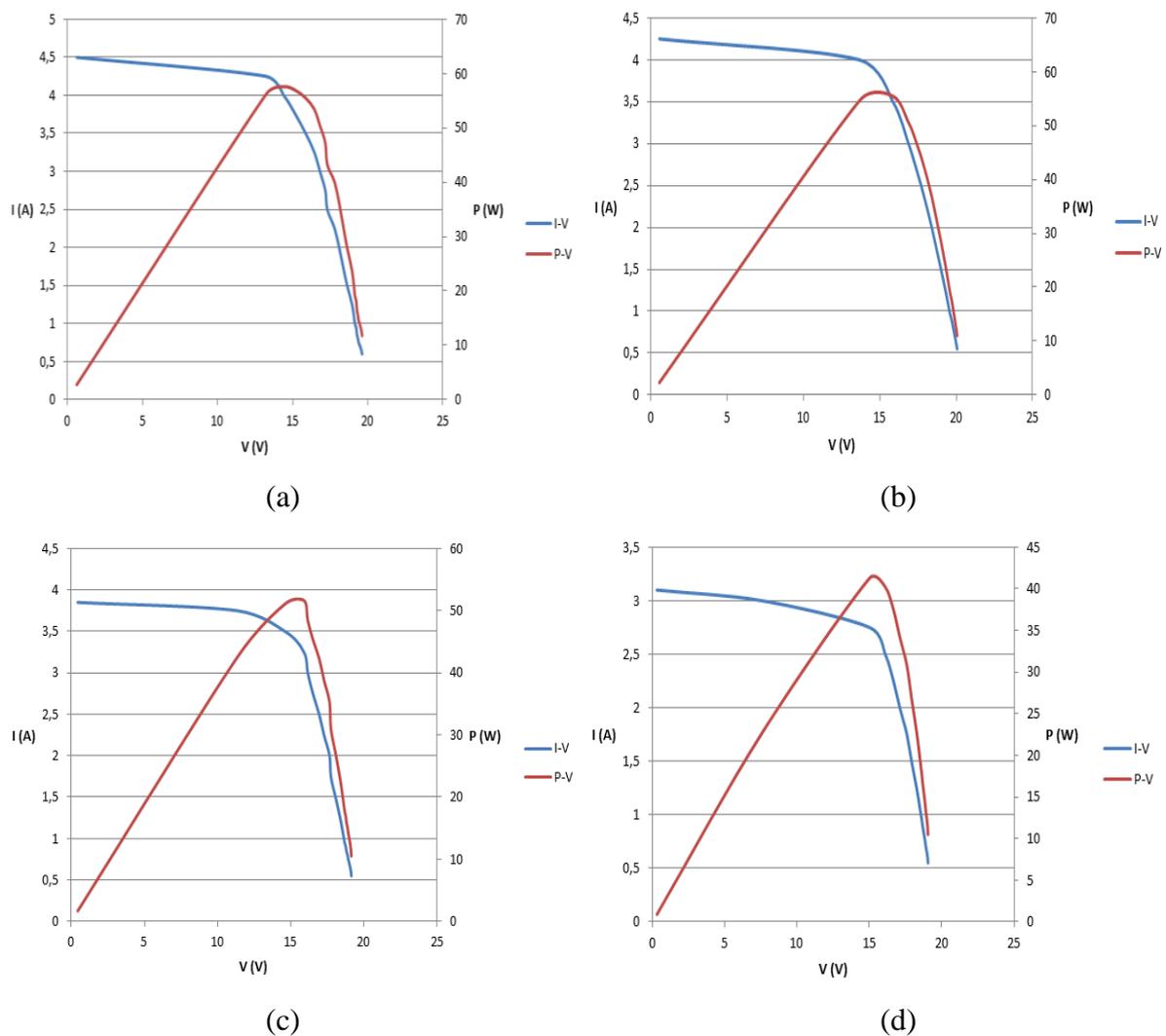


Figure III.7 : Influence de l'angle d'inclinaison et d'ombrage transparent à 50% sur les caractéristiques électriques du générateur PV a) $\vartheta = 0^\circ$, b) $\vartheta = 30^\circ$, c) $\vartheta = 45^\circ$, d) $\vartheta = 60^\circ$

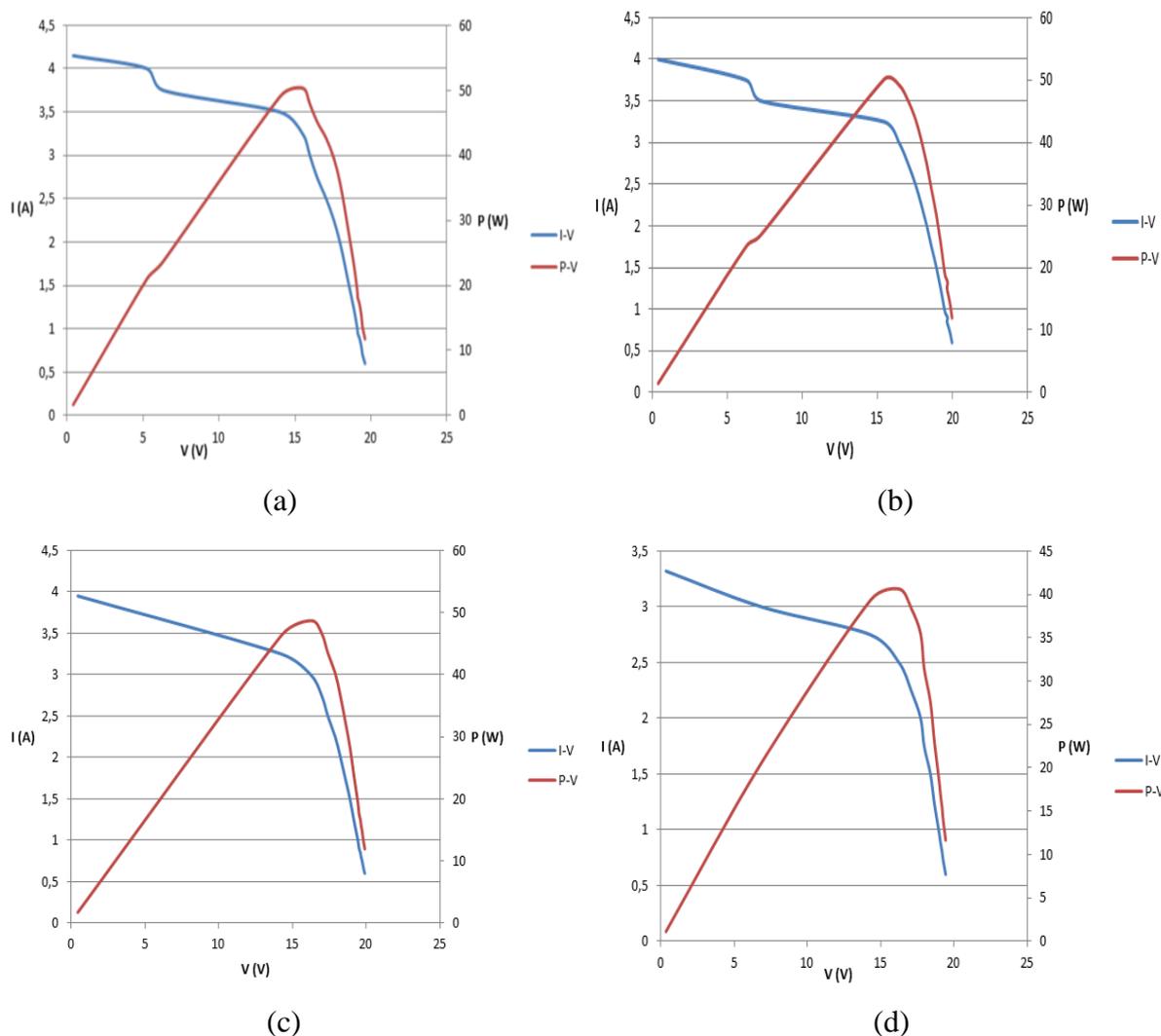


Figure III.8 : Influence de l'angle d'inclinaison et d'ombrage transparent à 100% sur les caractéristiques électriques du générateur PV a) $\vartheta = 0^\circ$, b) $\vartheta = 30^\circ$, c) $\vartheta = 45^\circ$, d) $\vartheta = 60^\circ$

❖ **Ombrage total (obstacle opaque)**

Degré d'inclinaison	Taux d'ombrage	Puissance (W)
0°	100% Opaque	1,214
30°	100% Opaque	0,110
45°	100% Opaque	0,095
60°	100% Opaque	0,050

Tableau III.1. Résultats d'influence de l'angle d'inclinaison et d'ombrage opaque à 100% sur les puissances du générateur PV



Figure III.9 : Exemple du banc expérimental (c_0) et (c_2)

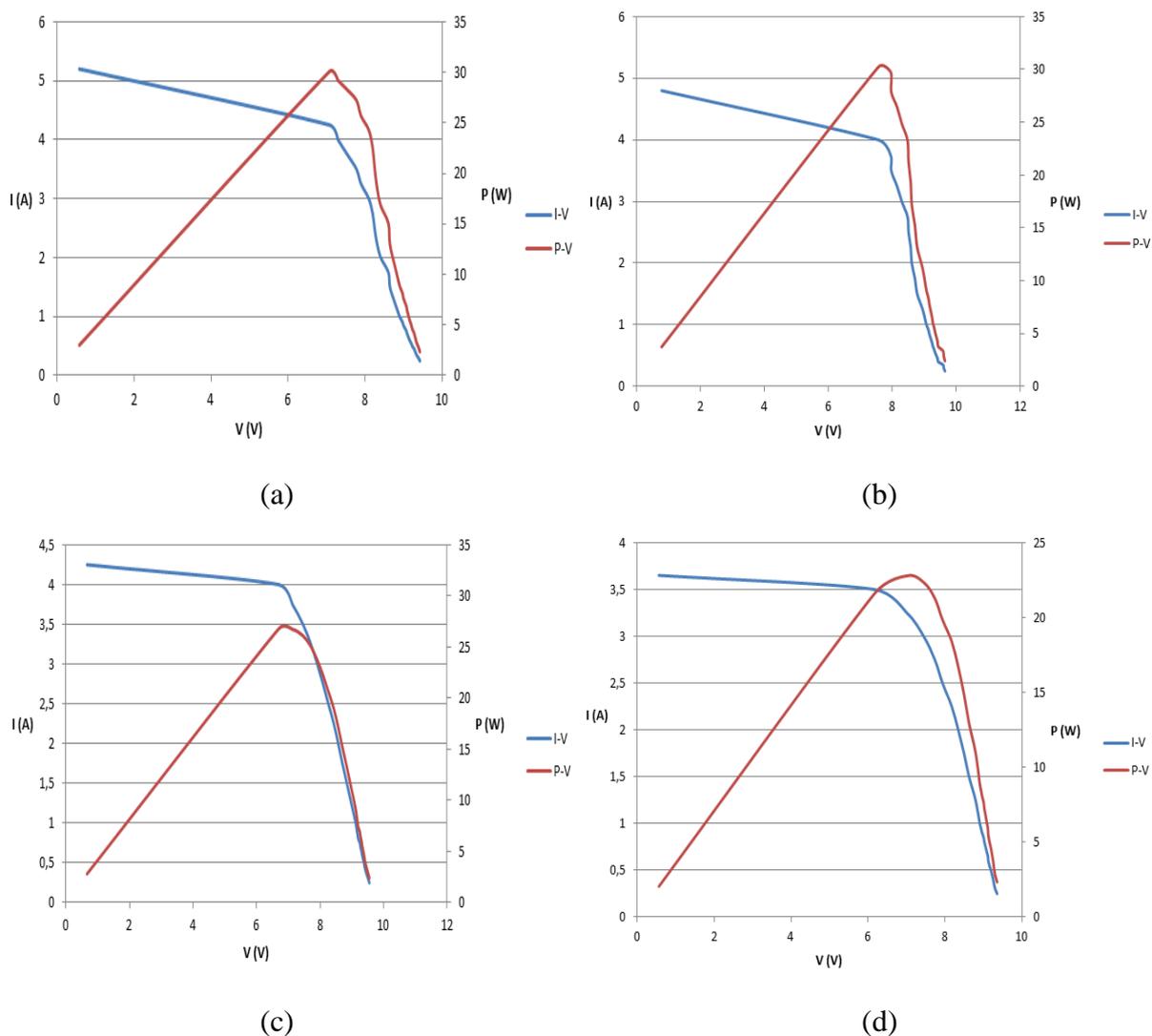


Figure III.10 : Influence de l'angle d'inclinaison et d'ombrage opaque à 50% sur les caractéristiques électriques du générateur PV a) $\vartheta = 0^\circ$, b) $\vartheta = 30^\circ$, c) $\vartheta = 45^\circ$, d) $\vartheta = 60^\circ$

❖ *Evaluation des résultats*

Dans cette partie nous allons essayer de comparer les différentes puissances PV produites par le générateur étudié et évaluer l'ampleur de la dégradation des performances induite par les différentes perturbations (Défaut d'inclinaison et ombrage) sur le fonctionnement de notre générateurs PV.

Les figures ci-dessous montrent l'évolution des puissances de sorties en fonction des états du générateur :

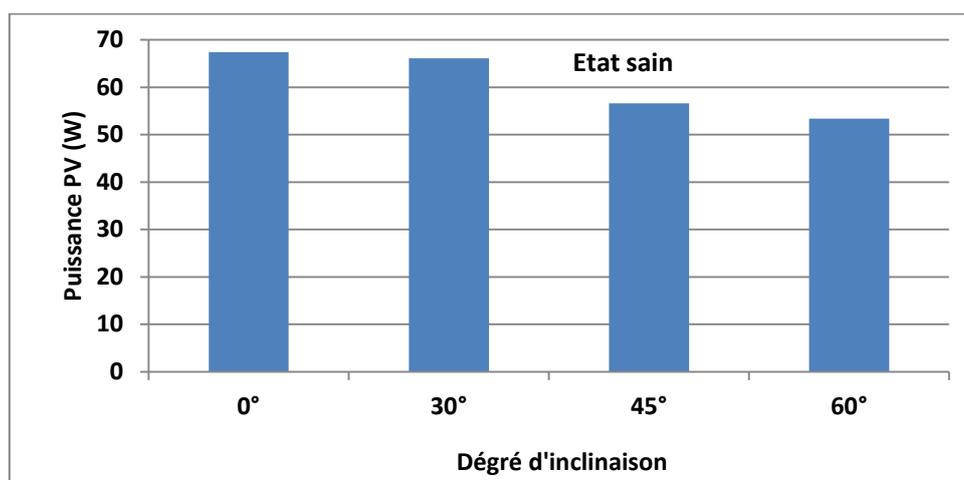


Figure III.11: Puissance générée par le générateur PV à l'état sain pour différentes inclinaisons

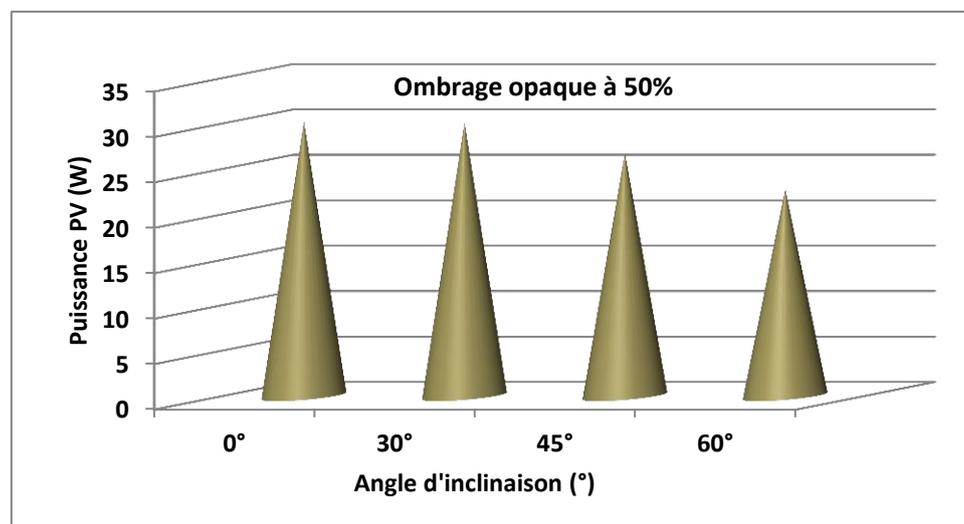


Figure III.12: Puissance générée par le générateur PV à l'état ombrage total à 50% pour différentes inclinaisons

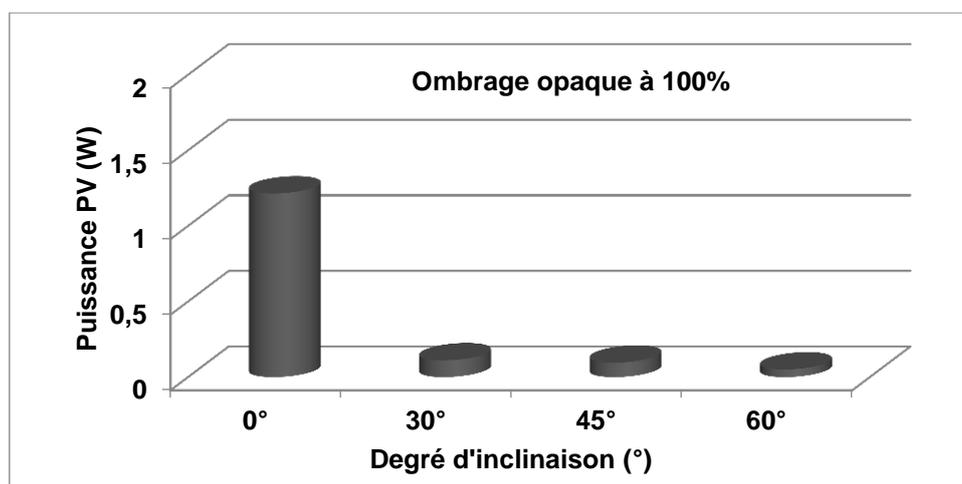


Figure III.13: Puissance générée par le générateur PV à l'état ombrage total à 100% pour différentes inclinaisons

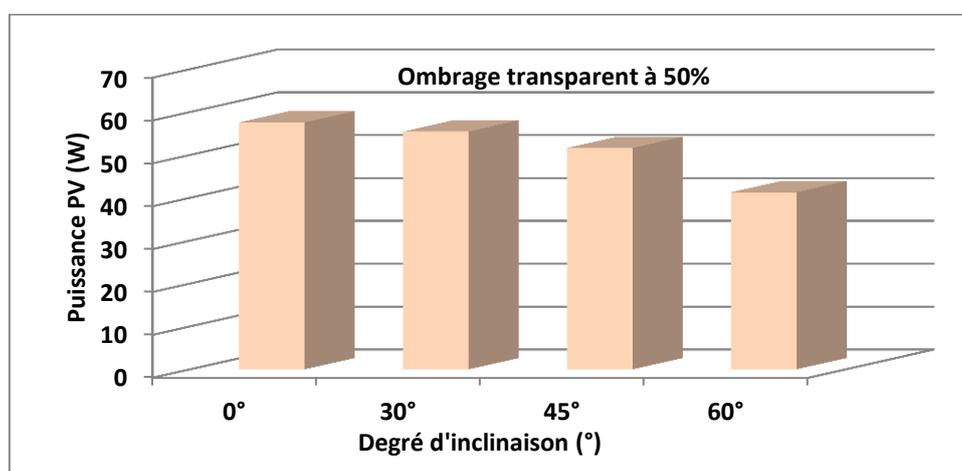


Figure III.14: Puissance générée par le générateur PV à l'état ombrage partiel à 50% pour différentes inclinaisons

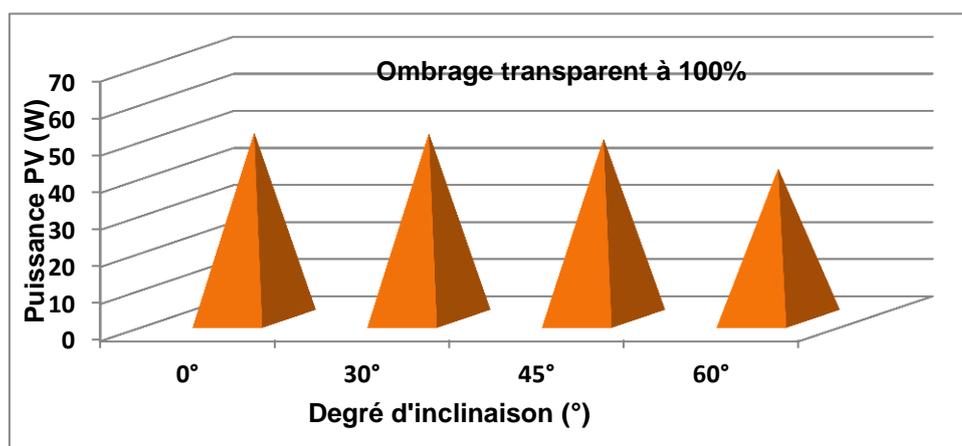


Figure III.15: Puissance générée par le générateur PV à l'état ombrage partiel à 100% pour différentes inclinaisons

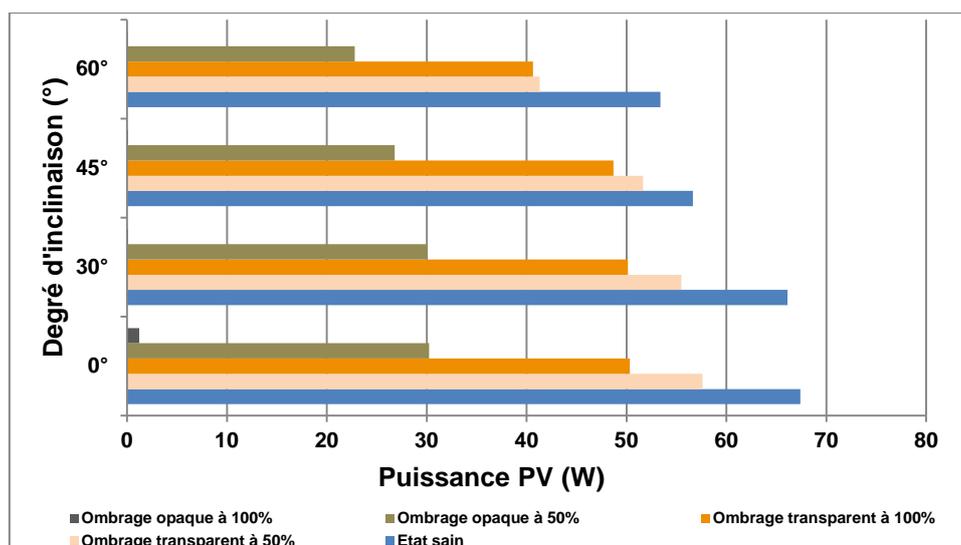


Figure III.16: Comparaison des puissances PV dans le cas des deux perturbations

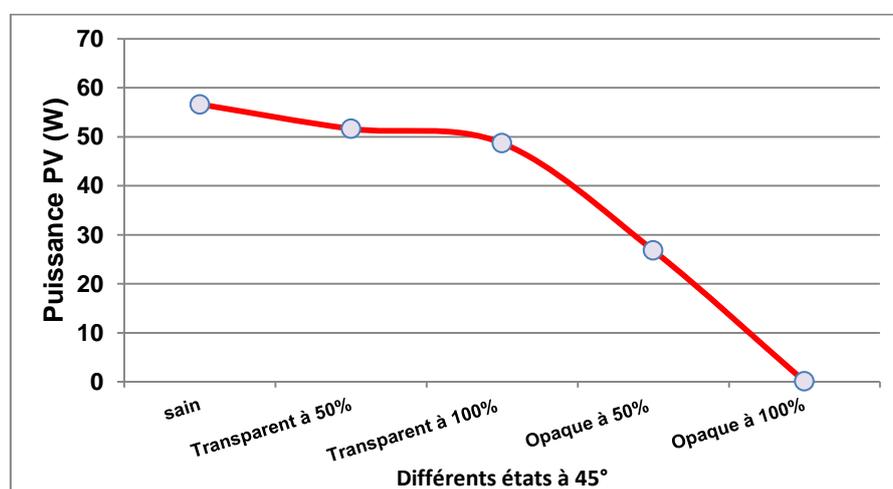


Figure III.17: Comparaison des puissances PV dans le cas D'une inclinaison fixe à 45° et différents états du générateur PV

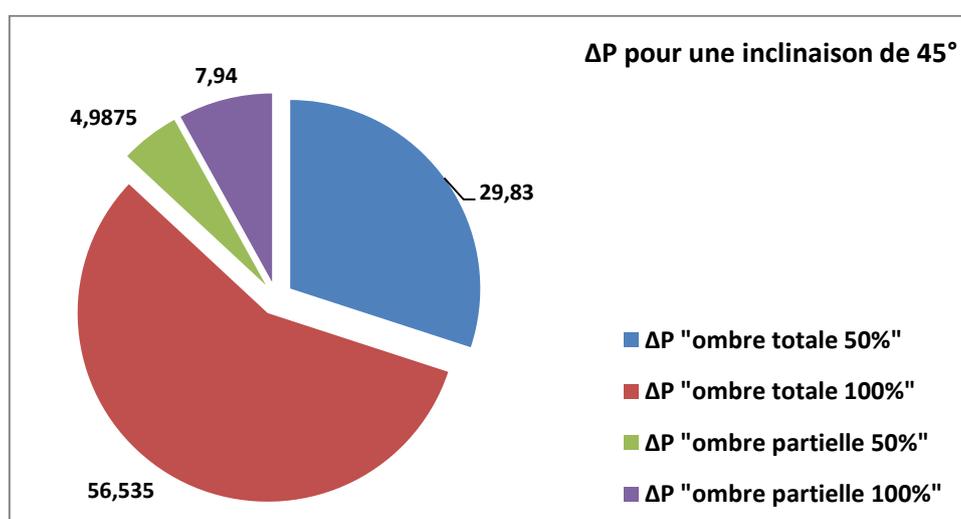


Figure III.18: Pertes de puissance pour différents états du générateur et une inclinaison de 45°

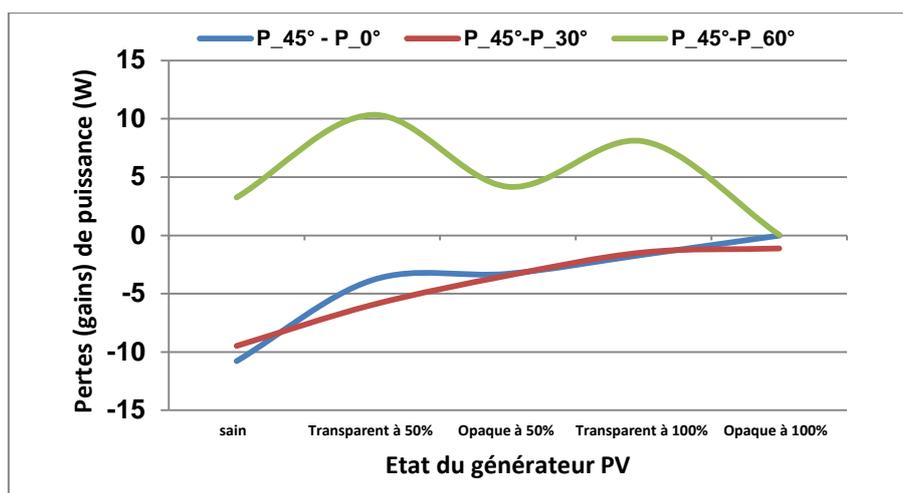


Figure III.19: Gains (pertes) en puissances entre l'inclinaison de 45° et les autres inclinaisons pour différents états du générateur PV

L'angle d'inclinaison joue un rôle majeur dans les performances d'un générateur PV. On notera que le module produit d'autant plus que son inclinaison est proche de 0° cela est expliqué du moment que les essais ont été effectués presque en été, lorsque le soleil est haut par rapport à l'horizon. La production se détériore en augmentant l'angle d'inclinaison pour perdre près de 14 (W) à 60° en état sain du générateur. Ce raisonnement se poursuit même en présence d'une autre perturbation qui est l'ombrage.

Vu que notre générateur sera fixé à 45° d'inclinaison, la figure 18 représente les gains (pertes) en puissances entre l'inclinaison de 45° et les autres inclinaisons pour différents états du générateur PV ; cette figure démontre que pour les deux angles (0°, 30°) le delta est négatif se qui signifie que la production pendant cette période de tests est favorisée par ces angles, contrairement à 60° où la différence est positive synonyme de perte de production.

Les cellules (panneaux) solaires sont connectées en combinaison série-parallèle en fonction de la plage de tension. Si l'ombre d'un film en nylon tombe même sur une cellule (panneau) de la chaîne, la sortie de l'ensemble de la chaîne sera presque nulle pendant la période d'ombre (cas de l'ombrage opaque à 100%). S'il y a une chaîne séparée et non ombrée, elle tournera toujours la puissance de sortie comme d'habitude (cas de l'ombrage à 50% dans notre cas ou la deuxième série continue à produire). L'impact de l'ombre sur l'ensemble du système dépend de la nature de l'obstacle (figure 16) ou la quasi-totalité de la production est perdue avec une ombre totale et opaque ; et la portion de l'ombre (figure 17) ou les pertes diminues avec la diminution de la part de l'ombre sur la surface du générateur PV.

VIII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié un générateur PV fonctionnant sous conditions perturbées, l'une est l'inclinaison et la deuxième c'est l'ombrage. Concernant l'inclinaison des modules par rapport à l'horizontale, l'approche se fonde sur la hauteur du soleil dans le ciel. Comme on peut le constater sur les résultats, la position du soleil dans le ciel est plus haute en été ce qui donne raison à la position horizontale du générateur puisque le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement sur le module photovoltaïque. Cet angle a une grande importance.

La moindre occultation affecte le rendement des générateurs PV, souvent, les cellules d'un module photovoltaïque sont connectées en série. Ainsi, la cellule la plus faible va déterminer et limiter la puissance des autres cellules. L'ombrage de la moitié d'une cellule ou de la moitié d'une rangée de cellule diminuera la puissance proportionnellement au pourcentage de la surface ombrée d'une cellule. L'ombrage total d'une rangée de cellules peut réduire à zéro la puissance du module.

Or, pour produire un maximum d'électricité, un module photovoltaïque doit être incliné de façon perpendiculaire aux rayons du soleil et choisir un endroit approprié pour l'installation d'un système photovoltaïque où il y a, le moins d'ombrage possible.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie électrique est la base de toute activité, il existe plusieurs manières et de processus de production, on les départage en deux une qui est agressive vue ces impacts et son émission de gaz à effet de serre, une plus protectrice envers la nature et la vie ; parmi cette dernière on trouve l'énergie solaire photovoltaïque.

Ce mémoire a porté sur l'étude, la modélisation, la simulation et l'expérimentation d'un générateur photovoltaïque en fonctionnement perturbé. Cette énergie se présente comme une solution idéale pour l'alimentation en électricité pour les régions peu peuplées, isolées et enclavées ou encore pour des applications agricoles.

Au premier chapitre un aperçu général sur les énergies renouvelables a été donné avec un accent particulier sur la technologie photovoltaïque. Pour exploiter l'énergie solaire on doit prendre compte de plusieurs paramètres. En effet, les caractéristiques électriques de la génération photovoltaïque sont par excellence, fonction de la température et de l'éclairement, par conséquent le chapitre vise à identifier des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque par deux méthodes ; ainsi les résultats ont montré à un certain degré, une cohérence entre l'expérimental et le théorique.

La production électrique depuis l'énergie solaire rencontre plusieurs éléments perturbateurs, où une étude pour l'emplacement de l'installation photovoltaïque doit être faite avec précaution vu que la quantité d'énergie et l'angle de captage sont différents d'une place à une autre. Parmi les perturbations les plus rencontrées dans ce domaine, on trouve l'ombrage et l'inclinaison qui sont les facteurs les plus distingués. Ceux-là agissent négativement sur le générateur photovoltaïque. Nous avons structuré un dernier chapitre qui porte sur ces perturbations subites par une installation photovoltaïque. Un banc expérimental a été réalisé dans le but de faire valoir et indiquer leurs impacts sur les caractéristiques et la dégradation des performances des systèmes photovoltaïques.

Il est bien clair d'après notre étude que l'inclinaison optimale du générateur PV pour cette saison de test (été) est 0° (horizontal) et les meilleures performances peuvent être obtenues dans l'intervalle $[0^\circ, 30^\circ]$. L'ombrage reste le pire ennemi du photovoltaïque. L'effet de l'ombrage sur les cellules photovoltaïques est comparable à l'effet provoqué par la torsion d'une partie d'un tuyau d'arrosage : c'est le point faible qui détermine l'intensité

générée. Une cellule ombrée va donc limiter la puissance générée notamment lorsque l'obstacle soit opaque ou la production tend à s'annuler contrairement lorsque l'obstacle soit transparent même à 100% d'ombrage le générateur continu à produire. Il est donc impératif de choisir un endroit qui soit le moins possible soumis aux ombres provoquées par l'environnement.

Comme perspectives, il est vivement recommandé d'automatiser l'inclinaison du générateur afin de l'adapter selon la saison et l'endroit de l'installation et appliquer différentes techniques de reconfiguration du générateur pour pallier le problème d'ombrage.

Bibliographie

- [1] : [**M.JAOUEN** «Les énergies renouvelables Etat des lieux et perspectives en Italie». Chargée de Mission Cathy RACAULT, Attachée Scientifique ; Juin 2005]
- [2] : [**S.Madougou**, Etude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent, thèse de doctorate, France, 2010].
- [3] : [**M.Mekki** , Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable, thèse de doctorat, Algérie, 2014].
- [4] : [**P.Laplaige.ADEME** Fiche technique PRISME, Géothermie ,2016].
- [5] : [**Gasmi, Assia, Hebbir, Nacer, Et Al.** L'Etude Expérimentale De L'influence De L'inclinaison Et De Vent Sur Le Rendement D'une Cellule Pv. Université L'Arbi Ben M'hidi -Oum El Bouaghi, soutenu le 11.Juin.2019].
- [6] : [**Z.KHADRAOUI**, mémoire de master « etude d'une centrale solaire thermique » universite badji mokhtar-annaba 2017].
- [7] : [<https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/chauffe-eau-solaire/panneau-solaire-thermique>]. Consulté le 28 Mars 2023.
- [8] : [**P. Cumunel, Braun.J-P, A.Labouret**, 'cellules solaires', édition dunod Paris 2001].
- [9] : [**K.Bouziane** « Thèse magister étude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau ». Université Ouargla-2011].
- [10] : [**M.N.Mchalikh** et **CH.Hmada** ''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau '' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013].
- [11] : [**Bendjamaa** ''Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque '' Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012].
- [12] : [**C. Tranain**, « Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques », Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur D.U.T. Mesures Physiques Mai 2006/Juillet 2006, Université Paris VII].
- [13] : [<https://www.hallou-solaire.com>.] Consulté le 02 Avril 2023.
- [14] : [**H. Chenoufi**, "Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion", mémoire de magister, université de Batna, 2005].
- [15] : [**Y. Pankow**, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque", thèse de doctorat, centre nationale de recherche technologique de Lille, 2004].

- [16] : [**A. Mehdaoui et al**, "Développement de deux modèles neuro-flous pour la poursuite du MPPT des modules photovoltaïques UDTS-50 Application au site d'Adrar", Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2, pp 257 – 268 (2009)].
- [17] : [**K.HELALI** , “ Modélisation d’une cellule photovoltaïque étude comparativ” mémoire de magistère en électrotechnique à l’université de tizi ouzou 2012. v **O gergaud B. Multon, H. Ben Ahmed** “analysis and experemental validation of various photovoltaic system” 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, august 2002].
- [18] : [v **J.A GOW** and **C.D. Manning** “ devlopment of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies” IEF proceedings on Electric power applications, Vol.146, N°2, pp. 197-200, 1999].
- [19] : [**S.AISSOU, M.ZINET** : “ Identification et caractérisation D’un Système Photovoltaïque ” Mémoire de master en énergies renouvelables, université de Bejaia 2012].
- [20] : [**Z.Bendjellouli** , “ Contribution a la modélisation d’une cellule solaire” Mémoire magister, Université de Bechar, 2009].