

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et de la Technologies
Département d'Automatique et Electromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Energies Renouvelables

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Par : BOUREGA Med Lamine et MEFROUM Mohamed

Thème

Etude expérimentale sur l'influence de la salissure sur les modules PV

Soutenu publiquement le : 09/2021

Devant le jury :

MEDOUKALI Hemza

M.C.B

Université

Président

SEBA Hadj Yahia

M.C.A

Université

Examineur

FEZZANI Amor

Maître de Recherche A

URAER. Ghardaïa

Encadreur

Année universitaire 2020/2021

REMERCIEMENTS

Avant tous, je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donnée le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées

Mes sincères remerciements vont en premier lieu, à mes encadrant :

M. FEZZANI Amor, pour leurs encadrements tout le long de ce projet et pour leurs aides, orientations et conseils très efficaces pour l'élaboration de ce travail de recherche.

Nous remercierons également le Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER, Ghardaïa) ; qui nous a permis de réaliser ce travail au sein de l'URAER ainsi que pour son bon accueil.

Mes gratitudes sont aussi destinées à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, je tiens de remercier le personnel pédagogique du département des Sciences et de la Technologie de l'université de Ghardaïa, pour leur aide précieuse et leur large disponibilité.

À tout je suis très reconnaissant.

Dédicace.

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A mes chers parents : ma Mère et mon Père ;

A mes frère, ma petite soeur

Sans oublier mon binôme MEFROUM MOHAMED pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

Merci !

BOUREGA MOHAMMED LAMINE

Dédicace

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser
Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les
Protège pour leurs soutien moral et financier, pour
Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

*À chers frères et sœurs, à tous ceux de Erabi3e association ma deuxième
famille.*

*Aux camarades du premier pas et de l'avant-dernier pas, qui a fait pleuvoir dans
les années maigres je suis reconnaissant.*

*Sans oublier mon binôme BOUREGA MED LAMINE pour son soutien moral, sa
patience et sa compréhension tout au long de ce projet*

Merci !

MEFROUM MOHAMED

ملخص

تعتبر الطاقة من أهم العناصر الأساسية والضرورية للحياة، نظرا للتزايد المستمر في الطلب على الطاقة، أصبح من الضروري البحث عن مصادر بديلة لإنتاج الطاقة وذلك عن طريق استغلال الطاقات المتجددة، ومن أهم المصادر استعمالا الطاقة الشمسية لما لها من مميزات كثيرة.

في هذه المذكرة قمنا بدراسة ومقارنة التصميم ومحاكاة الاشتغال للنظام الكهروضوئي بواسطة MATLAB/SIMULINK. والهدف من هذه المذكرة هو رؤية تأثير الأوساخ والغبار على أداء وخصائص اللوح الكهروضوئي في إنتاج الطاقة الكهربائية، وظهرت النتائج ان ترسب الاوساخ يقلل من أداء الالواح الكهروضوئية. وهذا يؤثر على الطاقة المنتجة بشكل مختلف.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي، الأوساخ، الغبار، المحاكاة، التصميم.

Résumé

L'énergie des éléments plus fondamentaux et nécessaires à la vie, en raison de la hausse continue de la demande d'énergie est devenue nécessaire de trouver d'autres sources de production d'énergie grâce à l'utilisation des énergies renouvelables et des sources plus importantes de l'utilisation de l'énergie solaire en raison de leurs nombreux avantages.

Dans cette mémoire, nous étudions et comparons la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque par MATLAB/SIMULINK. L'objectif de cette mémoire est de voir l'effet de la salissure et la poussière sur les performances et les caractéristiques du panneau photovoltaïque sur la production d'énergie électrique. Les résultats ont montré que le dépôt de saleté dégrade les performances des panneaux photovoltaïques. Cela affecte l'énergie produite différemment.

Mots clés : système photovoltaïque, la salissure, la poussière, simulation, modélisation.

Abstract

Energy is considered as the more fundamental and necessary of the conditions of life, the increase of demand of energy led to find other sources of production energy thanks to the use of renewable energies and the more significant sources of the use of solar energy that are having many advantages.

In this memory, we study and compare modeling and operation simulations of the photovoltaic system by MATLAB/SIMULINK. The aim of this memory is to see the effect of dirt and dust on the performance and characteristics of the photovoltaic panel on the production of electrical energy. The results showed that the deposition of dirt degrades the performance of the photovoltaic panels. This affects the energy produced differently.

Key words: photovoltaic system, dirt, dust, modeling, simulation.

Table des matières

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste es tableaux

Liste des abréviations

Liste des symboles

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction..... | 4 |
| I.2. Définition de l'énergie renouvelable..... | 4 |
| I.2.1. L'énergie solaire | 5 |
| I.3. Gisement solaire en Algérie..... | 6 |
| I.3.1. Rayonnement solaire | 7 |
| I.3.2. Différents types de rayonnement | 7 |
| I.3.3. Coordonnées géographiques | 8 |
| I.3.4. Paramètres de position | 9 |
| I.4 L'effet photovoltaïque | 11 |
| I.5. La jonction PN | 12 |
| I.5.1. Dopage | 12 |
| I.5.2. Jonctions p-n organiques | 13 |
| I.6. La cellule PV | 14 |
| I.6.1. Définition | 14 |
| I.6.2. Composition de la cellule solaire | 14 |
| I.6.3. Les différents types de cellules photovoltaïques | 15 |
| I.6.4. L'évolution des rendements des cellules photovoltaïques | 18 |
| I.6.5. Les avantages et les inconvénients de chaque cellule | 20 |
| I.7. Module photovoltaïque..... | 22 |
| I.7.1. Définition | 22 |
| I.7.2. Caractéristiques électriques d'un module | 22 |
| I.7.3. Assemblage des modules | 24 |
| I.8. Le système photovoltaïque | 25 |

| | |
|---|----|
| I.8.1. Définition | 25 |
| I.8.2. Les différents types de système photovoltaïques | 26 |
| I.9. Système de stockage..... | 28 |
| I.10. Système de régulation..... | 28 |
| I.11. Système de conversion | 29 |
| I.11.1. Convertisseurs DC/DC | 29 |
| I.11.2. Convertisseurs DC/AC (Onduleurs) | 29 |
| I.12. Système de protection..... | 31 |
| I.12.1. Diode by-pass | 31 |
| I.12.2. Diode anti-retour | 31 |
| I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire | 32 |
| I.13.1. Les avantages | 32 |
| I.13.2. Les inconvénients : | 32 |
| I.14. Conclusion | 33 |

Chapitre II : Modélisation et simulation des modules photovoltaïques

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction | 35 |
| II.2. Modélisation d'une cellule PV | 35 |
| II.2.1. Modèle idéale | 35 |
| II.2.2. Modèle à une diode | 36 |
| II.2.3. Modèle à deux diodes : | 39 |
| II.2.4. Modèle explicite | 40 |
| II.3. Simulation du module PV | 40 |
| II.3.1. Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque | 41 |
| II.3.2. Influence de l'éclairement et de la température | 42 |
| II.3.3. Influence de l'éclairement | 42 |
| II.3.4. Influence de la Température | 43 |
| II.3.5. Comparaison entre les simulations du deux modèles | 43 |
| II.4. Conclusion..... | 45 |

Chapitre III : L'effet de poussière sur les panneaux PV

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction | 47 |
| III.2. Propriétés de la poussière..... | 47 |

| | |
|---|-----------|
| III.2.1. Effets de la diffusion de la poussière dans l'atmosphère sur l'efficacité du module PV | 47 |
| III.2.2 Effets du dépôt de poussière sur la transmittance lumineuse de la surface du module | 48 |
| III.2.3. Effet poussière sur le module PV | 48 |
| III.2.4. Ombrage partiel du panneau avec dépôt de poussière | 48 |
| III.2.5. Augmentation de la température du module en raison du dépôt de poussière | 49 |
| III.2.6. L'impact de dépôt de poussière sur les modules photovoltaïques | 49 |
| III.3. Approche d'évaluation des performances du module PV..... | 49 |
| III.4. Partie expérimentale | 51 |
| III.4.1. Données géographiques | 51 |
| III.5. Conclusion..... | 57 |
| Conclusion générale | 58 |
| Bibliographie | 59 |

Liste des figures
Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : structure de soleil | 5 |
| Figure I.2 : Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu (moyenne annuelle) | 6 |
| Figure I.3 : les différentes longueurs d'ondes du rayonnement | 8 |
| Figure I.4 : les coordonnées terrestres..... | 9 |
| Figure I.5 : variation de la déclinaison solaire en fonction du jour..... | 9 |
| Figure I.6 : variation de la hauteur du soleil en fonction du jour..... | 10 |
| Figure I.7 : variation de la hauteur du soleil en fonction de l'azimut solaire..... | 10 |
| Figure I.8 : variation de l'azimut solaire en fonction du temps..... | 11 |
| Figure I.9 : collision entre un photon et un atome | 11 |
| Figure I.10 : Jonction p-n dans du silicium. Sur ce schéma, les régions p et n sont reliées à des contacts métalliques, ce qui suffit à transformer la jonction en diode | 12 |
| Figure I.11 : Le symbole d'une diode associé à la représentation d'une jonction p-n..... | 12 |
| Figure I.12 : Schéma d'une jonction p-n..... | 13 |
| Figure I.13 : Illustration de la zone de charge espace d'une jonction p-n | 13 |
| Figure I.14 : Les composants des cellules photovoltaïques..... | 15 |
| Figure I.15 : Cellule au silicium monocristallin | 16 |
| Figure I.16 : Cellule au silicium polycristallin | 16 |
| Figure I.17 : Cellule au silicium amorphe | 16 |
| Figure I.18 : Cellule PV tandem | 17 |
| Figure I.19 : Cellule PV CIGS..... | 17 |
| Figure I.20 : Cellule en couche mince..... | 18 |
| Figure I.21 : Cellule en multi-jonction..... | 18 |
| Figure I.22 : L'évolution des meilleurs rendements des cellules photovoltaïques en laboratoire | 19 |
| Figure I.23 : Structure d'un module photovoltaïque au silicium cristallin..... | 22 |
| Figure I.24 : Caractéristique I(V) dans différentes zones..... | 23 |
| Figure I.25 : Champs des modules montés en série parallèle..... | 25 |
| Figure I.26 : Système PV autonome ou isolé..... | 26 |

| | |
|--|----|
| Figure I.27 : Système PV raccordé au réseau avec batterie..... | 27 |
| Figure I.28 : Système PV raccordé au réseau sans batterie | 27 |
| Figure I.29 : Système PV hybride..... | 28 |
| Figure I.30 : Les batteries au plomb pour les systèmes PV..... | 28 |
| Figure I.31 : Régulateurs connectés avec les systèmes PV | 29 |
| Figure I.32 : Configurations des systèmes PV connectés au réseau a) Onduleurs centraux ; b) Onduleurs mono chaîne (string inverter); c) Onduleurs multi chaîne (Multi-string inverter); d) Onduleurs modulaires..... | 30 |
| Figure I.33 : Exemple d'association sécurisée de deux modules PV en parallèle avec leurs diodes de protection..... | 31 |

Chapitre II : Modélisation et simulation des modules photovoltaïques

| | |
|--|----|
| Figure II.1 : Circuit idéal d'une cellule photovoltaïque | 36 |
| Figure II.2 Schéma équivalent d'une cellule PV | 37 |
| Figure II.3 Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes | 39 |
| Figure II.4 : Schéma de simulation de module PV en Matlab /Simulink (modèle d'une diode) | 41 |
| Figure II.5 : Caractéristique I(V) d'une module PV | 42 |
| Figure II.6 : Caractéristique P(V) d'une module PV | 42 |
| Figure II.7 : La caractéristique $I=f(V)$ en fonction de l'éclairement..... | 42 |
| Figure II.8 : La caractéristique $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement..... | 42 |
| Figure II.9 : La caractéristique $I=f(V)$ en fonction de température..... | 43 |
| Figure II.10 : La caractéristique $P=f(V)$ en fonction de température..... | 43 |
| Figure II.11 : Schéma de simulation de module PV en Matlab /Simulink (modèle explicite).43 | |
| Figure II.12 : Caractéristiques I(V) des deux modèles de module PV..... | 44 |
| Figure II.13 : Caractéristiques P(V) des deux modèles de module PV..... | 44 |

Chapitre III : L'effet de poussière sur les panneaux PV

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : Banc d'essais (URAER) : (1) modules PV, (2) Charge électronique (Solmetric I-V Curve Tracer), (3) centrale d'acquisition (Agilent 34970A) et PC. | 52 |
| Figure III.2 : Les courbes I(V) P(V) de panneau haut avec : $G= 1020.54 \text{ W/m}^2$; $T= 40.51 \text{ }^\circ\text{C}$ | 52 |

| | |
|--|----|
| Figure III.3 : Les courbes I(V) P(V) de panneau haut avec : : $G= 986.19 \text{ W/m}^2$; $T= 38.26 \text{ C}^\circ$ | 52 |
| Figure III.4 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas : $G= 963.16 \text{ W/m}^2$; $T= 37.22 \text{ C}^\circ$ | 53 |
| Figure III.5 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas : $G= 984.55 \text{ W/m}^2$; $T= 38.70 \text{ C}^\circ$ | 53 |
| Figure III.6 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas : $G= 1021.31 \text{ W/m}^2$; $T= 40.43 \text{ C}^\circ$ | 53 |
| Figure III.7 : Les courbes I(V) P(V) de panneau haut avec : $G= 1020.54 \text{ W/m}^2$; $T= 40.51 \text{ C}^\circ$ dans les deux cas | 54 |
| Figure III.8 : Les courbes I(V) P(V) de panneau haut avec : $G= 986.19 \text{ W/m}^2$; $T= 38.26 \text{ C}^\circ$ dans les deux cas | 54 |
| Figure III.9 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas avec : $G= 963.13 \text{ W/m}^2$; $T= 37.22 \text{ C}^\circ$ dans les deux cas | 54 |
| Figure III.11 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas avec : $G= 1021.31 \text{ W/m}^2$; $T= 40.43 \text{ C}^\circ$ dans les deux cas | 55 |
| Figure III.10 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas avec : $G= 984.55 \text{ W/m}^2$; $T= 38.70 \text{ C}^\circ$ dans les deux cas | 55 |

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Caractéristique du module Shell s75..... 39

Chapitre III

Tableau III.1 : Cordonnées géographique de la zone du Ghardaïa.....51
Tableau III.2 : Résultat mathématique56

Liste des abréviations

PV : Panneau Photovoltaïque.

ZCE : zone de charge d'espace

NREL : National Renewable Energy Labotary

FF : Facteur de forme.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

GPV : Générateur Photovoltaïque.

MPP : point de puissance maximale

URAER : unité de recherche appliquée en énergies renouvelable.

FISA : FAUCONNET Ingénierie SAS

Liste des symboles

E et **E_{STC}** : Eclairage effective et de référence (W/m²).

D_S : Diamètre du soleil (1.39×10^9 m).

D_T : Diamètre de la terre (1.27×10^7 m).

D_{ST} : Distance moyenne soleil – terre (1.5×10^{11} m).

ε : Albédo

λ : onde électromagnétique.

Φ : La latitude de lieu (°)

L : La longitude (°)

δ : Déclinaison du soleil (°)

ω : l'angle horaire (°) .

a : Azimut du soleil (°)

P_C: Puissance crête (W)

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

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

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

V_{mpp} : Tension au point de fonctionnement maximale (w)

I_{mpp} : Courant au point de fonctionnement maximale (w)

G : L'éclairage de référence (1000 W/m²).

η: Le rendement

P_{mpp} : Puissance au point de fonctionnement maximale (w)

I_{ph} : Photo-courant créé par la cellule (A)

I_d: Courant de la diode (A)

V : Tension aux bornes de la cellule (V)

a : Facteur d'idéalité de la jonction PN compris entre 1 et 2

I_s : Courant de saturation de la diode (A)

q : Charge de l'électron (1.6×10^{-19} C)

K : Constant de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)

T et T_{STC} : Température effective de la cellule (K)

K_i : Coefficient de température de I_{ph} (A/K).

V_t : Tension thermique de la diode (V)

n_s : le nombre de cellules connectées en série.

R : Résistance série (Ω)

R_{sh} : Résistance shunts (ou parallèle) (Ω).

Introduction générale

La production d'énergie est un enjeu très important dans les années à venir. Exister en effet, la demande énergétique des sociétés industrialisées ne cesse d'augmenter. Aussi, les pays en développement auront besoin de plus en plus d'énergie indispensable pour leur développement. Aujourd'hui, une grande partie de la production mondiale d'énergie est d'origine fossile. La consommation de ces sources entraînera des émissions de gaz à effet de serre, donc la pollution augmente. Le danger supplémentaire est une consommation excessive de stocks de ressources naturelles qui réduit ce type de réserve utilisant l'énergie d'une manière dangereuse pour les générations futures [1].

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire.

Ce phénomène fut découvert au 19^{èm} siècle par le physicien [Alexandre Edmond Becquerel], la première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années soixante-dix (70). Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications [1].

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante, bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, c'est la solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages [2] :

- ✚ La production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre, il faut cependant réduire l'impact environnemental de la fabrication du système.
- ✚ La lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien au sud que dans le nord.

- ✚ L'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale.

L'objectif majeur de ce travail est de faire une étude sur l'impact de salissure sur les performances des modules PV , ce qui s'est fait en suivant le phénomène et en traçant ses résultats numériques sur les modules photovoltaïques.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en trois principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques, gisement solaire, construction des cellules photovoltaïques, l'effet photovoltaïque et principe de fonctionnement, puis les avantages et les inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation du module photovoltaïque par MATLAB SIMULINK. Nous citons deux modèles qui permettent d'obtenir les caractéristiques des modules PV.

Le troisième chapitre est divisé en deux parties. La première partie présente la poussière et ses propriétés ainsi que l'effet de la salissure sur les panneaux PV. La deuxième partie expose les résultats expérimentaux de l'impact de la salissure sur les panneaux PV installé au sein de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER).

Finalement, notre mémoire se termine par une conclusion générale qui résume la partie théorique et la partie expérimentale de notre étude.

Chapitre I :
**Généralités sur le système
photovoltaïque**

I.1. Introduction

Le solaire PV provient de la conversion directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelée le photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [3].

Ainsi, les systèmes PV peuvent alimenter des petits équipements portables (montres, calculatrices, ...), des applications en site isolé (habitations éloignées du réseau électrique, équipements de télécommunication, électrification rurale) et peuvent être raccordées au réseau électrique. Chaque système photovoltaïque se compose de :

- Modules photovoltaïques assemblés en série/parallèles qui à leurs tours sont formés d'un assemblage série/parallèle de cellules photovoltaïques.
- Système de conditionnement de puissance (régulateurs, onduleur, etc.).
- Un parc de batteries solaires vous sera indispensable pour stocker l'énergie produite.

Dans ce chapitre, nous décrivons les concepts de base sur l'énergie solaire et le gisement solaire, nous décrivons également les généralités et notions fondamentales sur la cellule solaire (le principe de fonctionnement, leurs caractéristiques principales, les différents types de ces cellules), ainsi que la mise en œuvre des modules photovoltaïque et une description générale des systèmes photovoltaïques, leurs types et leurs compositions.

I.2. Définition de l'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables sont toutes les énergies que la nature constitue ou reconstitue plus rapidement que l'homme ne les utilise [4]. Elles peuvent ainsi être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain.

Exemple :

- Vent : éolienne
- Soleil : thermique, photovoltaïque, thermodynamique.
- Chaleur terrestre : géothermie.
- Eau : hydroélectrique, marémotrice.
- Biodégradation : biomasse.
- Biocarburant.

I.2.1. L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique [3]. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement la production de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut ainsi produire avec de la vapeur à partir la convertir en électricité. (L'eau chaude est transformée en vapeur sous pression et dirigée à haute pression pour faire tourner une turbine à vapeur et la turbine est connectée à un générateur électrique).
- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste la production directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays où les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [2].

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est généralement prise égale à 1360W/m^2 [4].

- Diamètre de soleil $D_S = 1.39 \times 10^9$ m
- Diamètre de la terre $D_T = 1.27 \times 10^7$ m
- Distance moyenne soleil – terre $D_{ST} = 1.5 \times 10^{11}$ m

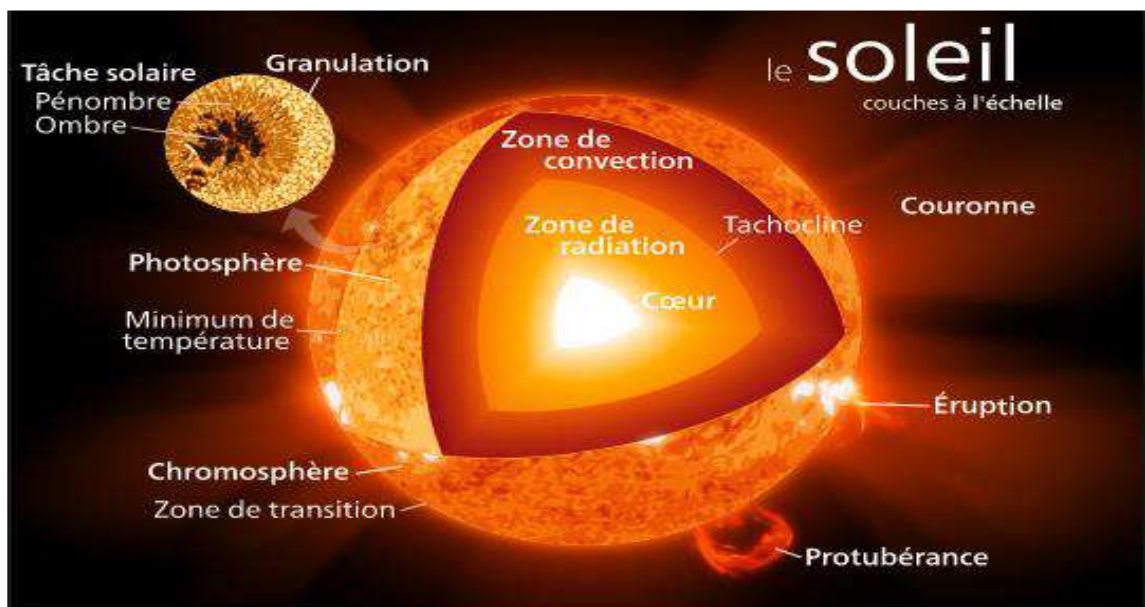


Figure I.1 : structure de soleil [5].

I.3. Gisement solaire en Algérie

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire.

Un gisement solaire est un ensemble de donnée que décrit l'évolution du rayonnement solaire disponible en un lieu donné et pendant une période donnée. Son évaluation peut être faite en utilisant les données de l'irradiation solaire globale. Il permet de simuler le fonctionnement probable d'un système d'énergie solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus précisément possible compte tenu des besoins énergétiques à satisfaire. En raison de sa situation géographique, l'Algérie possède l'un des champs solaires les plus élevés au monde. La durée d'ensoleillement moyenne nationale dépasse 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre facilement les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude (ce sont 180 lignes ou cercles imaginaires parallèles : 90 d'entre eux sont au nord de l'équateur et 90 au sud de l'équateur) est d'environ 7kWh/m²/jour [6]. Elle est répartie comme suit :

- Au Nord : 5,6 kWh/m²/jour
- Au Sud : 7,2 kWh/m²/jour

La figure (I.2) montre l'irradiation globale moyenne annuelle reçue sur plan incliné à la latitude du lieu.

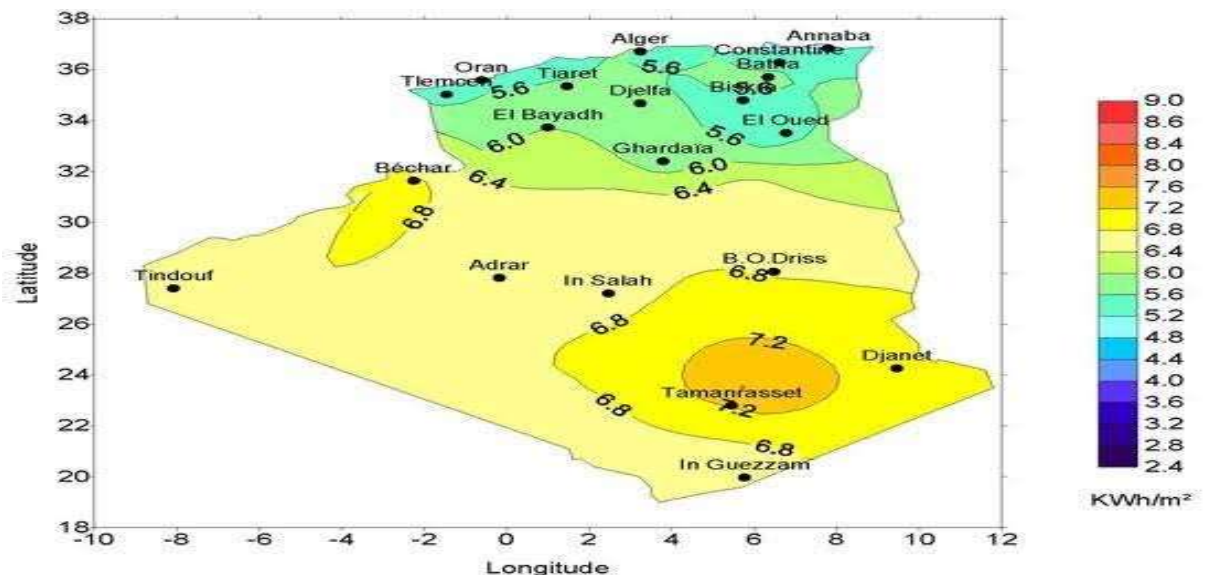


Figure I.2 : Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu (moyenne annuelle) [4].

I.3.1. Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150×10^6 Km, la couche terrestre reçoit une quantité importante d'énergie importante 180×10^6 GW, c'est pourquoi l'énergie solaire se présente comme une alternative aux autres sources d'énergie [4].

I.3.2. Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, il y a plusieurs composants :

- **Rayonnement direct**

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère [4].

- **Rayonnement diffus**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère [4].

- **Rayonnement réfléchi**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (sable,...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$ [4].

- **Rayonnement globale**

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi [4].

- **Le spectre solaire**

Le rayonnement solaire est la lumière qui provient du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques compris dans une bande de longueur d'onde variée. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi (Figure I.3)

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$) invisibles, provoquent des dommages sur les cellules.
- 47 % dans le visible ($0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.8 \mu\text{m}$) visibles, ils nous permettent de distinguer les formes et les couleurs.
- 44 % dans la bande des infrarouges ($\lambda > 0.8 \mu\text{m}$) invisibles, chauffent la matière solide, liquide ou gazeuse qu'ils rencontrent.

Sur terre, le spectre solaire est modifié en intensité (de l'ordre de 1000 W/m^2) et en distribution spectrale énergétique. Cette modification est due à l'absorption par l'atmosphère [4].

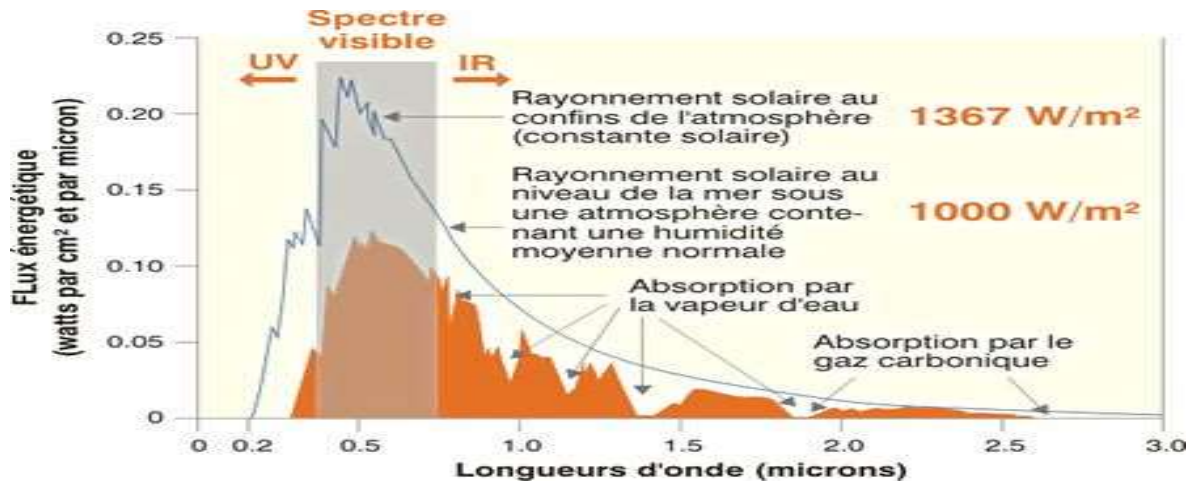


Figure I.3 : les différentes longueurs d'ondes du rayonnement [7].

I.3.3. Coordonnées géographiques

I.3.3.1. La latitude de lieu (ϕ)

La latitude (ϕ) repère la distance angulaire entre tout point et l'équateur. Elle varie de 0° (équateur) à $+90^\circ$ pour l'hémisphère Nord et de 0° (équateur) à -90° pour l'hémisphère sud [8].

I.3.3.2. La longitude (L)

La longitude d'un lieu donnée correspond à l'angle formé par le méridien de ce lieu avec le méridien d'origine (méridien de Greenwich). À partir de cette origine, elle varie entre 0 et 180, négativement vers l'ouest et positivement vers l'est. Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donne chaque degré de longitude représente 4 minutes [8].

I.3.3.3. L'altitude

Est la distance verticale exprimé en mètre. Séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer. Pris comme surface de référence [8].

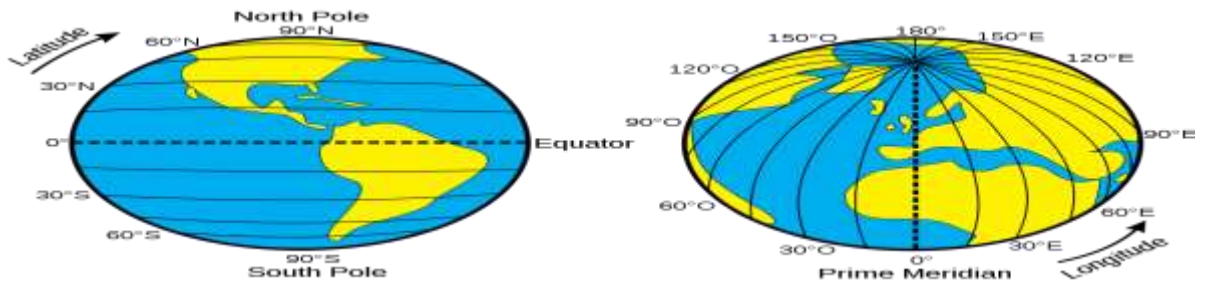


Figure I.4 : les coordonnées terrestres [8].

I.3.4. Paramètres de position

I.3.4.1. Déclinaison (δ)

L'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial est appelé la "déclinaison". Cet angle varie au cours des saisons entre +23.45 et -23.45. La valeur de déclinaison (δ) est calculée par formule :

$$\delta = 23.45 \times \sin [0.98 (J + 284)] \quad (I.1)$$

J : nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} janvier [9].

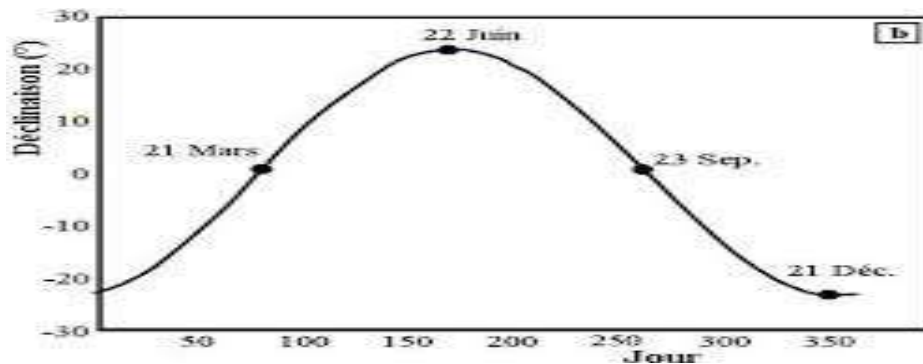


Figure I.5 : variation de la déclinaison solaire en fonction du jour [9].

I.3.4.2. Hauteur du soleil (h)

La hauteur du soleil est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à 0° au lever et au coucher astronomiques du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai [9]. L'expression de la hauteur du soleil est donnée par :

$$\sin(h) = \sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta).\cos(\phi).\cos(\omega) \quad (I.2)$$

ϕ : latitude de lieu.

δ : Déclinaison du soleil.

ω : l'angle horaire .

h : varie entre -90° à $+90^\circ$

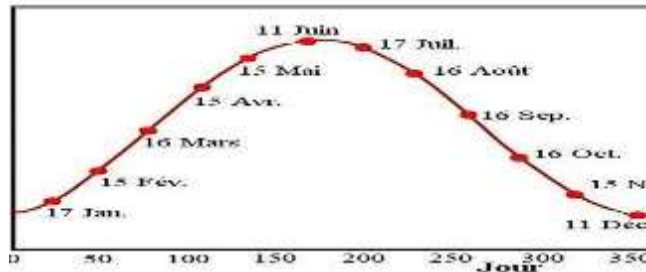


Figure I.6 : variation de la hauteur du soleil en fonction du jour [9].

I.3.4.3. Azimut du soleil (a)

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\phi) \times \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (I.3)$$

Avec : (a) varie entre -180 à $+180$ et ϕ : Déclinaison du soleil.

n prend : $a > 0 \rightarrow$ vers l'ouest, $a < 0 \rightarrow$ vers l'est et $a = 0 \rightarrow$ direction du sud [10].

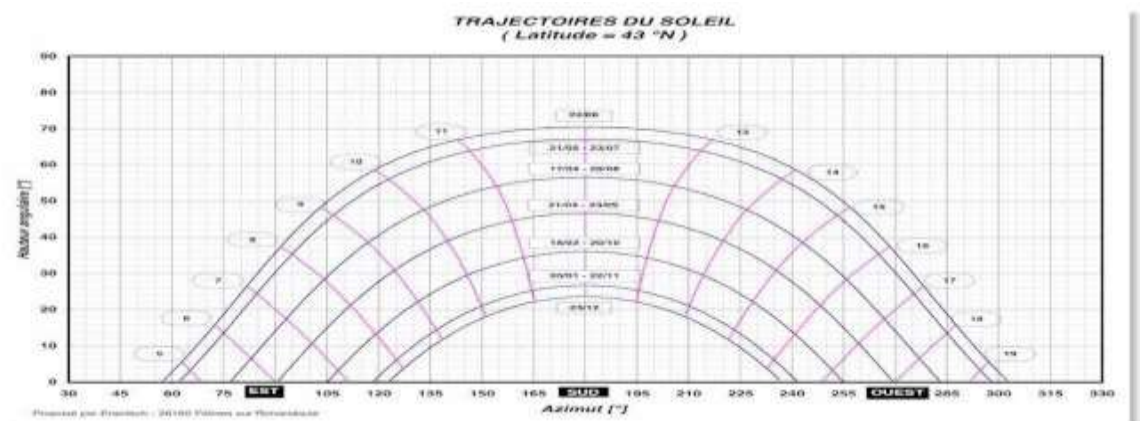


Figure I.7 : variation de la hauteur du soleil en fonction de l'azimut solaire [10].

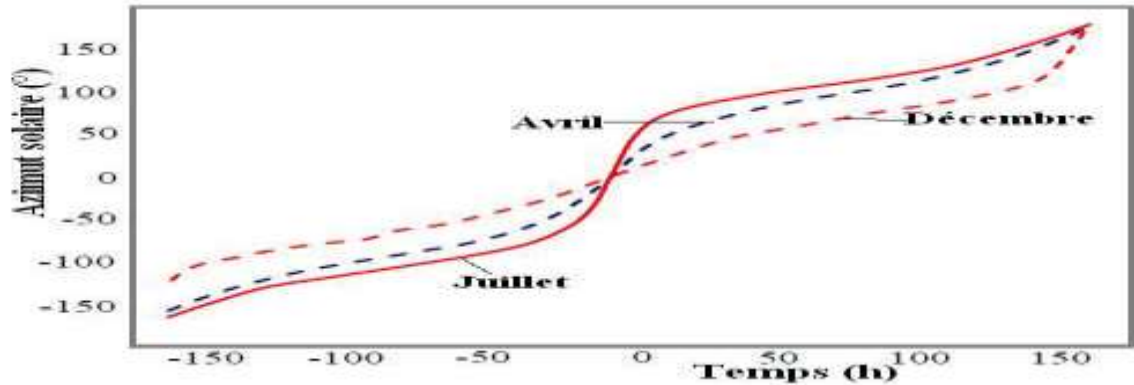


Figure I.8 : variation de l'azimut solaire en fonction du temps [11].

I.4 L'effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. Contrairement à l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structurels d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

L'énergie PV fut découverte pour la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Cependant, ce n'est qu'un cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux Etats-Unis, réussirent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système PV. Il y a aussi l'effet Compton qui est la diffusion inélastique de photons de haute énergie par des électrons faiblement liés ou des particules chargées libres. À cet effet, le photon transfère une partie de son énergie et de sa quantité de mouvement à la particule chargée [3].

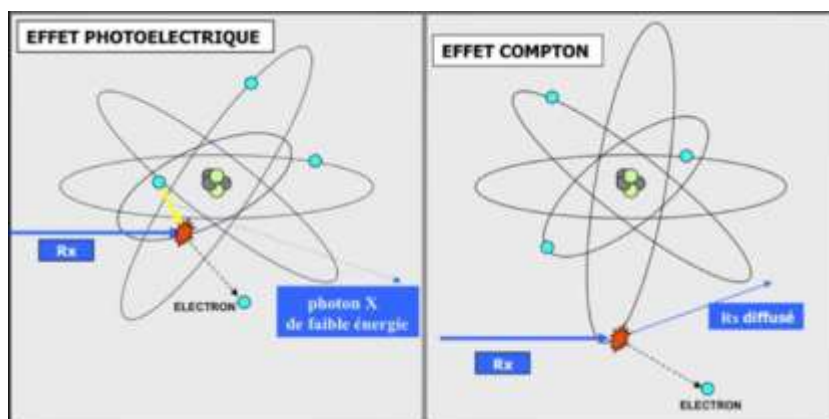


Figure I.9 : collision entre un photon et un atome [12].

I.5. La jonction PN

En physique des semi-conducteurs, une **jonction p-n** désigne une zone du cristal où le dopage varie brusquement, passant d'un dopage p à un dopage n . Lorsque la région dopée p est mise en contact avec la région n , les électrons et les trous diffusent spontanément de part et d'autre de la jonction, créant ainsi une zone de déplétion, ou zone de charge d'espace (ZCE), où la concentration en porteurs libres est quasiment nulle. Alors qu'un semi-conducteur dopé est un bon conducteur, la jonction ne laisse quasiment pas passer le courant. La largeur de la zone de déplétion varie avec la tension appliquée de part et d'autre de la jonction. Plus cette zone est petite, plus la résistance de la jonction est faible. La caractéristique courant-tension $I(V)$ de la jonction est fortement non linéaire : c'est celle d'une diode [13].



Figure I.10 : Jonction p-n dans du silicium. Sur ce schéma, les régions p et n sont reliées à des contacts métalliques, ce qui suffit à transformer la jonction en diode [13].

La physique des jonctions (p-n) a de grandes utilités pratiques dans la création de dispositifs à semi-conducteurs. La diode redresseuse de courant ainsi que la plupart des autres types de diodes contiennent ainsi une jonction p-n. Les cellules photovoltaïques composent également d'une jonction p-n de grande surface dans laquelle les paires électron-trou créées par la lumière sont séparées par le champ électrique de la jonction. Enfin, un type de transistor, le transistor bipolaire, est réalisé en mettant deux jonctions p-n en sens inverse – transistor pnp ou npn [13].

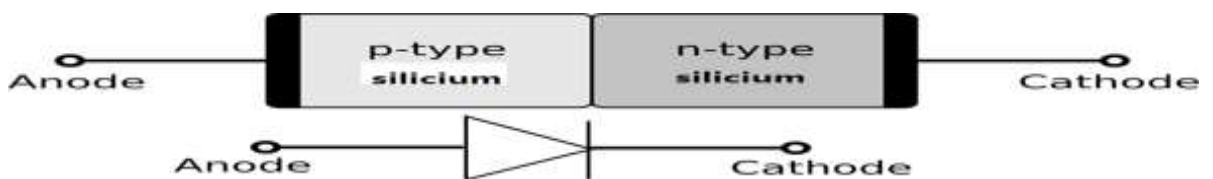


Figure I.11 : Le symbole d'une diode associé à la représentation d'une jonction p-n [13].

I.5.1. Dopage

Le profil de dopage est la principale variable sur laquelle on peut jouer pour créer différentes jonctions. Le dopage est réalisé par l'introduction d'impuretés dans le cristal d'un semi-conducteur dans le but d'augmenter le nombre de porteurs libres. Cette insertion est réalisée par

diffusion ou par transmutation. Le dopage consiste à introduire les atomes différents du silicium, comme le bore pour le dopage de type p et le phosphore pour le dopage de type n. Ce dopage change de type de part et d'autre de la jonction, passant d'un dopage de type p à un dopage de type n . En pratique, il est difficile de faire passer abruptement la densité de dopants (par exemple des donneurs) d'une valeur constante N_D à 0 [13].

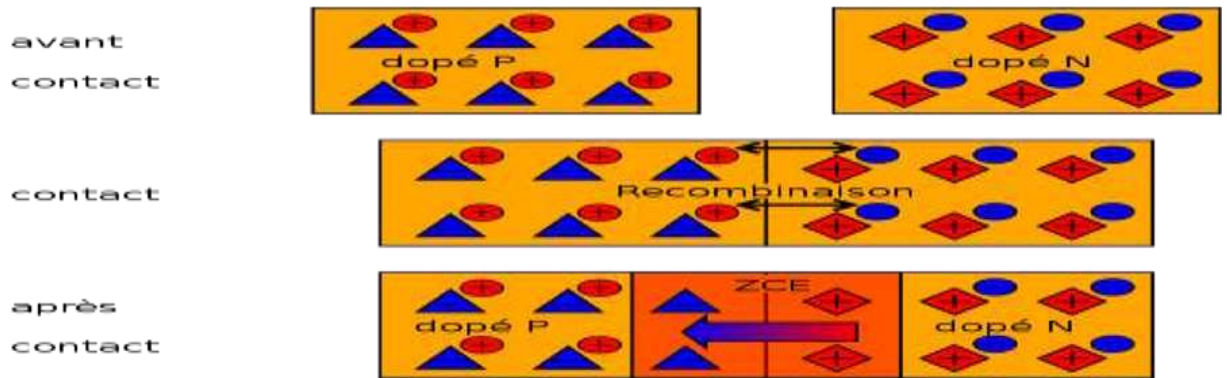


Figure I.12 : Schéma d'une jonction p-n [13].

La zone de charge d'espace peut être définie comme la zone de la jonction où il y a eu une recombinaison d'une paire électron-trou. En conséquence, il ne reste plus que des charges fixes. Elle s'appelle aussi zone de déplétion [20].

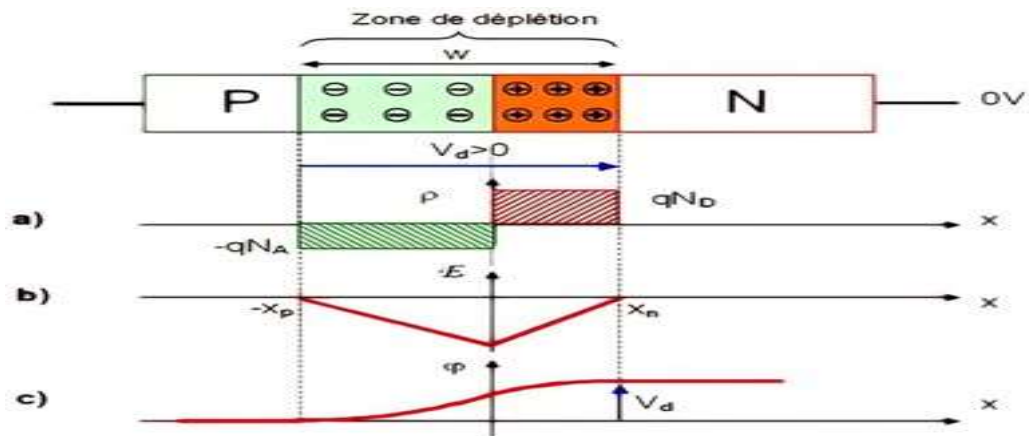


Figure I.13 : Illustration de la zone de charge espace d'une jonction p-n [13].

I.5.2. Jonctions p-n organiques

En 2020, l'équivalent organique d'une jonction p-n est réalisé à l'aide de deux ion élastomères au lieu de deux semi-conducteurs cristallins :

- le semi-conducteur dopé p est remplacé par un polymère poly cationique, positivement chargé par l'inclusion dans sa structure de groupes imidazolium et comportant des ions mobiles négatifs ;
- le semi-conducteur dopé n est remplacé par un polymère poly anionique, chargé négativement par l'inclusion de groupes sulfonate et comportant des ions mobiles positifs ;
- Les porteurs de charges ne sont plus des électrons mais des ions positifs et négatifs.

Le dispositif est incolore, transparent, souple et étirable. L'objectif est de réaliser à terme toute une ion électronique complet remplaçant l'électronique dans des situations où les composants électroniques, rigides et cassants, ne conviennent pas [13].

I.6. La cellule PV

I.6.1. Définition

La cellule photovoltaïque est utilisée pour générer l'énergie solaire. Son but est de capter le rayonnement du soleil, c'est-à-dire sa lumière, afin de le transformer en électricité. La cellule solaire, ou photovoltaïque, peut fonctionner seule, lorsque les besoins sont moindres, pour une calculatrice solaire par exemple. Pour répondre à des besoins plus importants, elle est assemblée en modules solaires photovoltaïques, que nous appelons couramment des panneaux solaires.

La cellule photovoltaïque fonctionne grâce au rayonnement solaire. Pour générer de l'électricité, elle utilise l'effet photovoltaïque qui est obtenu suite à l'impact des photons de la lumière du soleil sur un matériau semi-conducteur. Ce dernier transmet l'énergie des photons aux électrons qui vont alors créer la tension électrique. Voici la jonction PN [13].

I.6.2. Composition de la cellule solaire

I.6.2.1. Le rôle du composant de la cellule photovoltaïque

Pour produire une quantité d'électricité intéressante, le panneau solaire additionne les courants électriques générés par les cellules photovoltaïques. En fonction du matériau de construction utilisé pour fabriquer une cellule solaire, la puissance obtenue peut aller du simple au double. Le rendement du matériau semi-conducteur est d'une grande importance, car à surface égale, il peut être diversement intéressant d'un matériau à un autre. Il y en a beaucoup, mais le silicium, présent en quantité à la surface de la Terre, est le plus utilisé [14].

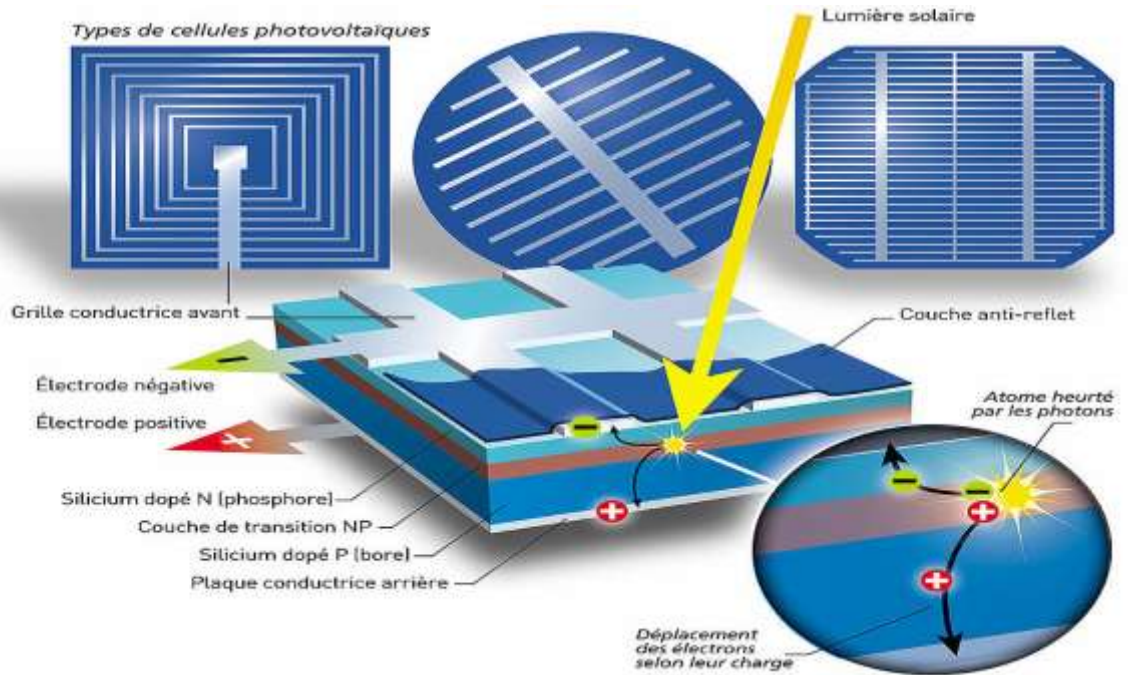


Figure I.14 : Les composants des cellules photovoltaïques [14].

I.6.2.2. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs).

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO_2 . C'est le principal constituant des roches sédentaires détritiques (sables, grés) [15].

I.6.3. Les différents types de cellules photovoltaïques

I.6.3.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une seule plaquette. Elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité utilisée pour alimenter une habitation ou le réseau public, par exemple [14].

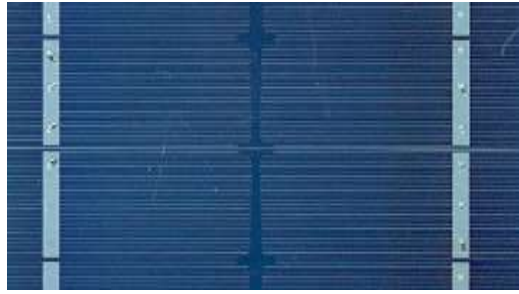


Figure I.15 : Cellule au silicium monocristallin [16]

I.6.3.2. La cellule photovoltaïque en silicium polycristallin

Grâce à ses cristaux bleus elle est facilement reconnaissable, cette cellule photovoltaïque est constituée d'une seule plaquette de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles [14].

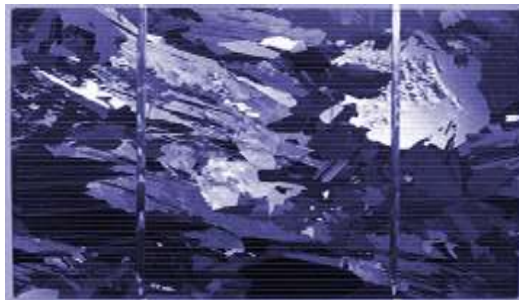


Figure I.16 : Cellule au silicium polycristallin [16]

I.6.3.3. La cellule au silicium amorphe

La cellule photovoltaïque en silicium amorphe est composée d'une fine couche de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les polycristallines. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, tels que des montres solaires, des lampes de jardin ou même des calculatrices solaires [14].



Figure I.17 : Cellule au silicium amorphe [16]

I.6.3.4. La cellule photovoltaïque tandem

La cellule photovoltaïque en tandem est conçue à partir de deux couches semi-conductrices simples. Elle peut s'agir d'une couche de silicium amorphe et d'une autre de silicium cristallin (mono ou poly) par exemple. Elle montre tout son intérêt pour une utilisation industrielle [14].

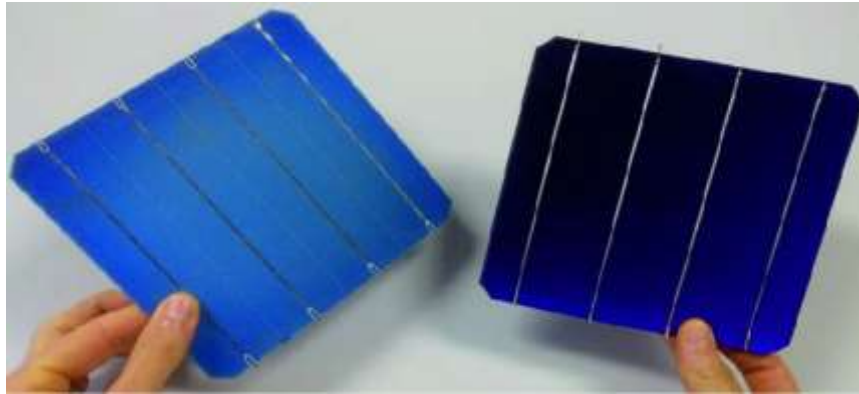


Figure I.18 : Cellule PV tandem [17]

I.6.3.5. La cellule photovoltaïque CIGS

Ce type de cellule photovoltaïque utilise un matériau semi-conducteur constitué d'un alliage de cuivre, d'indium, de sélénium et de gallium. Ce mélange est déposé en couche très fine sur un support [23].

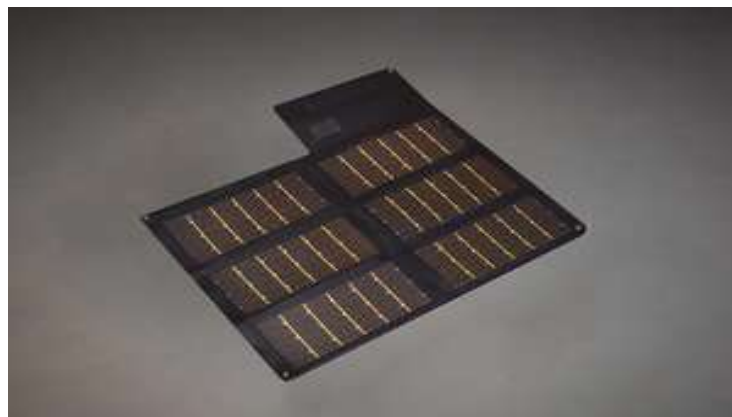


Figure I.19 : Cellule PVCIGS [18]

I.6.3.6. La cellule en couche mince de tellurure de cadmium

Ce modèle de cellule photovoltaïque est également réalisé à partir d'un matériau autre que le silicium. Ici, le tellurure de cadmium est utilisé en une seule couche scellée entre deux plaques de verre [16].



Figure I.20 : Cellule en couche mince [16]

I.6.3.7. La cellule photovoltaïque multi-jonction

La cellule photovoltaïque multi-jonction se compose de différentes couches de matériaux semi-conducteurs qui convertissent chaque rayon solaire, quelle que soit l'exposition. Les couches sont empilées, formant la cellule photovoltaïque multi-jonction. Pour l'instant. Pour le moment, seuls les engins spatiaux en sont équipés [14].



Figure I.21 : Cellule en multi-jonction [16]

I.6.4. L'évolution des rendements des cellules photovoltaïques

Depuis le début du siècle, l'énergie solaire photovoltaïque a enregistré l'un des taux de croissance les plus élevés au monde.

La capacité installée mondiale est passée de 2,6 GW en 2004 à 627 GW en 2019. Cette croissance est en partie due aux avancées technologiques enregistrées dans la production de cellules photovoltaïques dans ses différents secteurs [19].

Le NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA) tient à jour un graph des rendements de conversion confirmés les plus élevés pour les cellules de recherche pour une gamme de technologies photovoltaïques, tracé de 1976 à nos jours [25].

Les prototypes inclus dans ce graph de l'état de l'art actuel ont des efficacités qui sont confirmées par des laboratoires de test indépendants et reconnus - par exemple, NREL, AIST, JRC-ESTI et Fraunhofer-ISE - et sont rapportés sur une base standardisée. Les mesures pour les nouvelles entrées doivent respecter les conditions de test ou de rapport standard telles que définies par le spectre de référence global pour les appareils à plaque plate et le spectre de référence directe pour les appareils à concentrateur, comme indiqué dans les normes IEC 60904-3 édition 2 ou ASTM G173. La température de référence est de 25°C et la surface est la surface totale de la cellule ou la surface définie par une ouverture [25].

Les résultats d'efficacité des cellules sont fournis au sein des familles de semi-conducteurs :

- Cellules multi jonctions
- Cellules d'arséniure de gallium à simple jonction
- Cellules de silicium cristallin
- Technologies à couche mince
- Le photovoltaïque émergent.
- Quelques 28 sous-catégories différentes sont indiquées par des symboles colorés distinctifs.

Le record du monde le plus récent pour chaque technologie est mis en évidence le long du bord droit dans un drapeau qui contient l'efficacité et le symbole de la technologie. La société ou le groupe qui a fabriqué l'appareil pour chaque enregistrement le plus récent est en gras sur le tracé [25].

I.6.5. Les avantages et les inconvénients de chaque cellule

I.6.5.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Cette cellule photovoltaïque offre un rendement d'environ 25 %, l'un des meilleurs sur le marché. La durée de vie des panneaux solaires composés de cellules en silicium monocristallin avoisine les 30 ans, ce qui est très rentable, malgré le coût d'achat élevé. L'inconvénient de ce type de cellule solaire est qu'elle offre un très faible rendement lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire. Elle convient donc mieux aux régions les plus ensoleillées [14].

I.6.5.2. La cellule photovoltaïque en silicium polycristallin

La fabrication de ce type de cellule photovoltaïque est plus simple que la version en silicium monocristallin. Son coût est donc moindre. Côté efficacité du panneau solaire, on peut s'attendre entre 10 et 15 %, ce qui est nettement inférieur aux cellules monocristallines. Cependant, Elle

présente l'avantage de pouvoir être utilisé par temps nuageux, grâce à sa flexibilité d'irradiation [14].

I.6.5.3. La cellule au silicium amorphe

Cette cellule solaire présente de nombreux avantages. Tout d'abord, sa fabrication est peu coûteuse. Elle peut également être intégrée sur tout type de support, flexible ou rigide. Un autre point positif est qu'elle capte les rayons solaires même par temps nuageux. Son principal inconvénient est qu'elle offre un faible rendement, environ 7 % au maximum. Pour être rentable, il faut donc que la surface du panneau solaire soit conséquente. De même, ses performances diminuent dans le temps [14].

I.6.5.4. La cellule photovoltaïque tandem

Le rendement de ce type de cellule est intéressant, mais sa fabrication complexe en fait une cellule photovoltaïque coûteuse à produire. Comme pour tous les autres modèles, le nettoyage du panneau solaire doit être optimal afin de profiter d'un rendement constant et d'une meilleure longévité [14].

I.6.5.5. La cellule photovoltaïque CIGS

Ce type de cellule solaire représente la nouvelle génération de cellule photovoltaïque. Tout d'abord, elle offre un rendement très intéressant, entre 10 et 20 %. L'un des principaux avantages est qu'elle est conçue avec des matériaux autres que le silicium, moins toxiques. Aussi, le support utilisé peut-être flexible, afin de capter un maximum de rayons solaires. Cependant, pour obtenir un bon rendement, il est nécessaire de prévoir une plus grande surface que pour d'autres types de cellules [14].

I.6.5.6. La cellule en couche mince de tellurure de cadmium

Ce type de cellule photovoltaïque utilise une technologie mise en place pour développer le rendement des panneaux solaires. L'enjeu est doublement intéressant, car il permet également de diminuer les coûts. Offrant un coefficient thermique bas, ce type de cellule est cependant composé de produits toxiques, ce qui est un gros inconvénient [14].

I.6.5.7. La cellule photovoltaïque multi-jonction

La cellule photovoltaïque multi-jonction offre un rendement optimal, d'environ 40 %. Le seul inconvénient est que ce type de cellule solaire n'est pas commercialisé. En effet, il n'est utilisé que dans l'environnement spatial [14].

I.7. Module photovoltaïque

I.7.1. Définition

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de cellules assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lorsqu'il est exposé à la lumière. En effet, une cellule élémentaire ne génère pas suffisamment de tension, de l'ordre de 0,6 V pour la technologie cristalline. Il faut presque toujours plusieurs cellules en séries pour générer une tension utilisable.

De plus cet assemblage en série doit être protégé pour rendre le module adapté à une utilisation en extérieur. Les cellules sont en effet des objets fragile et sensible à la corrosion qu'il convient de protéger mécaniquement et de mettre à l'abri des climats rigoureux (humidité, variation de température, etc.).

Ainsi pour constituer un générateur de forte puissance, on réunit presque systématiquement plusieurs modules photovoltaïques et on les câble entre eux avant de les relier au reste du système. L'assemblage en série demande des panneaux de même courant et l'assemblage en parallèle de même tension.

Observons à la figure I.25, la structure d'un module au silicium cristallin (mono- ou polycristallin). Il est composé d'un certain nombre de cellules disposées en rang, connectées entre elles en série, et assemblées de façon étanche dans un encadrement [19].

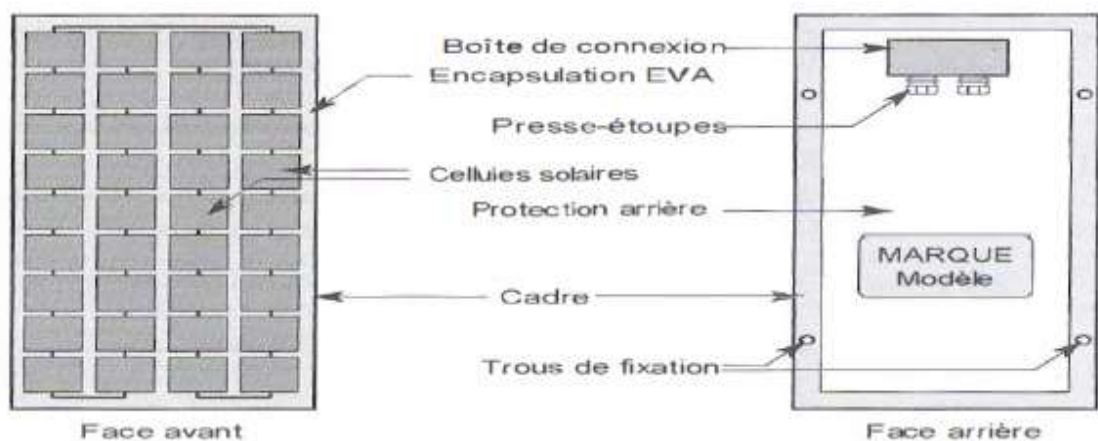


Figure I.23 : Structure d'un module photovoltaïque au silicium cristallin [19]

I.7.2. Caractéristiques électriques d'un module

- **Caractéristiques courant-tension**

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension $I(V)$ représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule.

Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque en 3 zones essentielles :

- Zone 1 : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne en générateur de courant ;
- Zone 2 : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par la puissance maximale) peut être déterminé ;
- Zone 3 : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension quasi constante, dans ce cas le générateur est comparable à un générateur de tension [19].

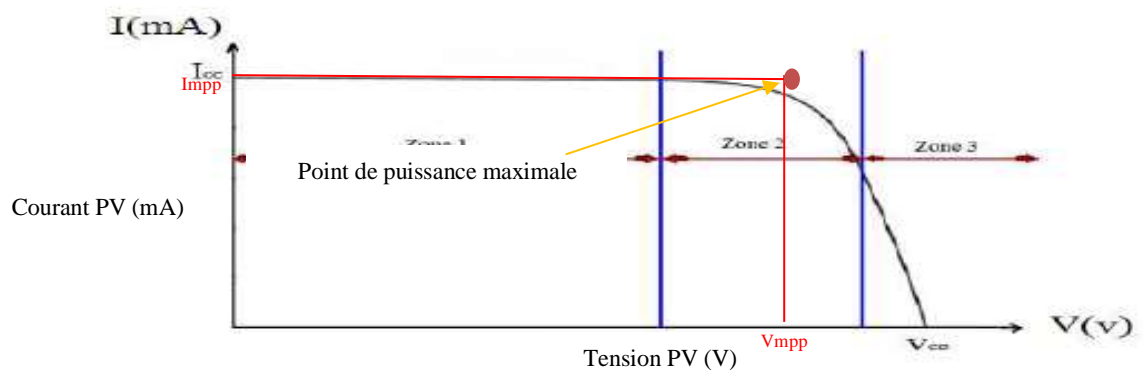


Figure I.24 : Caractéristique $I(V)$ dans différentes zones [19]

- **Puissance crête P_c**

Puissance électrique maximale que le module peut fournir dans des conditions standards (25°C et un éclairage de 1000 W/m^2) [26].

- **Tension de circuit ouvert V_{co}**

C'est la tension aux bornes de la cellule en l'absence de courant, pour un éclairage (plein soleil), c'est-à-dire lorsque le pôle (+) et le pôle (-) sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique, le courant traversant est alors nul. Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = V \times I$) est nulle [26].

- **Courant de court-circuit I_{cc}**

C'est le courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement (plein soleil), c'est-à-dire lorsque le pôle (+) est relié au pôle (-), la tension à ses bornes est alors nulle, Dans e cas, la puissance fournie par la cellule ($P = V \times I$) nulle [26].

- **Point de fonctionnement optimum**

L'objectif pour tous les utilisateurs de générateurs photovoltaïques est que l'énergie produite soit la plus optimale possible. Pour l'éclairement considéré, le point de puissance MPPT maximum représente le point où la puissance de la cellule est maximum. Ce point est associé à une tension maximale V_{mpp} et à une intensité maximale I_{mpp} . C'est cette puissance qui sera toujours recherchée par des régulateurs de charge afin d'optimiser la charge de la batterie et le fonctionnement du générateur [26].

- **Rendement**

Le rendement des cellules PV fait référence à l'efficacité énergétique. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivré par la cellule et la puissance lumineuse incidente

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{S \times G} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times G} \quad (I.4)$$

Avec

G : Eclairement (W/m^2) ;

S : Surface de la cellule (m);

P_{mpp} : Puissance au point de fonctionnement maximale.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [26].

- **Facteur de forme**

Le facteur de forme (FF) est défini comme le rapport entre la puissance maximale (P_{mpp}) que la cellule peut fournir et la puissance formée par le produit ($I_{cc} \times V_{co}$). Ce qui nous donne la relation suivante [26] :

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.5)$$

I.7.3. Assemblage des modules

Pour avoir une puissance installée de plusieurs centaines de W, de KW, voire de MW, il faut nécessairement assembler les modules photovoltaïques. On réalise alors un champ

photovoltaïque de surface variable. Sur le papier, le montage série et parallèle répond aux règles connues de l'électricité : lorsque les modules sont montés en série, les tensions sont ajoutées et le courant reste constant, et lorsqu'ils sont montés en parallèle, c'est l'inverse : les courants s'ajoutent et la tension reste constante. Il faut également que les courants des différents panneaux soient identiques dans une liaison série ainsi que les tensions dans une liaison parallèle. Nous retiendrons donc la première règle suivante :

- Seuls les panneaux avec le même courant de fonctionnement sont connectés en série (mais ils peuvent ne pas avoir la même tension).
- Seuls les panneaux qui ont la même tension de fonctionnement sont connectés en parallèle (mais ils peuvent ne pas avoir le même courant).

Lorsque des panneaux sont assemblés en parallèle, les courants s'additionnent comme nous l'avons vu. Ainsi, le courant total d'un champ de panneaux peut grimper très haut, surtout à basse tension [19].

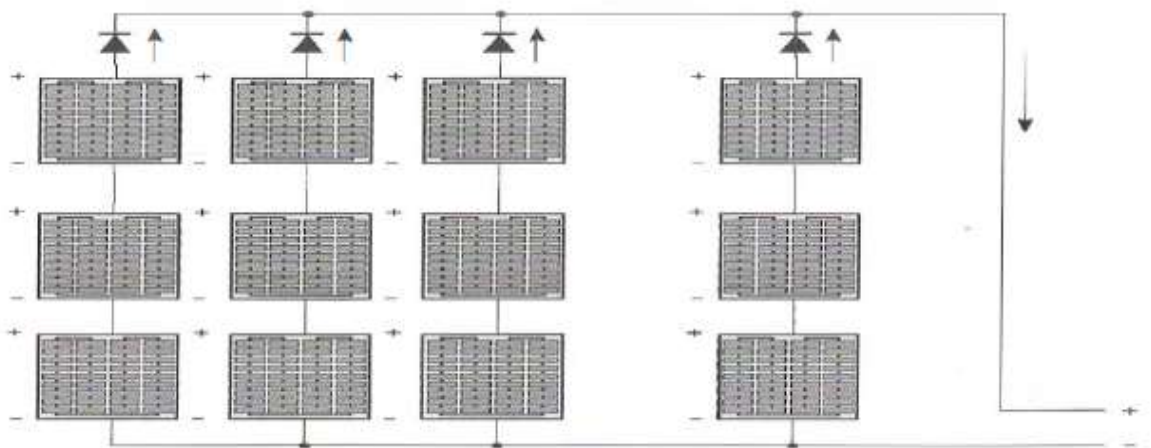


Figure I.25 : Champs des modules montés en série parallèle [19]

I.8. Le système photovoltaïque

I.8.1. Définition

Le système photovoltaïque se compose d'une source d'énergie (générateur photovoltaïque), d'une interface de puissance (les convertisseurs statiques CC-CC et CC-CA avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie [19].

I.8.2. Les différents types de système photovoltaïques

I.8.2.1. Système autonome

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils sont généralement utilisés pour alimenter des maisons, des chalets ou des camps dans des régions éloignées ainsi que pour des applications telles que la surveillance à distance et le pompage d'eau.

Selon que le stockage électrochimique est utilisé ou non, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

- Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- Des systèmes photovoltaïques sans stockage (au fil du soleil) [4].

➤ Systèmes autonomes avec stockage

Il s'agit de la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comprend des batteries qui stockent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque pendant la journée (figure I.8). Par conséquent, le stockage électrochimique dans des batteries est essentiel pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [4].



Figure I.26 : Système PV autonome ou isolé [4]

➤ Les systèmes autonomes sans stockage

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il est nécessaire de bien dimensionner le

générateur photovoltaïque pour qu'il ait suffisamment de puissance pour alimenter l'appareil avec le plus faible éclairement [4].

Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique [4].

I.8.2.2. Système PV raccordé au réseau

Un tel système est installé sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Habituellement dans les maisons ou les entreprises qui souhaitent utiliser une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement.

On peut distinguer des systèmes PV raccordés aux réseaux avec et sans batteries de stockage [4].

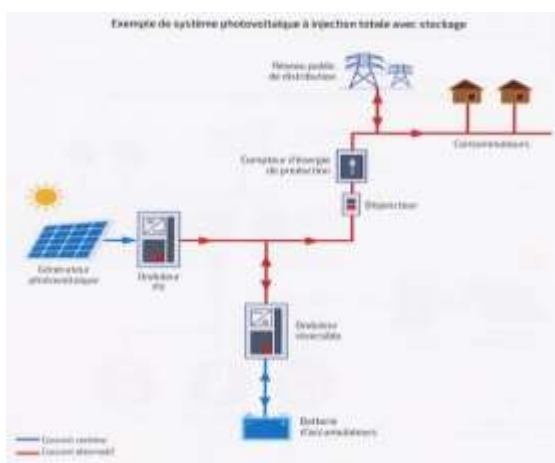


Figure I.27 : Système PV raccordé au réseau avec batterie [26]

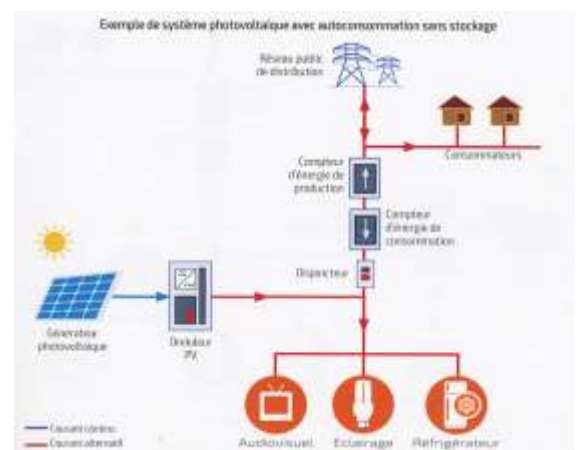


Figure I.28 : Système PV raccordé au réseau sans batterie [26]

I.8.2.3. Système PV hybride

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et parfois même le réseau public d'électricité.

En général, un système de batterie stocke de l'énergie et ne perd donc pas d'énergie provenant de sources aléatoires telles que l'énergie solaire ou éolienne.

La difficulté avec ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie pour toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gasoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours [4].

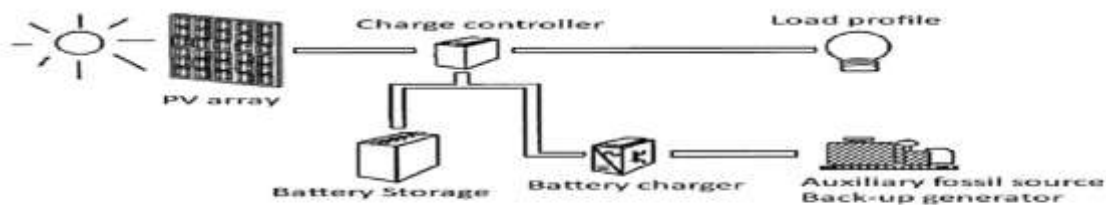


Figure I.29 : Système PV hybride [4]

I.9. Système de stockage

Dans les systèmes photovoltaïques, il est rare que la production et la consommation d'énergie soient simultanées. Aussi, dans les systèmes autonomes, le stockage du courant photovoltaïque produit pendant la journée est indispensable. En effet, il permet de subvenir aux besoins énergétiques nocturnes et surmonter les périodes de faible rendement, par exemple en cas de mauvais temps prolongé.

Des exigences particulières s'appliquent aux batteries utilisées dans les installations PV. Elles doivent être résistantes aux cycles répétés, c'est-à-dire supporter longtemps les charges de jour et les décharges.

Les batteries sont constituées de plusieurs cellules avec une tension nominale de 2 volts chacune. Ceux-ci peuvent être séparés ou réunis dans un seul boîtier commun. Habituellement, le nombre de cellules de la batterie est égale à 6, 12, 24, etc., de sorte que la tension continue du système soit de 12, 24, 48V, etc. [19].



Figure I.30 : Les batteries au plomb pour les systèmes PV [23]

I.10. Système de régulation

Le régulateur est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome : il contrôle les flux d'énergie. Il doit protéger la batterie contre les surcharges (solaires) et décharges profondes (utilisateur). Il doit également assurer la surveillance et la sécurité de l'installation (surcharge, alarmes, fusibles, inversion de polarité). Dans les systèmes plus sophistiqués, il peut aussi

commander la recharge par d'autres sources d'énergie (génératrice d'appoint, éolienne, hydraulique).

De plus, il affichera des indications concernant l'état de charge des batteries et les paramètres de fonctionnement du système [19].

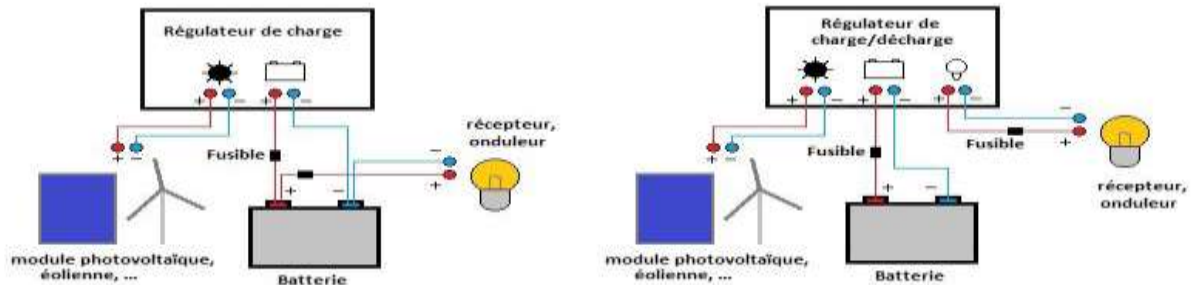


Figure I.31 : Régulateurs connectés avec les systèmes PV [19]

I.11. Système de conversion

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative [19].

I.11.1. Convertisseurs DC/DC

Ce type de composant est utilisé pour transformer la tension de la source (panneau ou batterie) en une tension DC différente pour alimenter un appareil spécial : un chargeur pour téléphone portable, une radio, un ordinateur portable...etc. Deux types sont possibles : les convertisseurs « vers le haut » pour augmenter la tension et les convertisseurs « vers le bas » pour abaisser la tension [19].

I.11.2. Convertisseurs DC/AC (Onduleurs)

Les onduleurs photovoltaïques sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on modélise la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée. On distingue habituellement [18] :

I.11.2.1. Onduleur autonome

C'est un type d'onduleur qui délivre une tension de fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner. Indépendants des systèmes

d'énergie solaire. Les onduleurs autonomes peuvent être utilisés dans des endroits éloignés (comme une cabine, pompe à eau au chalet ou au poste de surveillance) ainsi que pour les situations d'énergie mobiles, tels que les bateaux et les véhicules récréatifs [19].

I.11.2.2. Onduleur réseau

Comme pour un onduleur autonome en site isolé, le principe est de transformer une tension continue en une tension alternative de fréquence et valeur équivalentes à celle du réseau. Les différences essentielles sont que l'onde sera obligatoirement sinusoïdale et que cette tension alternative qui va charger le réseau, devra se mettre en phase avec celui-ci et répondre à un ensemble de prescriptions et impératifs de sécurité plus contraignants que dans le cas autonome. Tous les onduleurs couplés au réseau incorporent une mesure du point de fonctionnement maximal des panneaux MPPT [19].

I.11.2.3. Types d'onduleurs en fonction de l'installation PV

Les onduleurs connectés au réseau peuvent être de type : onduleur centralisé, onduleur String ou onduleur modules. L'utilisation de chaque une dépend des paramètres d'installation et de branchement des modules photovoltaïques : branchement en séries ou en parallèle degrés d'inclinaison différents entre les modules, tension de sortie de l'installation, flux lumineux général, écart de puissance entre les modules [19].

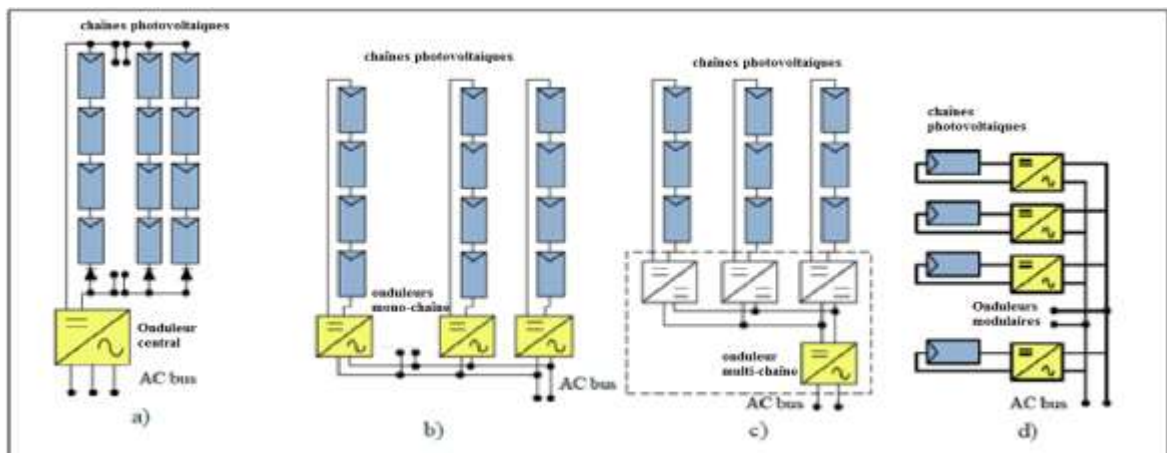


Figure I.32 : Configurations des systèmes PV connectés au réseau

a) Onduleurs centraux ; b) Onduleurs mono chaîne (string inverter); c) Onduleurs multi chaîne (Multi-string inverter); d) Onduleurs modulaires [20]

I.12. Système de protection

Pour garantir une durée de vie important d'une installation PV destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association des cellules en séries et des panneaux en parallèles. Pour cela, deux composants de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles [19].

I.12.1. Diode by-pass

La diode by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules, afin de protéger les plus faibles entre eux contre la polarisation inverse.

La présence des diodes by-pass a donc permis d'améliorer la performance du module. Pour des raisons technico-économiques, le nombre de diodes by-pass sur un module est généralement limité à 5 [19].

I.12.2. Diode anti-retour

La diode anti retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaitre lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit [19].

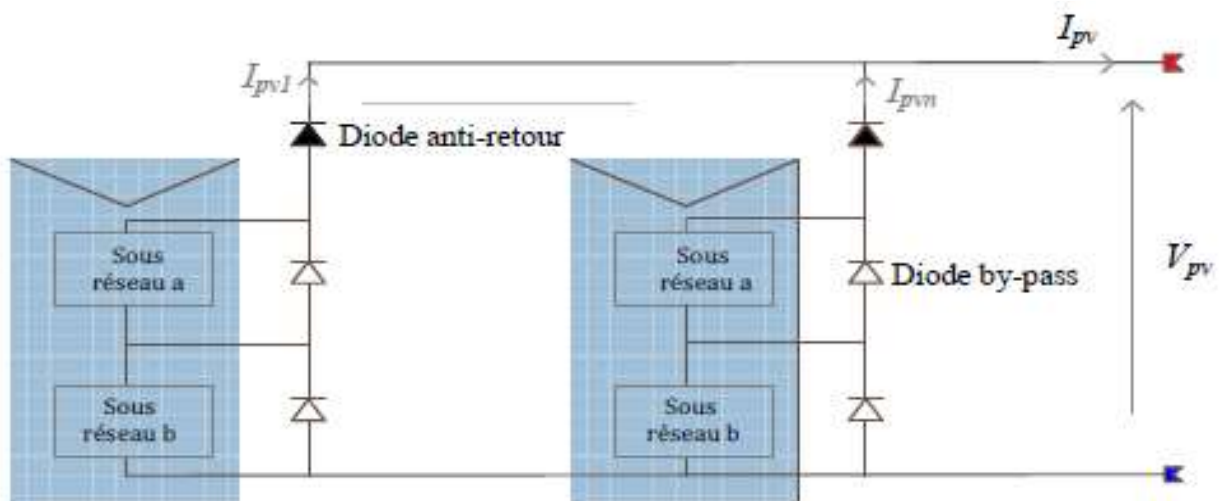


Figure I.33 : Exemple d'association sécurisée de deux modules PV en parallèle avec leurs diodes de protection [24]

I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

I.13.1. Les avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Consommation gratuite dès l'installation du système.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du MilliWatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu [21].

I.13.2. Les inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [21].

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre on a donné un aperçu général sur l'énergie solaire et tous qu'est accordé avec les systèmes photovoltaïques. On a parlé premièrement des définitions sur l'énergie renouvelable et l'énergie solaire, avec des généralités sur le gisement solaire. Après on a donné des descriptions autour de l'effet photovoltaïque et leurs composants (les cellules PV et leurs types). La dernière partie on a parlé sur les systèmes PV, les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.

Chapitre II :

**Modélisation et simulation des
modules photovoltaïques**

II.1. Introduction

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les Paramètres constituant. Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP [2].

La modélisation passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents, en prenant plus ou moins de détails. Cette modélisation permet d'obtenir la caractéristique $I(V)$ en fonction de deux entrées qui sont la température (T) et l'éclairement (E) [2].

La simulation de la performance de système permet de tracer toutes les étapes de la conversion d'énergie et d'identifier en détail les pertes à travers le système, toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB.

II.2. Modélisation d'une cellule PV

La modélisation mathématique des cellules solaires est très indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement du générateur photovoltaïque. Elle s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les chercheurs. Le comportement des cellules PV peut être modélisé avec un circuit équivalent. Ce circuit peut être utilisé pour une cellule individuelle, pour un module se composant de plusieurs cellules ou pour un champ PV.

Nous allons modéliser et simuler la cellule photovoltaïque, qui nous permettra de caractériser les comportements de générateur PV dans les conditions souhaitées [2].

Il existe plusieurs modèles qui ont été proposés pour représenter une cellule PV, on présentera quatre modèles [2] :

- Modèle idéale ;
- Modèle à une diode ;
- Modèle à deux diodes ;
- Modèle explicite.

II.2.1. Modèle idéale

Le composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est basée sur une jonction p-n) [27].

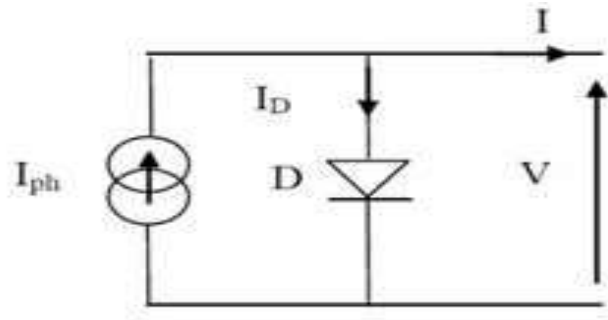


Figure II.1 : Circuit idéal d'une cellule photovoltaïque [27]

Par l'application de la loi des mailles sur ce circuit on trouve :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{II.1})$$

$$I = I_{ph} - I_S \left(\exp\left(\frac{qV}{a.K.T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

I : Courant fourni par la cellule [A]

I_{ph} : Photo-courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident);

I_D : Courant de la diode ;

V : Tension aux bornes de la cellule [V]

a : Facteur d'idéalité de la jonction PN compris entre 1 et 2.

Il permet de tenir compte des différentes composantes du courant direct circulant dans la jonction :

- Les composantes dues aux recombinaisons dans les régions N et P constituent des courants de diffusion des électrons et des trous (a=1),
- La composante due aux recombinaisons dans la zone de charge d'espace constitue le courant de recombinaison de la jonction (a=2).

I_S : Courant de saturation de la diode [A];

q : Charge de l'électron [$1,6 \times 10^{-19}$ C];

K : Constant de Boltzmann [$1,38 \times 10^{-23}$ J/K];

T : Température effective de la cellule [K].

II.2.2. Modèle à une diode

Une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode (voir figure II. 2) [22].

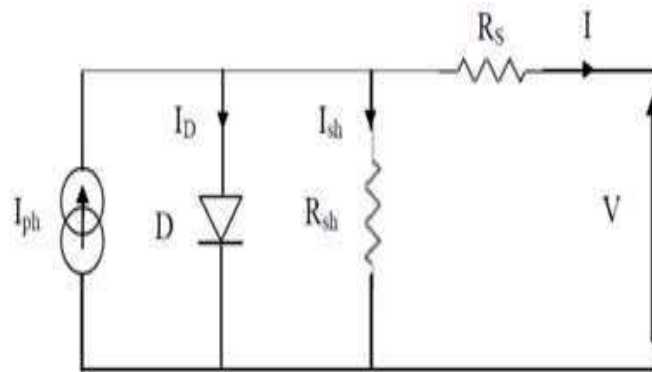


Figure II.2 Schéma équivalent d'une cellule PV[27]

En addition au modèle idéal, le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série mais aussi des courants de fuites modélisées par une résistance shunt.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.3})$$

- I_{ph} photo-courant [A], proportionnel à l'éclairement E , avec correction selon T :

$$I_{ph} = \frac{E}{E_{STC}} [I_{ph,STC} + Ki(T - T_{STC})] \quad (\text{II.4})$$

Avec :

E et E_{STC} : éclairement effective et de référence [W/m^2] ;

T et T_{STC} : Température effective et de référence [K] ;

$I_{ph,STC}$ (I_{cc}) : Le courant photonique sous condition de référence [A] ;

Ki : Coefficient de température de I_{ph} [A/K].

- Le courant de jonction I_d (courant traversant la diode) est donné par :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{a.K.T}} - 1 \right) \quad (\text{II.5})$$

- Le courant de saturation inverse de la diode en [A], est supposé variable avec la température selon l'expression :

$$I_0 = \left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^3 \times \exp \left[\left(\frac{q \cdot E_g}{a \cdot K \cdot T}\right) \times \left(\frac{1}{T_{STC}}\right) - \left(\frac{1}{T}\right) \right] \quad (\text{II.6})$$

Où

E_g est l'énergie de Gap de la cellule ;

(E_g de : Silicium cristallin = 1.12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1.03 eV et CdTe = 1.5 eV).

- Le courant dérivé par la résistance shunt est :

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

A partir de l'équation précédente, on obtient l'expression de courant I :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V + R_s \cdot I}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (\text{II.8})$$

$$V_t = \frac{a \cdot K \cdot T}{q} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

I : Courant fourni par la cellule [A] ;

V : Tension à la borne de la cellule [V]

V_t : Tension thermique de la diode (V), Elle dépend de :

q : La charge électrique élémentaire 1.602×10^{-19} Coulomb [C] ;

K : Constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23} [J/K] ;

T : Température de la cellule [K];

a : Le facteur d'idéalité de diode (1 à 2).

Pour un module :

$$V_t = \frac{n_s \cdot a \cdot K \cdot T}{q} \quad (\text{II.10})$$

n_s : le nombre de cellules connectées en série ;

R : Résistance série (Ω) ;

R_{sh} : Résistance shunts (ou parallèle) (Ω).

La résistance série et parallèle d'un module sont :

$$R_s = n_s \times R_{s,c} ; R_{sh} = n_s \times R_{sh,c} \quad (\text{II.11})$$

Les conditions de référence E et E_{ref} : sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle (V_{co} , I_{co} , V_{mpp} , I_{mpp}), se sont, soient les spécifications du fabricant, toujours données aux STC (Standard Test Conditions, 1000 W/m², 25°C, spectre AM 1.5), soient des valeurs issues d'une mesure du module [22].

II.2.3. Modèle à deux diodes :

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (II.4), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série [27].

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles.

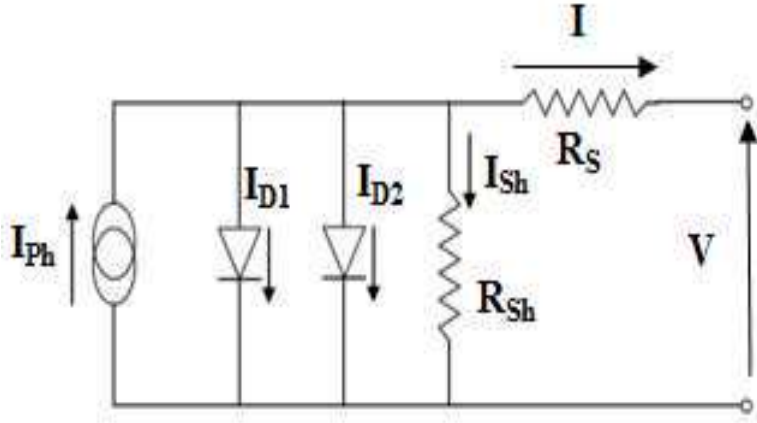


Figure II.3 Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes [27]

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

Le courant de la diode est donné par :

$$I_{D1} = I_{S1} \left(\exp \left(\frac{q(V+R_S I)}{a.K.T} \right) - 1 \right) \quad (II.13)$$

$$I_{D2} = I_{S2} \left(\exp \left(\frac{q(V+R_S I)}{a.K.T} \right) - 1 \right) \quad (II.14)$$

Avec :

I_{S1} , I_{S2} courant de saturation des diodes

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left(\exp \left(\frac{q(V+R_S I)}{a.K.T} \right) - 1 \right) - I_{S2} \left(\exp \left(\frac{q(V+R_S I)}{a.K.T} \right) - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_{Sh}} \quad (II.15)$$

II.2.4. Modèle explicite

Ce modèle nécessite les données de quatre paramètres à savoir le courant de court-circuit (I_{sc}), la tension à circuit ouvert (V_{oc}), le courant maximal (I_{mpp}) et la tension maximale (V_{mpp}) [27]. La relation entre le courant I et la tension V est donnée par :

$$I = I_{cc}(1 - C1 (\exp(\frac{V}{C2 \times V_{co}})) - 1) \quad (II.16)$$

Les paramètres $C1$ et $C2$ sont comme suit [32] :

$$C1 = (1 - \frac{I_{mpp}}{I_{cc}}) \exp(\frac{-V_{mmp}}{C2 \times V_{co}}) \quad (II.17)$$

$$C2 = \frac{\frac{V_{mpp}-1}{V_{co}}}{\ln(1 - \frac{I_{mmp}}{I_{cc}})} \quad (II.18)$$

II.3. Simulation du module PV

Dans notre travail, nous avons choisi le module photovoltaïque du type Shell S75. Le tableau (II.1) donne les caractéristiques du module Shell S75 avec 36 cellules Polly-cristallines en série, sous les conditions standards (1000 W/m², masse optique : AM 1.5, Température de la cellule : 25C°). Nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

Tableau II.1 : Caractéristique du module Shell s75

| Grandeurs | Valeurs |
|--|--------------|
| Puissance nominale | 75 W |
| Tension nominale (V_{mpp}) | 17.6 V |
| Tolérance P_{MPP} | ± 5% |
| Courant de court-circuit (I_{cc}) | 4.7 A |
| Tension du circuit ouvert (V_{co}) | 21.6 V |
| Courant (I_{max}) | 4.26 A |
| Résistance shunt (R_{sh}) | 130 Ω |
| Résistance série (R_s) | 0.4 Ω |

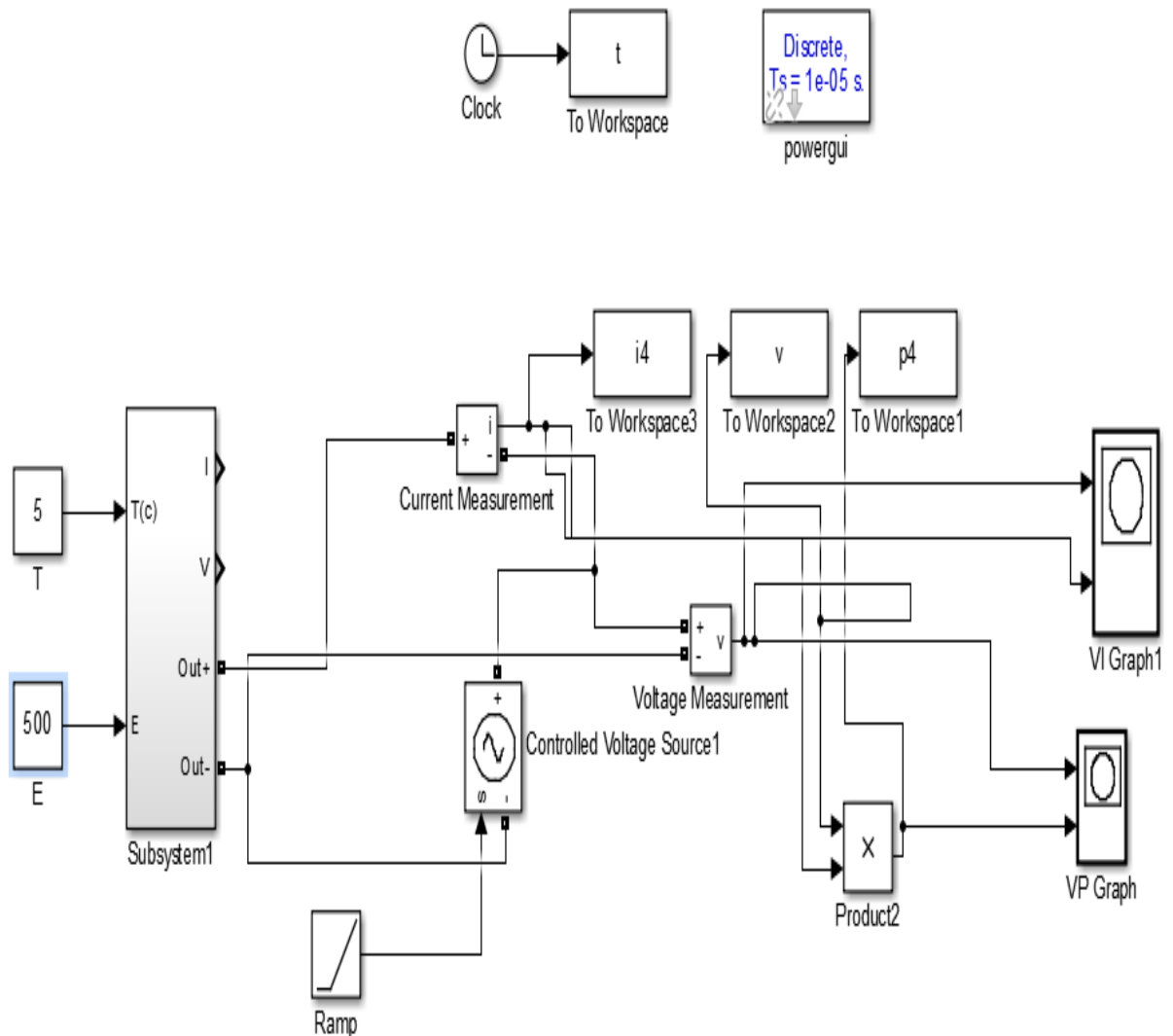


Figure II.4 : Schéma de simulation de module PV en Matlab /Simulink (modèle d'une diode)

II.3.1. Caractéristique I(V) P(V) d'un module photovoltaïque

Les figures (II.5) et (II.6) représentent les courbes I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque typique dans des conditions standard l'éclairement $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et de température $T = 25^\circ\text{C}$ à partir du schéma de simulation de la figure (II.4)

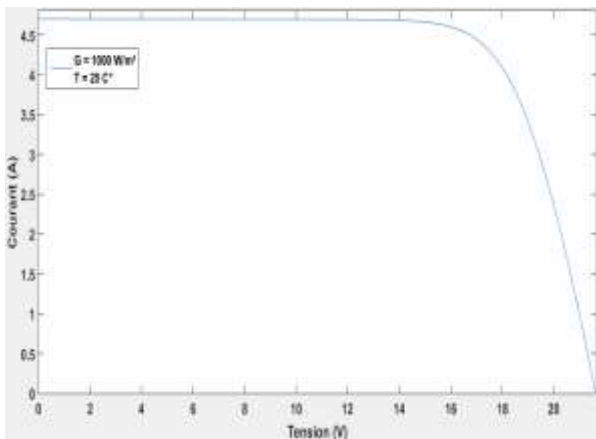


Figure II.5 : Caractéristique $I(V)$ d'un module PV

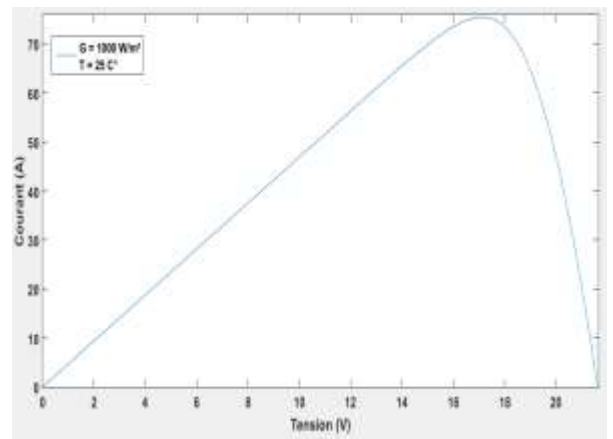


Figure II.6 : Caractéristique $P(V)$ d'un module PV

II.3.2. Influence de l'éclairement et de la température

Les caractéristiques d'un panneau dépendent de l'éclairement et de la température. Selon la technologie du générateur photovoltaïque, les variations des paramètres seront différentes.

II.3.3. Influence de l'éclairement

Les figures (II.7) et (II.8) présentent un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

Nous avons fixé la température ($T = 25^\circ\text{C}$) pour différents éclairements. On constate alors que la tension à vide est relativement constante par contre le courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de l'éclairement.

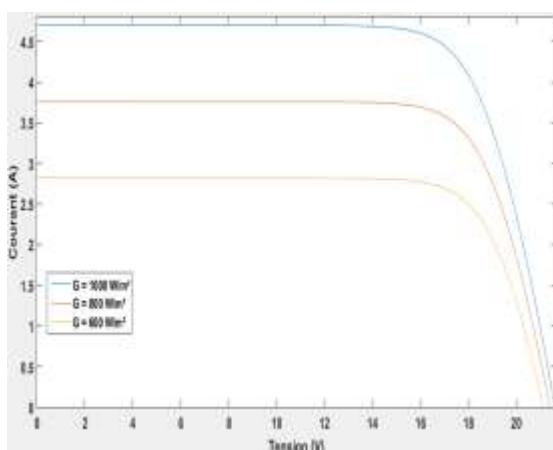


Figure II.7 : La caractéristique $I=f(V)$ en fonction de l'éclairement

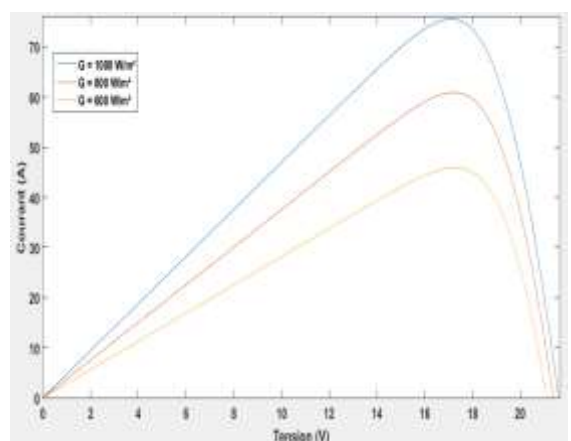


Figure II.8 : La caractéristique $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement

II.3.4. Influence de la Température

Les figures (II.9) et (II.10) présentent les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module photovoltaïque pour un niveau rayonnement ($G=1000 \text{ W/m}^2$) fixé et pour différentes températures :

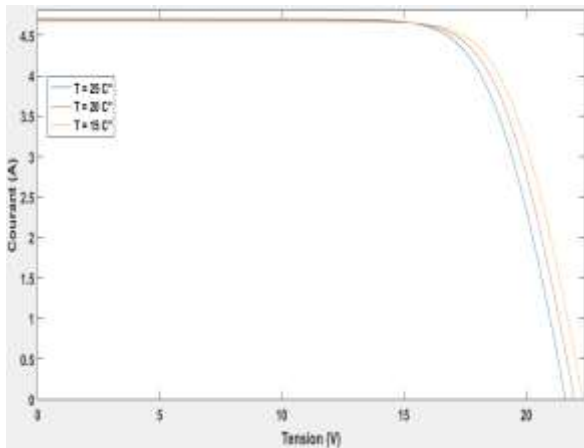


Figure II.9 : La caractéristique $I=f(V)$ en fonction de température

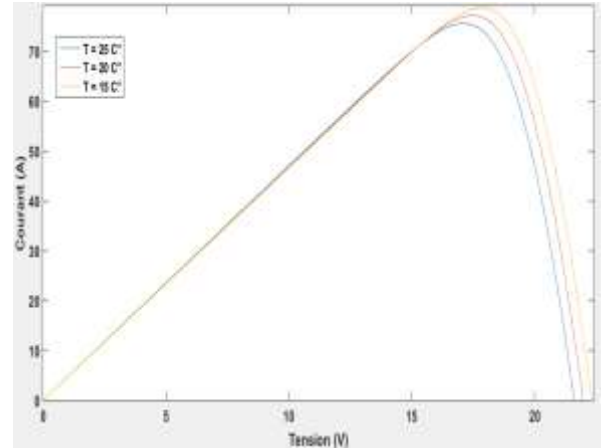


Figure II.10 : La caractéristique $P=f(V)$ en fonction de température

Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

II.3.5. Comparaison entre les simulations des deux modèles

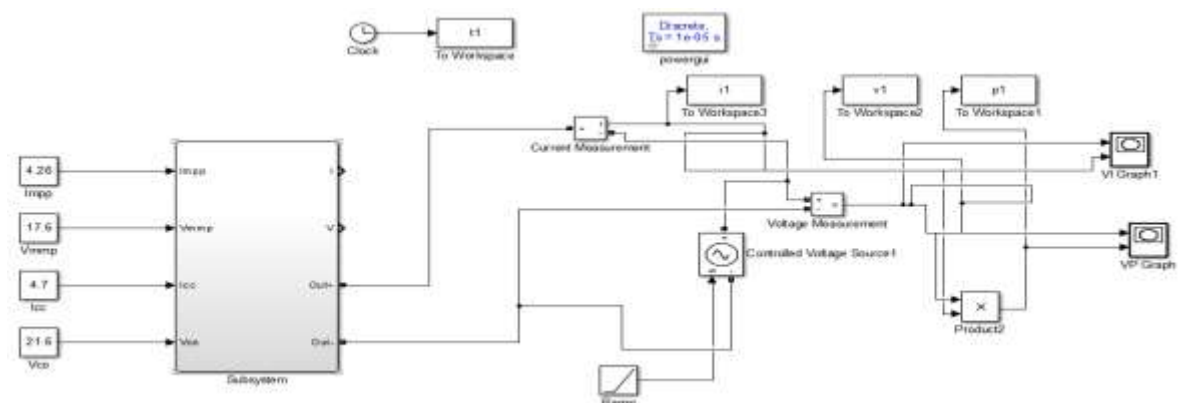


Figure II.11 : Schéma de simulation de module PV en Matlab /Simulink (modèle explicite)

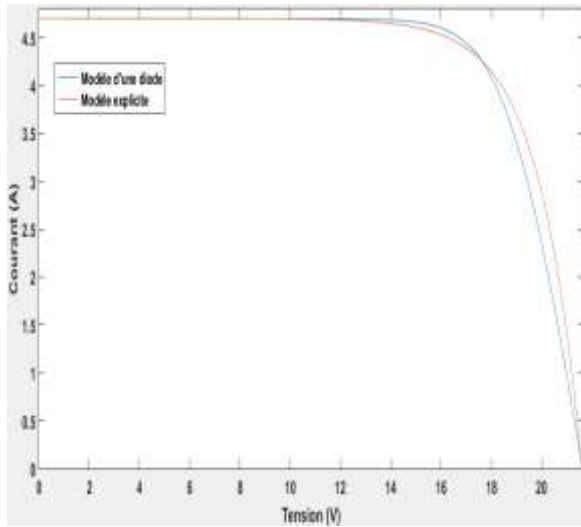


Figure II.12 : Caractéristiques $I(V)$ des deux modèles de module PV

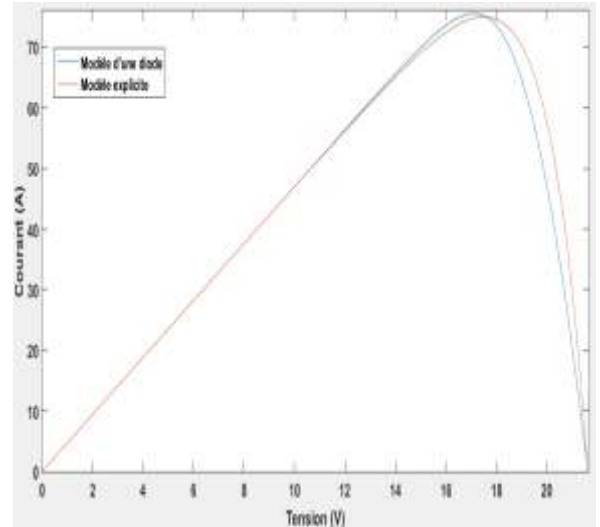


Figure II.13 : Caractéristiques $P(V)$ des deux modèles de module PV

- **Les erreurs de modèle d'une diode**

$$\frac{\Delta V_{max}}{V_{max}} = \left| \frac{17.6 - 17.59}{17.6} \right| \times 100 = 0.05 \% \quad (\text{II.19})$$

$$\frac{\Delta I_{max}}{I_{max}} = \left| \frac{4.26 - 4.263}{4.26} \right| \times 100 = 0.07 \% \quad (\text{II.20})$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \left| \frac{75 - 74.99}{75} \right| \times 100 = 0.01 \% \quad (\text{II.21})$$

$$\frac{\Delta V_{OC}}{V_{OC}} = \left| \frac{21.6 - 21.6}{21.6} \right| \times 100 = 0 \% \quad (\text{II.22})$$

$$\frac{\Delta I_{CC}}{I_{CC}} = \left| \frac{4.7 - 4.69}{4.7} \right| \times 100 = 0.2 \% \quad (\text{II.23})$$

- **Les erreurs de modèle explicite**

$$\frac{\Delta V_{max}}{V_{max}} = \left| \frac{17.6 - 17.57}{17.6} \right| \times 100 = 0.17 \% \quad (\text{II.24})$$

$$\frac{\Delta I_{max}}{I_{max}} = \left| \frac{4.26 - 4.26}{4.26} \right| \times 100 = 0 \% \quad (\text{II.25})$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \left| \frac{75 - 74.99}{75} \right| \times 100 = 0.01 \% \quad (\text{II.26})$$

$$\frac{\Delta V_{OC}}{V_{OC}} = \left| \frac{21.6 - 21.6}{21.6} \right| \times 100 = 0 \% \quad (\text{II.27})$$

$$\frac{\Delta I_{CC}}{I_{CC}} = \left| \frac{4.7 - 4.69}{4.7} \right| \times 100 = 0.2 \% \quad (\text{II.28})$$

Le modèle explicite est le plus précis et converge dans tous les cas étudiés par rapport le module d'une diode qu'est le plus simple de ces modèles car il ne nécessite pas de méthodes itératives pour sa résolution, mais donne des résultats acceptables, par contre on ne peut pas contrôler les données du modèle explicite

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les modélisations de module photovoltaïque et puis leur simulation se sont faite via le programme de MATLAB Simulink, en plus, on a vu la comparaison entre le modèle d'une diode et le modèle explicite, et nous avons conclu que le modèle explicite meilleur que le modèle d'une diode malgré qu'on ne puisse pas contrôler ses données, plus la simplicité du modèle d'une diode.

Chapitre III :
L'effet de poussière sur les
panneaux PV

III.1. Introduction

La poussière est constituée de matériaux divers — notamment fibres et débris fins — assez légers pour être mis en suspension dans l'air, ou plus généralement, de matériaux particuliers d'un diamètre inférieur à 500 micromètres. Les poussières peuvent poser des problèmes graves pour la santé des humains, des animaux et des plantes, mais aussi pour le fonctionnement des machines.

Les poussières sont éliminées de l'air intérieur par des aspirateurs, divers systèmes de filtres ou le procédé du cyclone.

Dans l'environnement extérieur la poussière provient de sources variées, naturelles et anthropiques, dont l'érosion du sol, les éruptions volcaniques, les tempêtes de sable ou de poussières, voire des embruns marins après les tempêtes. C'est l'un des composants de la pollution urbaine ou issue des cheminées et des pots d'échappement [28].

Dans ce chapitre, nous discuterons des problèmes causés par la salissure (poussière) et comparerons le fonctionnement des panneaux solaires nettoyer et sales.

III.2. Propriétés de la poussière

Les propriétés de la poussière jouent un rôle important dans son dépôt. Les propriétés physiques des particules déterminent la durée de leur voyage dans l'atmosphère. Par rapport aux particules plus grossières similaires, les particules plus fines ont un impact plus important sur les performances des panneaux photovoltaïques. Selon la nature des poussières, l'accumulation croissante de sable a tendance à former des amas et des couches supérieures de particules. Sous l'effet du vent, ces amas seront détruits mais se réinstalleront ensuite en surface, tandis qu'une seule couche de particules sera emportée de la surface par le vent. Les particules de sable rebondissent sur la surface du verre avant de se déposer, retardant ainsi la formation d'amas [29].

III.2.1. Effets de la diffusion de la poussière dans l'atmosphère sur l'efficacité du module PV

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il montre à quel point FISA (FAUCONNET Ingénierie SAS) s'est atténué. Ce phénomène est dû aux caractéristiques des ondes lumineuses dans le rayonnement solaire. Les molécules dans l'atmosphère peuvent l'absorber et être réfléchies par la vapeur d'eau et les molécules d'air, et la poussière et d'autres polluants sont renvoyés. La dispersion de poussière réduit la composante directe du rayonnement l'énergie solaire, et augmente ainsi la composante de rayonnement diffus.

L'atténuation du rayonnement dépend de la nature et de la quantité des polluants. Le rayonnement total reçu dans les zones urbaines est inférieur à celui des communautés rurales. La pluie et le vent peuvent réduire la concentration de particules en suspension dans l'atmosphère [29].

III.2.2 Effets du dépôt de poussière sur la transmittance lumineuse de la surface du module

La transmission de la lumière est définie comme le rapport de l'intensité de la lumière qui peut traverser une substance ou un échantillon à l'intensité de la lumière qui ne peut pas traverser. Contrairement à la poussière en suspension dans l'atmosphère, elle peut diffuser le rayonnement entrant, rediriger une partie de la composante diffuse entrante vers la lumière solaire ou l'absorber, réduisant ainsi l'intensité du rayonnement. Lumière (Extinction. Lumière). Entre autres facteurs, un système solaire photovoltaïque efficace dépend également du pourcentage de rayonnement solaire qui traverse le verre de protection et atteint la surface de collecte [29].

III.2.3. Effet poussière sur le module PV

Dans les applications liées à l'énergie solaire, le sable et la poussière sont des substances nocives dans la plupart des régions arides du monde. Lorsque les particules de ces substances tombent sur le module PV, elles réduisent la qualité de l'éclairage en atténuant et en diffusant la lumière incidente.

L'interférence de ces particules dépend de leur composition, de leur densité et de leur distribution granulométrique [29].

III.2.4. Ombrage partiel du panneau avec dépôt de poussière

En raison de la faible perméabilité, la poussière accumulée à la surface du panneau peut provoquer un ombrage partiel. Ce dernier est un phénomène, où l'éclairage de la cellule dans le tableau n'est pas uniforme. Le générateur photovoltaïque est composé de modules PV connectés en série et en parallèle pour répondre aux exigences de sortie. Cependant, la puissance de sortie totale est inférieure à la somme de la puissance nominale d'une seule unité.

L'une des raisons est l'effet d'ombrage partiel. Les cellules ombrées génèrent moins de courant que les cellules non ombrées. Les cellules non ombrées forcent la cellule ombrée à faire passer plus de courant, ce qui fait que les cellules ombrées fonctionnent avec une tension de polarisation inverse, entraînant une perte d'énergie du système. Toutes les unités ne peuvent pas

fonctionner au point de puissance maximum car le courant (pour les connexions en série) ou la tension (pour les connexions en parallèle) doivent être égaux pour tous les modules.

En raison de la non-concordance de puissance, les modules connectés en série ne peuvent avoir un courant aussi fort que le courant du module le moins performant de la matrice. La caractéristique électrique du réseau change d'avoir un maximum global en courbe P(V) pour avoir plusieurs maxima locaux, en raison d'un mécanisme de conduction compliqué entre les cellules partiellement ombragées et non ombragées et les diodes de by-pass [29].

III.2.5. Augmentation de la température du module en raison du dépôt de poussière

Les dépôts de poussière à la surface des panneaux PV peuvent provoquer des écarts de température. En utilisant une caméra de vision thermique, Doro bantu, Popes Cu a découvert que la surface poussiéreuse a une augmentation de température de 10 ° C par rapport à la surface propre.

L'augmentation de la température de la cellule solaire entraînera une légère augmentation du courant de court-circuit, mais une méthode ne peut pas diminuer la tension en circuit ouvert. Par conséquent, la puissance totale diminue avec l'augmentation de la température.[29]

III.2.6. L'impact de dépôt de poussière sur les modules photovoltaïques

Lorsque de la poussière tombe à la surface des panneaux photovoltaïques, l'impact de dépôt de poussière sur les modules photovoltaïques est montré en trois facteurs. Le premier est l'effet de blindage. Lorsque de la poussière s'accumule sur le couvercle en verre, la poussière recouvre la lumière irradiée vers le panneau PV, affaiblissant ainsi la transmission du couvercle en verre, réduisant ainsi la quantité de rayonnement solaire réellement reçue par le panneau PV. Le second est l'effet de température. La poussière sur le panneau PV peut provoquer un changement sous forme de transfert de chaleur. Le modèle de bilan thermique existant des modules PV est établi dans des conditions de sans poussière. Cependant, affecté par la poussière, le bilan thermique a changé dans les panneaux photovoltaïques effectivement mis en service, et lorsque le courant de fonctionnement de la cellule est inférieur au courant de fonctionnement du champ PV entière, la tension de la cellule se termine dans un état de polarisation inverse. Le troisième, au fil du temps, le verre de couverture constitué principalement de silice réagit avec les acides ou les bases. Ensuite, la surface du couvercle en verre devient inégale et la réflexion diffuse augmente. Détruisant ainsi l'uniformité de la

diffusion de la lumière solaire dans le couvercle en verre, affectant la capacité de production photovoltaïque [30].

III.3. Approche d'évaluation des performances du module PV

Les courbes caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ peuvent refléter l'état de fonctionnement des modules PV et constituent un indicateur important pour mesurer les performances de production d'énergie des modules PV. Les caractéristiques de sortie du PV ont des caractéristiques non linéaires et la sortie est affectée par le rayonnement solaire, la température ambiante et la charge. Seulement sous une certaine valeur de tension de sortie, la puissance de sortie du générateur PV peut atteindre la valeur maximale. À ce moment, le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque atteint le point le plus élevé (P_{max}) de la courbe de tension de puissance de sortie. Lorsque la surface PV accumule de la poussière, l'état de fonctionnement PV s'écarte du point de puissance maximal, entraînant une réduction de l'efficacité énergétique de sortie et une réduction des revenus du système de production d'électricité [30].

Les deux autres paramètres importants pour évaluer la performance photovoltaïque sont l'efficacité de conversion η et le facteur de forme (FF). L'efficacité de conversion est l'efficacité du module photovoltaïque pour convertir l'énergie solaire absorbée en électricité. C'est un facteur crucial dans l'évaluation des performances des cellules solaires. Il est lié à divers facteurs tels que les conditions d'ensoleillement, les matériaux, la température des particules, l'environnement de rayonnement et la température PV [30].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100\% \quad (\text{III.1})$$

Le FF est le rapport entre la puissance maximale de la cellule solaire et le produit de la tension en circuit ouvert et du courant de court-circuit, ce paramètre est très important pour évaluer les caractéristiques de sortie PV. Plus la valeur est élevée, plus les caractéristiques de sortie du PV sont proches du rectangle et plus l'efficacité de conversion photovoltaïque est élevée. La poussière peut affecter l'intensité lumineuse acceptable de la surface PV, qui à son tour affecte le FF. [30]

$$\text{FF} = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (\text{III.2})$$

Et les relations suivantes pour le calcul de rendement du module :

$$\eta_{module} = \frac{P_{max}}{G \times S} \quad (\text{III.3})$$

$$\% \text{ réduction de la puissance de sortie} = \frac{P_{nettoyer} - P_{sale}}{P_{nettoyer}} \times 100 \quad (\text{III.4})$$

$$\% \text{ réduction de rendement des modules} = \frac{\eta_{nettoyer} - \eta_{sale}}{\eta_{nettoyer}} \times 100 \quad (\text{III.5})$$

III.4. Partie expérimentale

Dans cette partie de travail on va présenter des résultats expérimentaux acquis à travers deux bancs d'essai installé au sein de l'URAER.

III.4.1. Données géographiques

Les données affichées dans le tableau III.1 sont des coordonnées géographiques représentatives au site de Ghardaïa.

Tableau III.1 : Coordonnées géographiques de la zone de Ghardaïa

| Site | Ghardaïa |
|---------------|----------|
| Latitude (°) | 32.4 3N |
| Longitude (°) | 3.8E |
| Altitude (m) | 468 |

L'un des objectifs de ce travail est l'étude expérimentale du module PV dans des conditions de fonctionnement réelles. Pour les essais sur terrain nous avons choisi un panneau solaire (multi- cristallin) que nous avons installé sur le toit de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER) à Ghardaïa. Des mesures expérimentales ont été effectuées en utilisant le panneau connecté au Solmetric 1(V) curve Tracer avec SolSensor. Il mesure les courbes courant-tension 1(V) des panneaux photovoltaïques et compare immédiatement les résultats aux prévisions des modèles PV intégrés.

- Deux modules PV (S = 0.699 m² pour chaque module) ;
- Charge électronique PVA 600 PV Analyser ;
- Système d'acquisition des données



Figure III.1 : Banc d'essais (URAER) : (1) modules PV, (2) Charge électronique (Solmetric I-V Curve Tracer), (3) centrale d'acquisition (Agilent 34970A) et PC.

Les résultats d'expérimentation pour chaque module utilisé sont montrés dans les figures III.2 - III.11 suivantes :

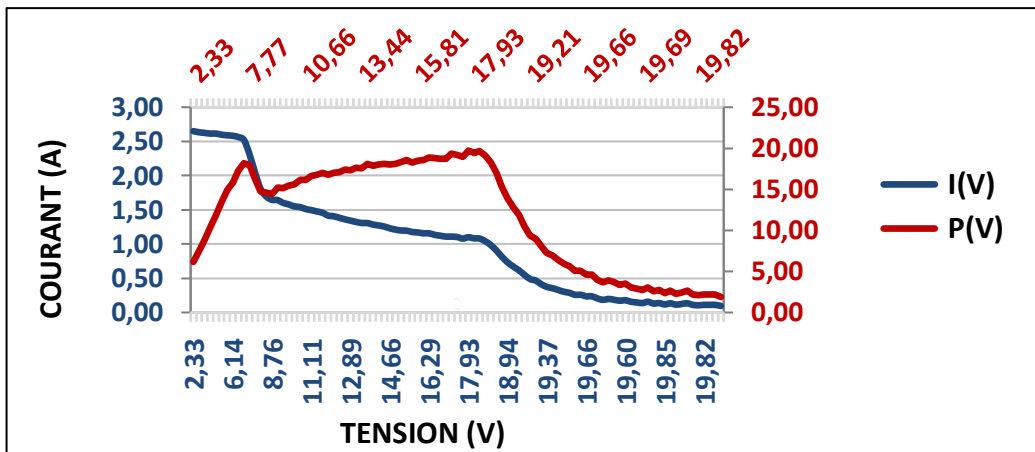


Figure III.2 : Les courbes I(V) P(V) de panneau haut avec : $G= 1020.54 \text{ W/m}^2$; $T= 40.51 \text{ C}^\circ$

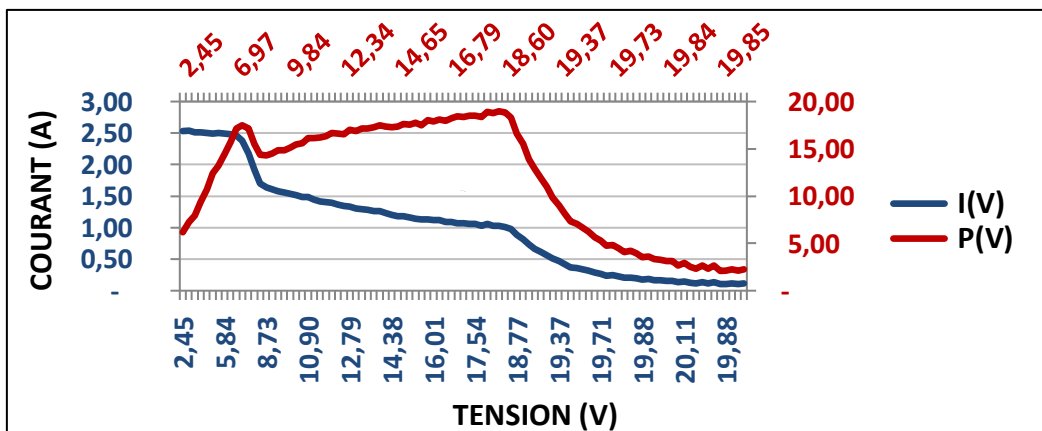


Figure III.3 : Les courbes I(V) P(V) de panneau haut avec : $G= 986.19 \text{ W/m}^2$; $T= 38.26 \text{ C}^\circ$

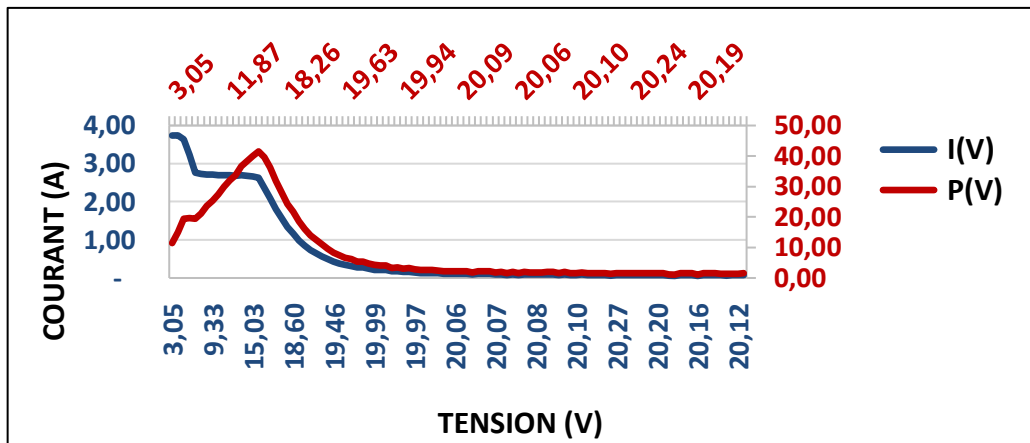


Figure III.4 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas : $G=963.16 \text{ W/m}^2$; $T= 37.22 \text{ C}^\circ$

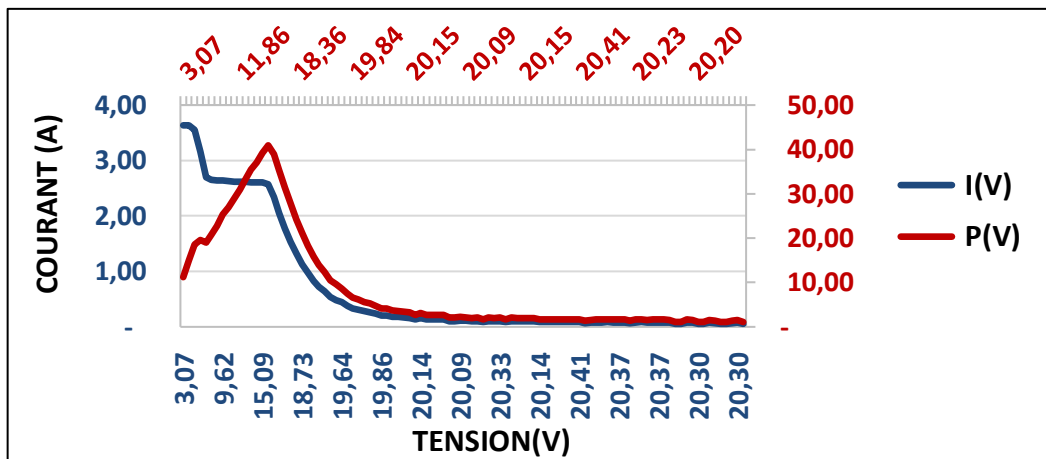


Figure III.5 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas : $G=984.55 \text{ W/m}^2$; $T= 38.70 \text{ C}^\circ$

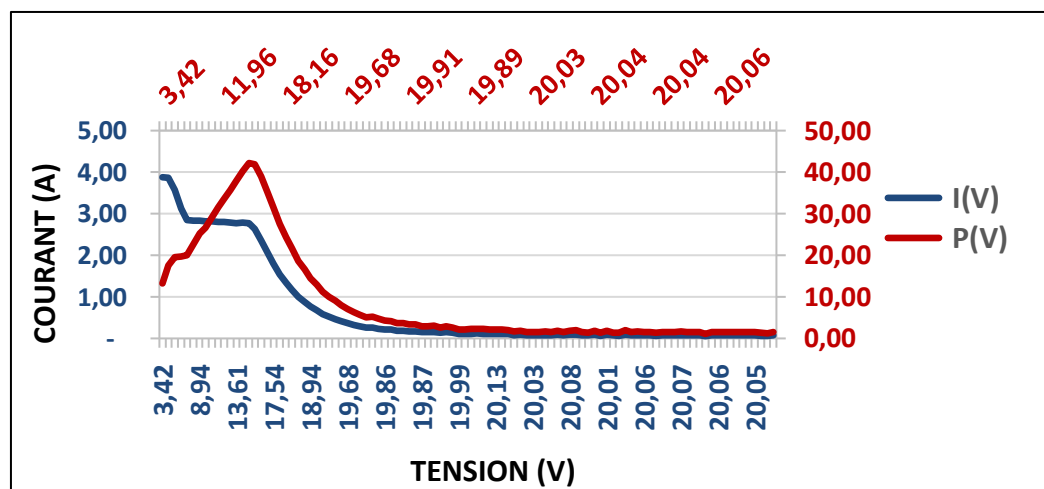
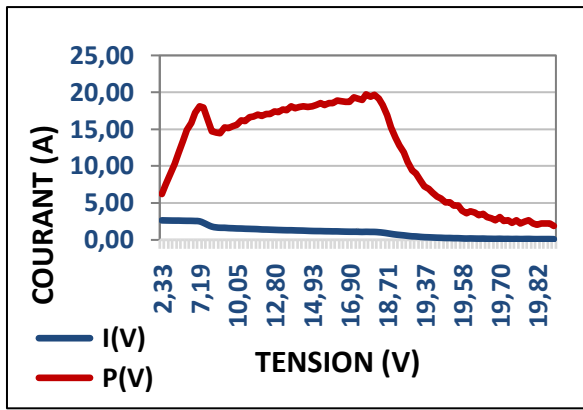
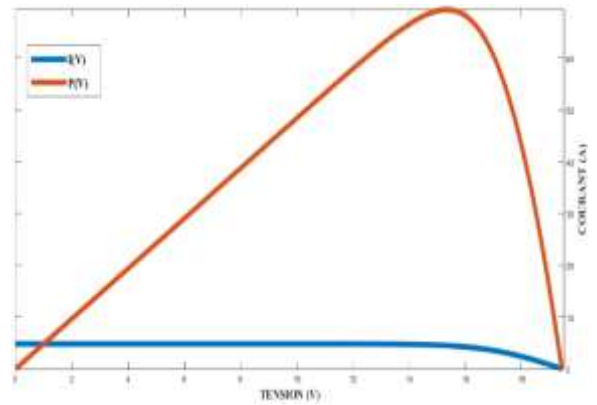


Figure III.6 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas : $G=1021.31 \text{ W/m}^2$; $T= 40.43 \text{ C}^\circ$

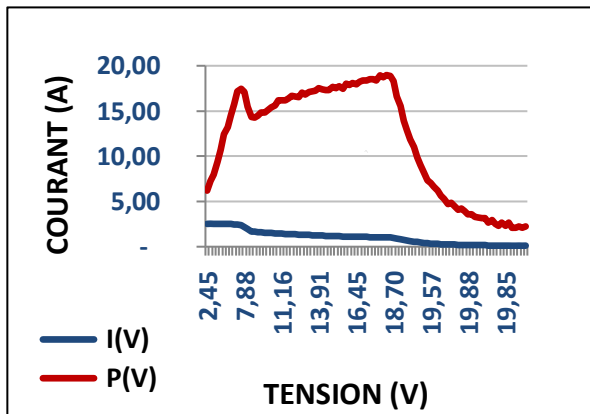


Cas sale

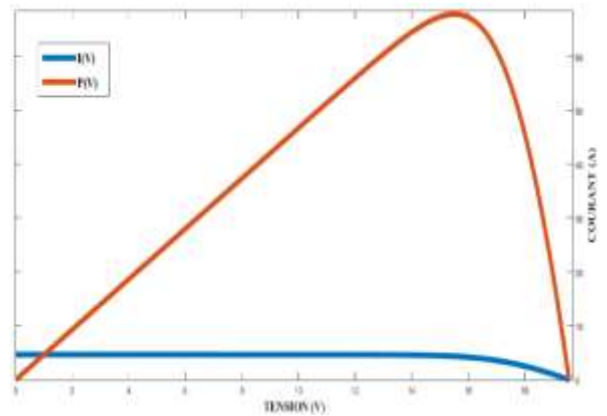


Simulé

Figure III.7 : Les courbes I(V) P(V) de panneau haut avec : $G= 1020.54$ W/m^2 ; $T= 40.51$ C° dans les deux cas

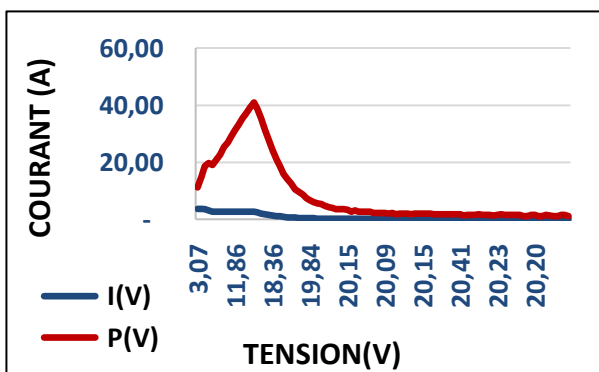


Cas sale

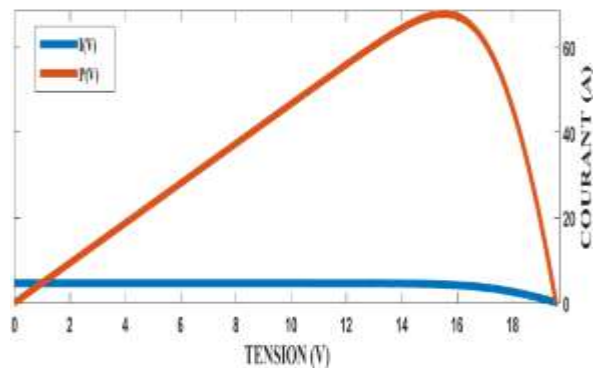


Simulé

Figure III.8 : Les courbes I(V) P(V) de panneau haut avec : $G= 986.19$ W/m^2 ; $T= 38.26$ C° dans les deux cas

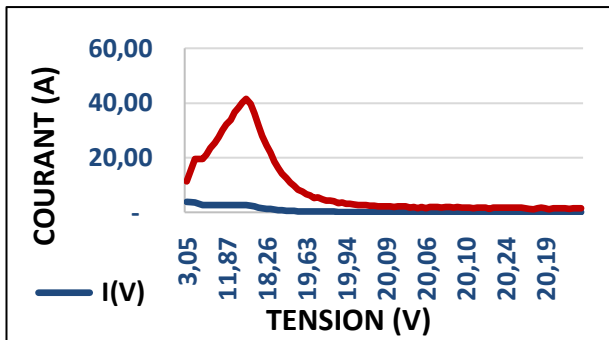


Cas sale

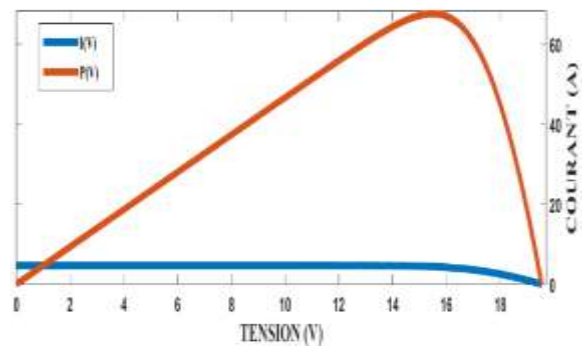


Simulé

Figure III.9 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas avec : $G= 963.13$ W/m^2 ; $T= 37.22$ C° dans les deux cas

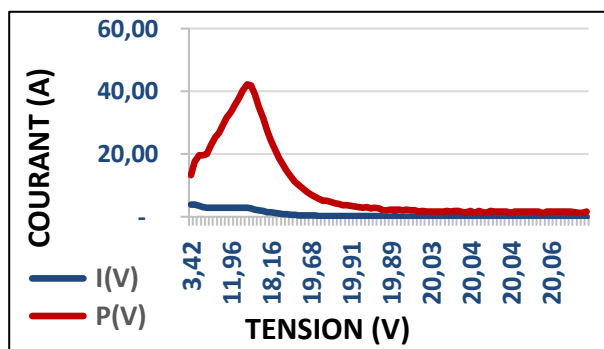


Cas sale

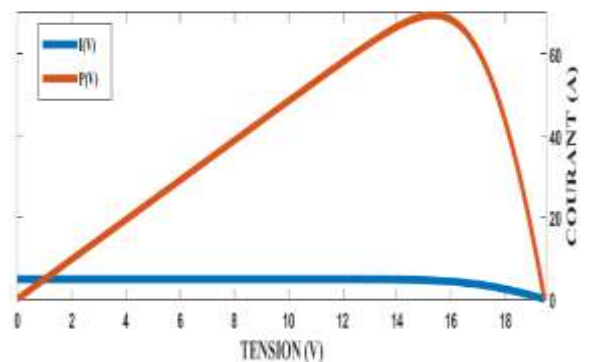


Simulé

Figure III.10 : Les courbes I(V) P(V) de panneau bas avec : $G= 984.55 \text{ W/m}^2$; $T= 38.70 \text{ C}^\circ$ dans les deux cas



Cas sale



Simulé

Figure III.11 : Les courbes I(V) P(V) de panneau haut avec : $G= 1021.31 \text{ W/m}^2$; $T= 40.43 \text{ C}^\circ$ dans les deux cas

Dans ces courbes, nous pouvons observer les résultats de simulation pour les deux modules solaires (hot et bas) avec des températures et éclairagements différents, et bien sûr, les résultats seront différents dans les courbes ci-dessus, en ce qui concerne la tension, l'intensité du courant et la puissance, et c'était dans les figures : III.2; III.3; III.4; III.5; III.6; Dans lequel nous avons utilisé des axes secondaires, comme le montre celui-ci.

Bien entendu, on constate à travers elle que plus la température augmente, plus la puissance atteignait rapidement son pic et à une valeur supérieure, pour redescendre directement à zéro rapidement, surtout si le pourcentage d'accumulation de sable sur le module augmentait. En ce qui concerne le module haut le moins sale, la puissance persiste entre augmentation et diminution jusqu'à ce qu'elle atteigne un pic puis diminue rapidement, mais elle ne disparaît pas, contrairement au module bas le plus sale qui, après avoir atteint le pic, diminue plus rapidement jusqu'à disparaître plus tôt.

En ce qui concerne le courant, dans le module haut sa valeur initiale augmente au fur et à mesure que la température et l'éclairage montent pour commencer à diminuer progressivement sans

s'absenter. Dans le module bas, la valeur initiale du courant est élevée par rapport à le module haut et elle est presque très proche dans chaque expérience, pour commencer à décliner rapidement jusqu'à ce qu'il disparaisse têt, bien sûr sa relation est également directe avec l'augmentation de la chaleur et de l'éclairement, mais le pourcentage d'accumulation de sable augmente, ce qui provoque une augmentation plus importante de la chaleur.

Dans les figures : III.7; III.8; III.9; III.10; III.11, nous avons discuté de la comparaison entre les résultats de notre expérience avec les résultats de simulation pour des modules nettoyés. Ce qui nous apparaît dans toutes les courbes de résultats de simulation est que le courant est dans une légère tendance à la hausse jusqu'à ce qu'il se rapproche de ce qui s'est passé dans l'expérience que nous avons menée car elle part directement d'une certaine valeur et continue de descendre jusqu'à zéro.

Quant à la puissance, elle atteint rapidement son maximum car la chaleur ne l'affecte qu'à hauteur de ce qu'il y a à l'intérieur de la cellule photovoltaïque et l'éclairement est bien absorbé par les cellules PV, contrairement au module sale dans laquelle cette chaleur s'ajoute à la chaleur de la cellule photovoltaïque, ce qui peut provoquer l'accumulation de sable pour l'augmenter, de plus, l'éclairement est diminué et mal absorbé.

Tableau III.2 : Résultat mathématique

| | $\Delta P = \frac{P_n - P_s}{P_n} \times 100$ | $\Delta V_{mpp} = \frac{V_{mpp_n} - V_{mpps}}{V_{mpp_n}} \times 100$ | $\Delta I_{mpp} = \frac{I_{mpp_n} - I_{mpps}}{I_{mpp_n}} \times 100$ | $\Delta V_{oc} = \frac{V_{oc_n} - PV_{oc_s}}{V_{oc_n}} \times 100$ | $\Delta I_{sc} = \frac{I_{sc_n} - I_{sc_s}}{I_{sc_n}} \times 100$ | $\eta = \frac{\eta_n - \eta_s}{\eta_n} \times 100$ |
|--|---|--|--|--|---|--|
| Haut : G=1020.54 T=40.51 C° | 72.33 % | 21.72 % | 77.33 % | 1.9 % | 45.25 % | 72.16 % |
| Haut : G=986.19 T=38.26 C° | 52.83 % | 52.83 % | 80.96 % | 1.74 % | 45.61 % | 70.41 % |
| Bas : G=963.16 T=37.22 C° | 39.70 % | 2.18 % | 39.95 % | 2.5 % | 20.17 % | 39 % |
| Bas : G=984.55 T=38.70 C° | 38.54 % | 2.9 % | 40.37 % | 2.61 % | 19.90 % | 38.77 % |
| Bas : G=1021.31 T=40.43 C° | 38.98 % | 0.84 % | 39.47 % | 2.37 % | 19.83 % | 39.17 % |

Nous avons remarqué mathématiquement à partir de tableau ci-dessus que le plus grand influence chaque fois était dans l'intensité de courant I_{mpp} , et surtout dans le panneau haut le plus sale (plus 77 %), même l'influence dans le rendement était plus de 70 %, par rapport le panneau bas le moins sale la plus grande influence aussi était dans l'intensité mais moins de 41 % ainsi que l'influence de rendement.

III.5. Conclusion

Nous avons constaté d'après les tests l'impact de la poussière sur les performances des modules photovoltaïques, et nous avons noté mathématiquement qu'il existe une différence significative, en particulier en termes de l'intensité et de la puissance, avec connaissance de l'influence sur le rendement des modules. De plus, l'accumulation de sable sur les modules PV affecte négativement les performances de ces modules, par une augmentation anormale de la chaleur qui affecte les cellules photovoltaïques et provoque un déséquilibre dans leurs performances et affecte ainsi les résultats, en plus de réduire le pourcentage d'éclairement reçu par les cellules, ce qui conduit à des résultats médiocres et insignifiants, contrairement aux modules nettoyés (simulés), qui ont de bonnes performances et de bons résultats, et nous avons vérifié que dans les courbes précédents et aussi par des calculs mathématiques.

Conclusion générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire de Master nous a permis de bien comprendre le principe du photovoltaïque consistant en l'exploitation de l'énergie solaire.

L'objectif de ce travail est consacré à étudier l'impact de salissure sur les performances des modules photovoltaïques.

L'accumulation de la poussière sur les panneaux solaires peut être causée par le vent et les fluctuations météorologiques attendues et inattendues. Elle a également un impact significatif sur les performances des panneaux photovoltaïques.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le système PV (gisement solaire, les cellules, les modules PV et leurs composants...etc.). On a parlé aussi sur les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.

Dans le deuxième chapitre via le programme de MATLAB Simulink nous avons simulé les modèles de cellules photovoltaïques, nous avons également comparé entre les deux modèles (une diode et explicite).

Dans le dernier chapitre, nous avons observé l'influence de la salissure sur les modules PV, et nous avons noté mathématiquement qu'il existe une différence significative dans l'intensité, la puissance et le rendement.

Le système solaire PV dépend du pourcentage de rayonnement solaire qui traverse le verre de protection, mais la poussière peut rediriger ou absorber une partie des composants du rayonnement, ce qui signifie que l'intensité du rayonnement est réduite.

Le sable et la poussière sont des substances nocives qui diffusent et réduisent le degré de lumière incidente lorsqu'elle tombe sur l'unité photovoltaïque, selon sa composition et son intensité.

La poussière accumulée provoque un ombrage partiel, ce qui entraîne une puissance de sortie totale inférieure à la somme de la puissance nominale individuelle par unité, les cellules ombrées produisent moins de courant que les cellules non ombrées.

Le dépôt de poussière à la surface des panneaux photovoltaïques diminue la puissance, l'intensité et le rendement, par l'augmentation anormale de la chaleur causée par l'accumulation de sable des panneaux photovoltaïques, ce qui affecte négativement les cellules photovoltaïques et leurs performances, en plus de réduire le pourcentage d'éclairement reçu par les cellules, ce qui conduit à des résultats médiocres et insignifiants par rapport aux résultats des panneaux solaires nettoyés (simulés)

Notre travail pourrait être poursuivi sous différents aspects, et étant donné que nous n'avons pas pu faire les tests sur un module PV propre (modélisé le module PV propre par simulation). Il serait pertinent compléter cette étude et faire les tests expérimentaux en même temps sur un module PV propre et sale.

Bibliographie

[1] Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque » Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, Septembre 2015.

[2] HANANOU FATIHA, ROUABAH AICHA « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2013-2014.

[3] Hamid Chohraoui & Ratiba Hadbi « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau » mémoire de master 2, 14 juin 2016 TLEMCEM

[4] Salim ARAB & Dalila TOUDERT « Etude d'un Système Photovoltaïque » mémoire de master académique, université Mouloud Mammeri 25/09/2017 TIZI-OUZOU

[5] <https://trustmyscience.com/details-inedits-structure-couronne-solaire>

[6] A. Maafi, « A survey on PV activities in Algeria ». Renewable Energy, 2000.

[7] <https://boiscorde.weebly.com/solaire---notions-de-base.html>

[8] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Latitude_and_Longitude_of_the_Earth.svg

[9] F. Yettou & A. Gama & A. Malek & B. Azoui & C. Larbès « Etude et conception d'un logiciel de calcul de l'éclairage solaire en Algérie destiné aux systèmes à concentration solaires » Article 27 mars 2011

[10] <https://passivact.fr/Concepts/files/Bioclimatisme-TrajectoiresSolaires.html>

[11] https://www.researchgate.net/figure/Variation-de-lazimut-solaire-en-fonction-du-temps_fig11_261287245

[12] <https://www.greelane.com/fr/science-technologie-math%C3%A9matiques/science/the-compton-effect-in-physics-2699350>

[13] https://fr.wikipedia.org/wiki/Jonction_p-n#Dopage

- [14] <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/les-differents-types-de-cellules-photovoltaïques>
- [15] Lemdak Kaima, Kiouas Nabila, « Simulation et Etude expérimentale d'un système PV au milieu aride », mémoire de master, université de Ghardaïa 2019
- [16] https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaïques
- [17] <https://www.pv-magazine.fr/2020/02/26/une-cellule-tandem-perovskite-dopee-au-graphene-atteint-un-rendement-de-263/>
- [18] <https://www.ecolodis-solaire.com/panneaux-cigs-175/p3-solar-cigs-20wc-3148>
- [19] Kraoua Brahim, « Etude comparative des régulateurs de charge pour l'optimisation de l'énergie photovoltaïque », mémoire de master, université de Ghardaïa 2020
- [20] Mechouma Rabiaa, « Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques : Applications pour les charges commerciales », thèse de doctorat, université Hadj Lakhdar – Batna 2015
- [21] AOUN Nouar, « Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales » Mémoire De Magister, UNIVERSITE MENTOURI - CONSTANTINE 2010
- [22] <https://fr.renogy.com/modules-pv/>
- [23] <http://conseilsolaire.online/batteries-solaires>
- [24] Azeddine Houari « Contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques » thèse Présentée à L'Université de Lorraine En vue de l'obtention du grade de DOCTEUR de l'Université de Lorraine ; Spécialité : Génie Electrique 07/12/2012
- [25] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [26] <https://www.encyclopedie-energie.org/lenergie-solaire-photovoltaïque-pv-une-filiere-competitive-en-site-isole/>
- [27] KEHOUL Nassim, KHENTACHE Kamal « Etude comparative des modèles d'une cellule photovoltaïque » mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia 2012
- [28] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Poussi%C3%A8re>

[29] Fardila Mohd Zaihidee, Saad Mekhilef, Mehdi Seyedmahmoudian, Ben Horan « Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how » Faculty of Technical and Vocational Education, Sultan Idris Education University, 35900 Tanjung Malim, Perak, Malaysia - Department of Electrical Engineering, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia - School of Engineering, Deakin University, Waurn Ponds, VIC, 3216, Australia

[30] Yingya Chen, Yanfeng Liu, Zhijun Tian, Yu Dong, Yong Zhou, Xiaowen Wangun B, Dengjia Wang « Experimental Study on the Effect of Dust Deposition on Photovoltaic Panels» 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), 22-25 August 2018, Hong Kong, China