

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



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

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Electrotechnique Industrielle**

*Présenté par*

**Ourida MEZINE  
Nouara SLAMANI**

Thème

## **Evaluation des performances d'un système photovoltaïque dans un environnement critique**

*Mémoire soutenu publiquement le 29/06/2024 devant le jury composé de :*

**Mr Chafik BIROUCHE**

Maître Assistant classe A, U.M.M.T.O, Président

**Mme Zehor MOHELLEBI Epouse OUDNI**

Maître de conférences classe A, U.M.M.T.O, Encadreur

**Mr Arezki DICHE**

Maître Assistant classe A, U.M.M.T.O, Examineur



## Remerciements

Nous sommes honorées d'avoir été encadrées par Madame **MOHELLEBI Epse OUDNI Zehor** MCA au département d'Electrotechnique, Faculté de Génie Electrique et Informatique, dont la passion pour la recherche et l'enseignement a illuminé chaque étape de ce mémoire. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude pour son soutien constant et son engagement sans relâche dans la réussite de ce projet. Sa patience, sa persévérance et sa bienveillance ont été des piliers sur lesquels nous avons pu nous appuyer.

Nous exprimons notre profonde gratitude envers Monsieur **BIROUCHE Chafik**, Président du jury, pour sa précieuse guidance et son rôle inspirant pendant notre soutenance. Sa présence a apporté une dimension d'autorité et d'excellence à notre présentation.

Nous exprimons notre gratitude envers Monsieur **DICHE Arezki**, Examineur, pour son temps, son expertise. Son évaluation nous ont permis de progresser et d'améliorer notre travail.

Nous remercions enfin tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à l'accomplissement de ce modeste travail.



# Dédicaces 1

Pour mes compagnons de vie, ceux qui ont été mes confidents les plus fidèles, mes épaules sur lesquels pleurer et mes plus grands supporters, ce travail est offert avec un cœur rempli d'amour et de reconnaissance infinie :

À **ma mère**, toi qui as toujours été là, de mes premiers pas à mes accomplissements, je te remercie pour ton amour inconditionnel et ta présence réconfortante. Que Dieu te garde en santé, bonheur et paix intérieure, et que je puisse toujours être à la hauteur de ton amour

À **mon père**, pilier de ma vie, ton amour inconditionnel a illuminé chacune de mes journées. Je te suis profondément reconnaissant pour ta présence constante et ton soutien sans faille.

Que Dieu te bénisse avec une santé florissante, une longue vie emplie de bonheur, et que je puisse honorer ton héritage avec fierté et détermination

À mon seul et cher **frère** et à mes chères **sœurs**, je vous remercie du fond du cœur pour votre amour, votre soutien et vos encouragements inestimables qui ont enrichi ma vie d'une manière indescriptible

À **ma nièce** chérie et à **mes neveux** bien-aimés, témoignant de leur précieuse place dans mon cœur

À tous les membres de ma famille

A tous mes chers **amis**, avec qui j'ai partagé tant de bons moments, témoins de mes rires, gardiens de mes secrets

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime

Qui, sans eux, je n'aurais pu aboutir à ce stade d'étude.

Que Dieu puisse m'aider à les honorer, les servir et les combler, un jour et pour toujours...





## Dédicaces 2

Avec plein de respect et d'amour je dédie ce modeste travail a ...

A ma **mère**, je te remercie infiniment d'être toujours présente pour moi, avec ton amour inconditionnel, tes encouragements constants et ton soutien qui ont illuminé chaque étape de ce parcours. Tes précieux conseils et ta bienveillance sont pour moi des rayons de lumière qui guident ma vie.

À mon cher **père**, que Dieu ait pitié de toi. Tes conseils et tes mots restent gravés dans mon esprit et continuent de me guider.

À mes **sœurs** bien-aimées et à leurs **époux**, votre soutien et votre encouragement ont été des piliers indispensables dans ma vie. Vous m'avez apporté force et réconfort à chaque étape de mon parcours.

À mes deux chers **frères**, je vous adresse ma profonde gratitude pour votre présence à mes côtés.

Pour ma **belle-sœur**, merci pour ta précieuse présence et ton soutien constant. Tes encouragements et ta gentillesse

À mes merveilleux petits **neveux** et **nièces**, chaque instant passé avec vous est un trésor

Inestimable dans mon cœur.

Merci à mon fiancé **Aymen** d'être à mes côtés, Tes encouragements ont été une source précieuse de motivation et de force.

Merci à ma meilleure amie **Amel** pour ta présence et ton encouragement constants.

Je vous remercie infiniment pour votre constante présence à mes côtés.

SLAMANI NOUARA



## Résumé

L'efficacité de la production d'énergie solaire photovoltaïque (PV) est fortement influencée par diverses conditions environnementales, opérationnelles et liées au processus de fabrication. Ces conditions peuvent entraîner une multitude de défauts qui provoquent la dégradation des générateurs PV. Dans la littérature récente, de nombreuses méthodes ont été développées pour aborder ces problèmes. Dans ce contexte, il est essentiel de comprendre les différents types de défauts, leurs causes et leurs impacts sur les performances des systèmes PV. Pour cela, il est important de recenser les articles traitant de ces sujets, de passer en revue les méthodes de supervision et de diagnostic des systèmes photovoltaïques, et de simuler certains défauts pour mieux comprendre leur comportement et évaluer l'efficacité des méthodes de diagnostic proposées.

**Mots-clés :** L'énergie solaire photovoltaïque, générateur PV, défauts, performances des systèmes PV, diagnostic des systèmes.

---

## Abstract

The efficiency of photovoltaic (PV) solar energy production is significantly influenced by various environmental, operational, and manufacturing process conditions. These conditions can lead to a multitude of defects that degrade PV generators. In recent literature, numerous methods have been developed to address these issues. In this context, it is crucial to understand the different types of defects, their causes, and their impacts on PV system performance. To achieve this, it is necessary to review articles on these topics, assess supervision and diagnostic methods for photovoltaic systems, and simulate certain defects to better comprehend their behavior and evaluate the effectiveness of proposed diagnostic methods.

**Keywords :** Photovoltaic solar energy, generator PV, defects, Performance of PV systems, diagnosis of photovoltaic systems.

## Liste des Abréviations

H	Constante de planck ( $6,62.10^{-34}$ J.s)
$R_s$	Résistance série $\Omega$
$R_{sh}$	Résistance shunt $\Omega$
T	Température de la cellule (K)
$I_{sc}$	Courant de court-circuit (A)
$V_{oc}$	Tension en circuit ouvert (V)
P	Puissance (W)
I	Courant (A)
V	Tension (V)
$P_{max}$	Puissance maximale délivrée par le module PV (W)
$P_{in}$	La puissance lumineuse incidente
$I_{mp}$	Courant au point de puissance maximal (A)
$V_{mp}$	Tension au point de puissance maximal (V)
G	Éclairement ( $W/m^2$ ),
FF	Facteur de forme (%)
$N_p$	Nombre de modules connectés en parallèle
$N_s$	Nombre de modules connectés en série PV
PV	Photovoltaïque
AFNOR	L'Association Française de Normalisation
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
IA	Intelligence artificielle
ANN	Réseau de neurone artificiel
SVM	Machines à vecteurs supports
KNN	K Nearest neighborhood
GPV	Générateur Photovoltaïques
SKTM	Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadiada
FT	Facteur de transposition
S	Surface de la cellule PV ( $m^2$ )
$\eta$	Rendement

# Tables des matières

**Remerciements**

**Dédicace 1**

**Dédicace 2**

**Résumé**

**Liste des abréviations**

**Tables des matières**

**Liste des figures**

**Liste des Tableaux**

**Introduction générale ..... 1**

**Chapitre I : Etat de l'art des centrales photovoltaïques et leurs différentes technologies**

**I.1 Introduction ..... 3**

Partie 1 : Systèmes photovoltaïques ..... 3

I.2 Ressource et rayonnement solaire ..... 3

I.3 Gisement solaire de l'Algérie ..... 3

I.4 La conversion photovoltaïque ..... 4

I.4.1 Principe de la conversion photovoltaïque ..... 4

I.5 Cellule photovoltaïque ..... 6

I.5.1 Principe de fonctionnement des cellules PV ..... 6

I.5.2 Différents types de cellules solaires ..... 7

I.5.3 Association des cellules PV ..... 8

I.6 Modules photovoltaïques ..... 10

I.7 Champ photovoltaïque ..... 10

I.8 Système photovoltaïque ..... 11

I.8.1 Type de systèmes photovoltaïque ..... 12

I.8.2 Protection des systèmes solaires photovoltaïques ..... 13

I.9 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque ..... 13

I.9.1 Principaux avantages de l'énergie photovoltaïque..... 14

I.9.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque ..... 14

Partie 2 : Centrales photovoltaïques ..... 14

I.10 Centrale solaire photovoltaïque ..... 14

I.10.1 Centrales photovoltaïques en Algérie ..... 15

I.10.2 Les critères de choix d'une centrale photovoltaïque ..... 16

I.11 Eléments de l'installation photovoltaïque ..... 16

I.11.1 Production d'énergie (Panneaux photovoltaïques) .....	17
I.11.2 Stockage de l'énergie .....	18
I.11.3 Système de régulation - contrôleur de charge .....	20
I.11.4 Système de conversion .....	21
I.12 Avantages et inconvénients d'une installation PV .....	22
I.12.1 Avantages .....	22
I.12.2 Inconvénients .....	22
I.13 Conclusion .....	23
<b>Chapitre II : Description du fonctionnement des centrales photovoltaïques dans un environnement saharien</b>	
<b>II. 1 Introduction .....</b>	<b>24</b>
II.2 Défaut .....	24
II.3 Défauts des panneaux photovoltaïques.....	24
II.3.1 Défaut de mis match et l'effet d'ombrage .....	25
II.3.2 Défaut de la terre .....	25
II.3.3 Bulles d'air .....	26
II.3.4 Défaut d'arc électrique .....	26
II.3.5 Défaut d'augmentation de la résistance série ( $R_s$ ) .....	27
II.3.6 Défaut de diminution de la résistance parallèle ( $R_{sh}$ ).....	27
II.3.7 Défauts de la diode de by-pass et la diode anti-retour.....	27
II.3.7.1 Défaut de circuit ouvert .....	28
II.3.7.2 Défaut de court-circuit.....	28
II.4 Propriétés de la poussière .....	29
II.4.1 Effet du vent de sable sur les panneaux photovoltaïques .....	30
II.4.2 Effet du vent de sable sur l'éclairement solaire .....	30
II.4.3 Augmentation de la température du module en raison du dépôt de poussière .....	31
II.4.4 L'effet du vent de sable sur la durée de vie des panneaux photovoltaïques .....	31
II.4.5 Particules de sables sur la surface du panneau .....	32
II.5 L'impact de dépôt de poussière sur les modules photovoltaïques .....	33
II.6 Approche d'évaluation des performances du module PV .....	34
II.7 Conclusion .....	35
<b>Chapitre III : Méthodologie pour diagnostic des centrales photovoltaïque</b>	
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>36</b>
III.2 Système de diagnostic .....	36
III.3 Etapes du diagnostic .....	36

III.3.1 Acquisition des données .....	36
III.3.2 Détection .....	36
III.3.3 Localisation .....	37
III.3.4 Identification .....	37
III.3.5 Prise de décision .....	37
III.5 Performance d'une procédure de diagnostic .....	37
III.4.1 Déteçtabilité .....	38
III.4.2 Isolabilité .....	38
III.4.3 Sensibilité .....	38
III.4.4. Robustesse .....	38
III.5 Architecture de diagnostic .....	38
III.6 Méthodes de diagnostic d'une installation PV .....	39
III.6.1 Méthodes de diagnostics courants industrialisés .....	39
III.6.2 Méthodes dans la littérature .....	41
III.7 Méthodes de classification supervisée pour la détection et le diagnostic .....	44
III.7.1 Les séparateurs à vaste marge .....	45
III.7.2 Les k plus proches voisins .....	46
III.7.3 Les arbres de décision .....	47
III.7.4 Les réseaux de neurones .....	47
III.8 Choix d'un classifieur pour la surveillance des procédés .....	49
III.9 Conclusion .....	50
<b>Chapitre 4 : Application au diagnostic et résultats</b>	
<b>IV.1 Introduction .....</b>	<b>51</b>
IV.2 Outils et Matériels .....	51
IV.3 Simulation d'un Système Photovoltaïque .....	51
IV.3.1 Choix et caractérisation du module photovoltaïque numéro 1 .....	52
IV.3.2 Choix et caractérisation du module photovoltaïque numéro 2 .....	56
IV.4 Comparaison de deux modules PV .....	60
IV.5 Simulation des différents défauts d'un système PV .....	60
IV.5.1 Défaut d'ombrage .....	61
IV.5.2 Défaut de diode by-pass court-circuitée .....	62
IV.5.3 Défaut de dégradation .....	64
IV.6 Courbes de différents types de défauts d'un système PV .....	67
IV.7 Conclusion .....	68

<b>Conclusion générale .....</b>	<b>69</b>
<b>Références bibliographiques</b>	

## Liste des figures

### CHAPITRE I

Figure I.1 : La moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée (1992-2002) .....	4
Figure I.2 : Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque .....	5
Figure I.3 : Exemple de semi-conducteur .....	6
Figure I.4 : Schéma d'une cellule PV .....	6
Figure I.5 : Cellules mono-cristallines.....	7
Figure I.6 : Cellules poly-cristallines.....	8
Figure I.7 : Cellule amorphe.....	8
Figure I.8 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de Ns cellules en série .....	9
Figure I.9 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de Ns cellules en parallèle .....	10
Figure I.10 : Un champ photovoltaïque.....	11
Figure I.11 : Schémas synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général .....	11
Figure I.12 : Protection par diodes en série .....	13
Figure I.13 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage .....	16

### CHAPITRE II

Figure II.1 : (A) défaut de terre, (B) arc série, (C) arc parallèle .....	26
Figure II.2 : Défauts de la diode de by-pass.....	28
Figure II.3 : Photographie de modules PV propres et poussiéreux.....	29
Figure II.4 : Micrographie optique montrant les formes irrégulières des particules de sable.....	30
Figure II.5 : Photo de panneaux photovoltaïques endommagés par un vent de sable.....	32
Figure II.6 : Accumulation de particule de sable sur un module .....	32
Figure II.7 : Écoulement du courant dans les cellules PV avec diodes de by-pass pour les cellules occultées .....	33

### CHAPITRE III

Figure III.1 : Organigramme de diagnostic des défauts .....	37
Figure III.2 : Schéma global de détection et de diagnostic des défauts .....	39
Figure III.3 : Exemple de la localisation de défauts par la caméra thermique .....	40
Figure III.4 : Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV .....	42
Figure III.5 : Allure d'une caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant..	43
Figure III.6 : Exemple de frontières de classes .....	44
Figure III.7 : Séparation des données par l'hyperplan H .....	45

Figure III.8 : Exemple d'une attribution avec la règle des 3 plus proches voisins.....	46
Figure III.9 : Exemple d'un arbre de décision .....	47
Figure III.10 : Un neurone artificiel .....	48
Figure III.11 : Les différentes fonctions d'activation h : (a) fonction à seuil, (b) fonction linéaire, (c) fonction sigmoïde, (d) fonction gaussienne .....	48

## CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Schéma bloc d'un système PV.....	51
Figure IV.2 : Caractéristique I (V) du module PV .....	53
Figure IV.3 : Caractéristique P (V) du module PV .....	53
Figure IV.4 : Caractéristique I = f (V) du module PV .....	54
Figure IV.5 : Caractéristique P = f (V) du module PV .....	54
Figure IV.6 : Caractéristique I = f (V) du module PV .....	55
Figure IV.7 : Caractéristique P = f (V) du module PV.....	55
Figure IV.8 : Caractéristique I (V) du module PV.....	57
Figure IV.9 : Caractéristique P (V) du module PV .....	57
Figure IV.10 : Caractéristique I = f (V) du module PV .....	58
Figure IV.11: Caractéristique P = f (V) du module PV .....	58
Figure IV.12 : Caractéristique I = f (V) du module PV.....	59
Figure IV.13 : Caractéristique P = f (V) du module PV.....	59
Figure IV.14 : Schéma fonctionnel d'une chaîne photovoltaïque qui se compose de 3 modules PV connectés en série .....	61
Figure IV.15 : Caractéristique I-V pour différents % d'ombrage.....	61
Figure IV.16 : Caractéristique P-V pour différents % d'ombrage.....	62
Figure IV.17 : Schéma de simulation d'un défaut de diode by-pass court-circuitée.....	62
Figure IV.18 : Caractéristique I-V avec défaut de court-circuit.....	63
Figure IV.19 : Caractéristique P-V avec défaut de court-circuit.....	63
Figure IV.20 : Schéma de simulation d'un défaut de Résistance Série (Rs).....	64
Figure IV.21 : Caractéristique I-V avec l'augmentation de la résistance série (Rs).....	64
Figure IV.22 : Caractéristique P-V avec l'augmentation de la résistance série (Rs).....	65
Figure IV.23 : Schéma de simulation d'un défaut de la Résistance parallèle (Rsh).....	65
Figure IV.24 : Caractéristique I-V avec la diminution de la résistance shunt (Rsh).....	66
Figure IV.25 : Caractéristique P-V avec la diminution de la résistance shunt (Rsh).....	66
Figure IV.26 : Caractéristique I-V des différents défauts d'un système PV.....	67
Figure IV.27 : Caractéristique I-V des différents défauts d'un système PV.....	67

## **Liste des Tableaux**

Tableau I.1 : Développement des centrales PV au niveau Nationale .....	15
Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients des différents types de batterie .....	19
Tableau II.1 : Impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule .....	25
Tableau III.1 : Tableau comparatif des différents classifieurs .....	49
Tableau IV.1 : Caractéristiques du module PV Canadien Solar CS6P-255P .....	52
Tableau IV.2 : Caractéristiques du module PV S-Energy SN255P-10.....	56
Tableau IV.3 : Comparaison entre les deux modules de panneaux PV .....	60
Tableau IV.4 : Cas de défauts d'ombrage simulés.....	61



# Introduction Générale

## Introduction Générale

Dans l'immensité infinie de l'univers, le soleil brille telle une source intarissable d'inspiration et de prospérité. Sa lumière nourrit notre monde, offrant un spectacle céleste dont les effets se dévoilent à chaque aube. Au cœur de cette symphonie cosmique réside une technologie sophistiquée : le photovoltaïque. Comme un enchanteur des temps modernes, il capture les rayons solaires pour les métamorphoser en une énergie pure et inépuisable. Ainsi se profile devant nous un chemin lumineux vers un futur énergétique durable et renouvelable.

Les systèmes photovoltaïques ont évolué pour devenir des acteurs incontournables dans le paysage énergétique mondial. Leur application s'étend des zones rurales les plus reculées aux centres urbains les plus densément peuplés, offrant une source d'énergie propre et fiable. Que ce soit pour répondre aux besoins énergétiques domestiques, éclairer les rues, alimenter les infrastructures médicales essentielles ou encore soutenir les télécommunications, ces systèmes offrent une solution polyvalente et adaptable.

L'Algérie, avec son vaste territoire saharien, se trouve être un pays abondamment pourvu en ressources solaires. Les chercheurs envisagent d'exploiter pleinement cette richesse naturelle, positionnant ainsi notre nation comme l'un des leaders mondiaux potentiels dans l'exportation d'énergie électrique solaire.

Les systèmes photovoltaïques fonctionnent en continu sous diverses conditions climatiques, ce qui peut entraîner des défauts dans les panneaux, tels que les circuits ouverts, les courts-circuits, la dégradation et l'ombrage. Ces défauts peuvent causer une perte d'énergie, réduire la durée de vie des modules PV et poser des problèmes de sécurité. Il est donc crucial de développer des méthodes de détection de ces défauts pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes PV.

Diverses méthodes de détection de défauts sont utilisées, telles que la détection infrarouge thermique, la réflectométrie dans le domaine temporel, les algorithmes d'intelligence artificielle et les analyses basées sur des modèles mathématiques. Ce travail se compose de quatre chapitres décrits ci-après :

Nous aborderons dans le premier chapitre l'état de l'art des centrales photovoltaïques en examinant d'abord les systèmes photovoltaïques. Cette première partie se concentrera sur la conversion photovoltaïque, la technologie qui permet de convertir la lumière du soleil en électricité, ainsi que sur les cellules photovoltaïques, les unités de base des panneaux solaires.

Nous explorerons également les différents types de systèmes photovoltaïques, en mettant en évidence leurs caractéristiques et leurs applications. Dans la deuxième partie, nous nous intéresserons spécifiquement aux centrales photovoltaïques en Algérie, en examinant les

critères de choix importants lors de leur conception et les différents types de panneaux solaires photovoltaïques utilisés dans ce contexte.

Le deuxième chapitre se penchera sur les défauts rencontrés dans les systèmes photovoltaïques. Nous examinerons différents types de défauts potentiels qui peuvent se manifester à différentes étapes de ces systèmes, qu'ils surviennent lors de la fabrication ou pendant la phase d'exploitation.

Dans le troisième chapitre, nous examinerons le diagnostic des défauts dans les systèmes photovoltaïques. Nous aborderons les différentes étapes du processus de diagnostic, en détaillant son architecture et en mettant en lumière ses objectifs principaux. Nous passerons en revue quelques-unes des méthodes de détection de défauts les plus couramment mentionnées dans la littérature spécialisée. Un aperçu approfondi de ces techniques a été fourni, mettant en évidence leurs performances respectives, afin de mieux comprendre leurs différences, leurs avantages et leurs limitations.

Dans le quatrième chapitre, nous simulerons un système photovoltaïque à l'aide de MATLAB/Simulink, mettant l'accent sur la modélisation du générateur photovoltaïque. Nous étudierons deux modules photovoltaïques et leurs caractéristiques comparées pour évaluer leurs performances respectives. Nous simulerons également différents types de défauts potentiels, tels que l'ombrage partiel, les court-circuits et la dégradation des résistances série et shunt, pour comprendre leur impact sur le fonctionnement du système et proposer des améliorations pour optimiser sa fiabilité et son efficacité.

Enfin, nous dressons à la fin du manuscrit une conclusion sur ces travaux et présentons quelques pistes de perspectives mises à jour.



## CHAPITRE I

### État de l'art des centrales Photovoltaïques et leurs différentes Technologies

### I.1 Introduction

Dans le paysage énergétique mondial actuel, marqué par une préoccupation croissante pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la transition vers des sources d'énergie plus propres, l'exploitation des énergies alternatives et renouvelables revêt une importance capitale. Parmi ces alternatives, le photovoltaïque se distingue par sa promesse incontestable, bénéficiant de qualités intrinsèques telles que sa faible exigence en matière d'entretien, sa fiabilité, son fonctionnement silencieux et sa facilité relative d'installation. Dans ce contexte, ce chapitre se propose d'examiner de manière approfondie le système photovoltaïque et les centrales photovoltaïques, soulignant leur potentiel significatif dans la transition vers un avenir énergétique plus durable.

### Partie 1 : Systèmes photovoltaïques

#### I.2 Ressource et rayonnement solaire

Considéré dans l'Antiquité comme un Dieu, le soleil aujourd'hui se réduit au statut d'énergie, une énergie qu'il faut la capter, la transformer et la stocker. Le soleil, notre plus grande source d'énergie, une étoile située à une distance moyenne de 149 598 000 Km de la terre, émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$  [2]. Ce rayonnement est composé de grains de lumière appelés photons.

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  par la relation suivante [I.1] :

$$E_p = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Où :

$E_p$  : l'énergie du photon (en joules, J).

$h$  : la constante de Planck égale à  $6.62 \cdot 10^{-34}$  J.s.

$c$  : la vitesse de la lumière dans le vide, égale à  $3 \cdot 10^8$  m/s.

$\lambda$  : la fréquence du photon (en hertz, Hz).

$E_p$  : l'énergie du photon (en joules, J).

#### I.3 Gisement solaire de l'Algérie

L'énergie solaire est la ressource renouvelable la plus abondante en Algérie. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an et peut atteindre 3900 heures par an sur les hauts plateaux et le Sahara. La moyenne annuelle de la

durée d'insolation mesurée pendant dix ans (1992-2002) est illustrée dans la figure I.1 [2]. Pour la partie nord du pays, la durée d'insolation varie de 5 h/jour pendant les mois d'hiver à plus de 11 h/jour pendant les mois d'été. En revanche, la région sud du pays bénéficie d'une plus grande durée d'insolation qui dépasse les 8 h/jour durant la saison hivernale et qui pourrait atteindre 12h/jour durant la saison estivale [3]. Cette durée d'insolation reflète la grande disponibilité de l'énergie solaire sur le territoire national.

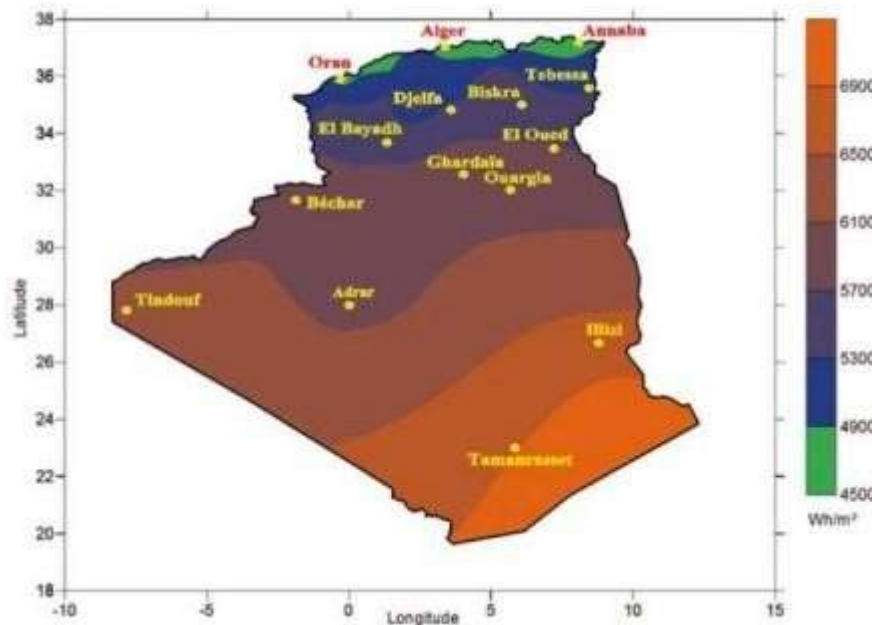


Figure I.1 : La moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée (1992-2002) [2]

L'énergie solaire reçue sur un plan horizontal dépasse les  $4,5 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$  sur la majeure partie du territoire national. Les données publiées dans l'atlas solaire Algérien [3] indique que la valeur moyenne de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale passe de  $4,7 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$  au nord (station de Dellys) à  $7,1 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$  au sud (station de Djanet). Ce niveau d'irradiation combiné avec l'importante durée d'insolation place l'Algérie parmi les pays qui possèdent le plus grand niveau d'irradiation solaire au monde avec  $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  au nord et  $2650 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  au sud. Selon cette présentation du potentiel théorique de l'Algérie, nous pouvons en déduire qu'elle figure parmi les régions les plus favorables pour l'utilisation de l'énergie solaire.

### I.4 La conversion photovoltaïque

#### I.4.1 Principe de la conversion photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde

appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électrons trou, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise [4].

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension); s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [4].

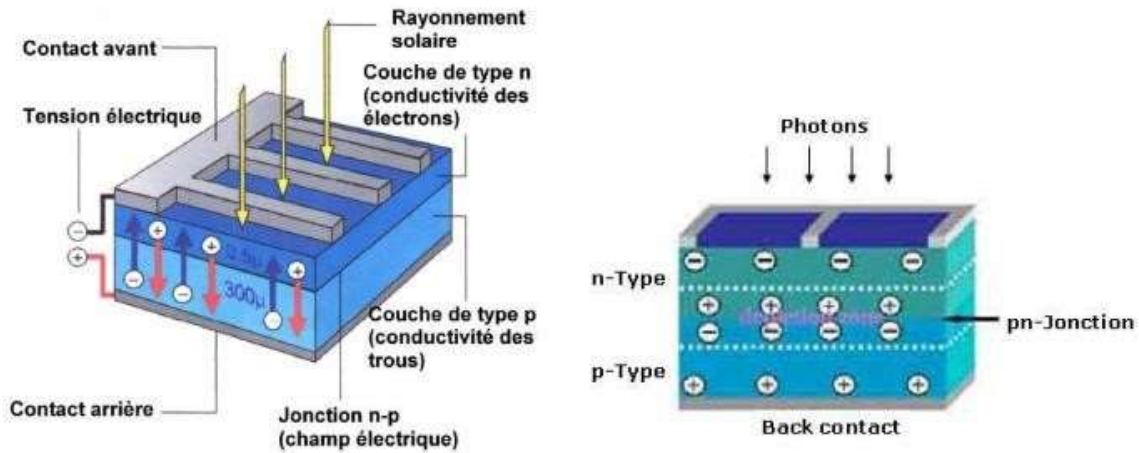


Figure I.2 : Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque [5].

#### **I.4.1.1 Matériau semi-conducteur**

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

On le trouve généralement sous forme de silicate dans de nombreuses roches, argiles et terres Le silicium est obtenu en réduisant la silice sable,  $\text{SiO}_2$ .) Par le Carbone. Une fusion en zone subséquente donne un élément plus pur pour des applications nécessitant un silicium de haute pureté (par exemple les semi-conducteurs). Les semi-conducteurs (germanium et silicium) possèdent 4 électrons sur leur couche périphérique car ils appartiennent aux 4 colonnes de la classification périodique des éléments. Il est possible de les produire avec un haut degré

de pureté (moins de l'atome étranger pour 10 atomes de semi-conducteur) on parle alors de S. C. intrinsèque. Un exemple de semi-conducteur est illustré sur la Figure 1.3. [6]

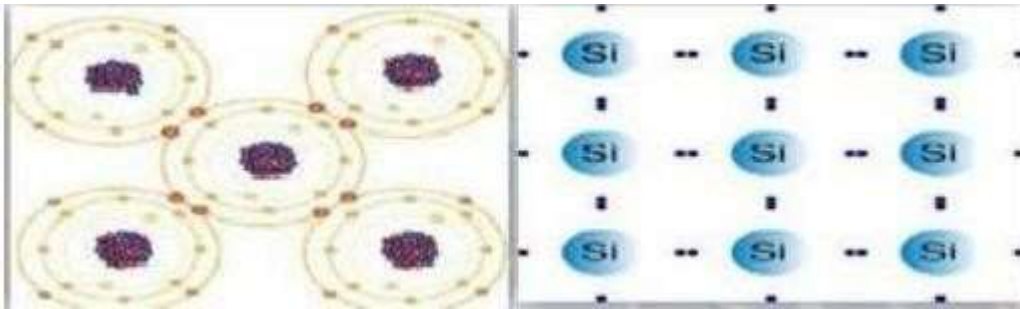


Figure I. 3 : Exemple de semi-conducteur [6].

### I.5 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est une composante optoélectronique qui transforme directement la lumière solaire en électricité, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Une cellule photovoltaïque est constituée par un matériau semi-conducteur de type P-N. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries [7].

#### I.5.1 Principe de fonctionnement des cellules PV

Les cellules solaires photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -). Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bord. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique. [8]

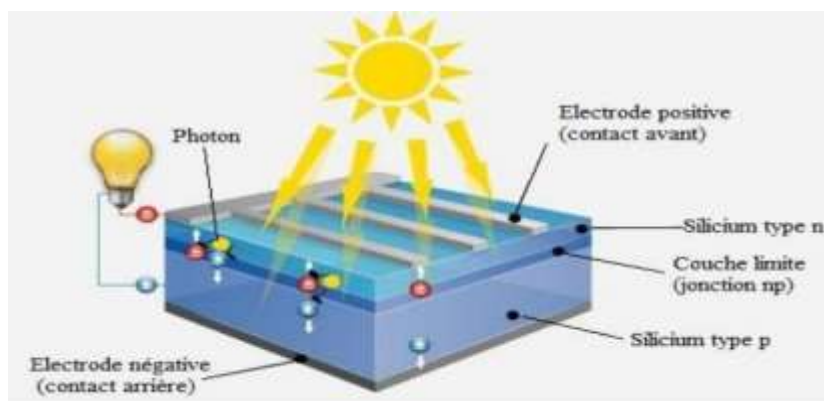


Figure I.4 : Schéma d'une cellule PV [8]

### I.5.2 Différents types de cellules solaires

Il existe différents types de cellules solaires photovoltaïques, et chaque type de cellules à un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 5 à 22% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules [9] :

#### a) Cellules mono- cristallines

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).

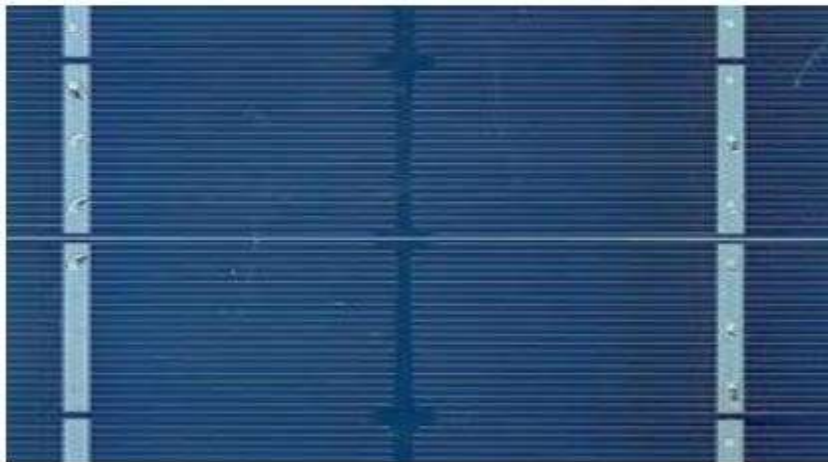


Figure I.5 : Cellules mono-cristallines [9].

#### b) Cellules poly-cristallines

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.



Figure I.6 : Cellules poly-cristallines [9].

### **c) Cellules amorphes**

Le silicium amorphe est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous de très faible éclaircissement.



Figure I.7 : Cellule amorphe [9].

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux tel que le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire [10].

**I.5.3 Association des cellules PV**

**I.5.3.1 Branchement en série**

On peut associer un nombre de cellules  $N_S$  en série afin d'augmenter la tension d'un GPV (Générateur photovoltaïque). Le même courant traverse cet ensemble, la caractéristique obtenue par cette association est donc calculée à travers l'addition des tensions élémentaires de chacune des cellules, comme illustré dans la figure I.8. L'équation I.2 traduit le calcul cité précédemment [11].

$$V_{oc} = N_S \times v_{oc} \tag{I.2}$$

Avec :

$V_{oc}$ : la tension ouverte (en volts, V) du générateur photovoltaïque (GPV) dans son ensemble

$N_S$ : le nombre de cellules photovoltaïques connectées en série.

$v_{oc}$ : la tension ouverte (en volts, V) de chaque cellule photovoltaïque individuelle.

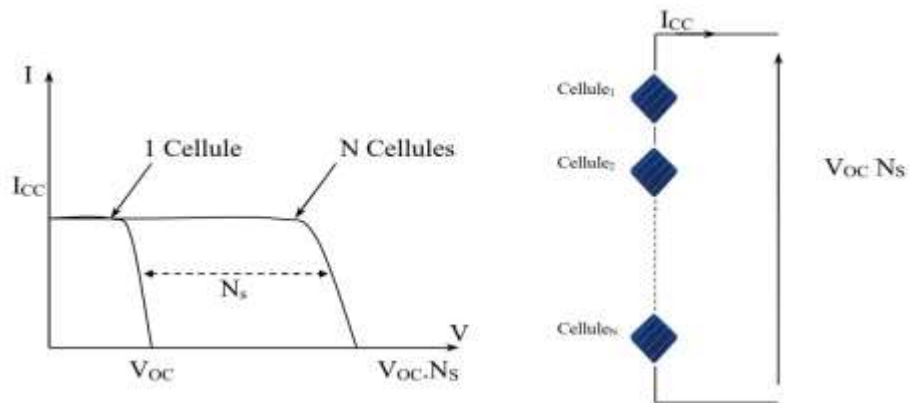


Figure I.8 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $N_S$  cellules en série [11].

**I.5.3.2 Branchement en parallèle**

On peut aussi associer des cellules  $N_P$  en parallèle pour accroître le courant de sortie du GPV. Puisque les cellules seront montées en parallèle, la tension et la caractéristique résultantes seront impérativement similaires dans toutes les cellules comme expliqué dans la figure I.9.

Dans la mise en parallèle, on calcule la caractéristique résultante par l'addition des tensions, tout cela est exprimé dans l'équation I.3. [12]

$$I_{cc} = N_P \times I_{cc} \tag{I.3}$$

Avec :

$I_{cc}$ : le courant de sortie total du système photovoltaïque.

$N_P$ : le nombre de cellules photovoltaïques en parallèle.

$I_{cc}$ : le courant de sortie individuel de chaque cellule photovoltaïque.

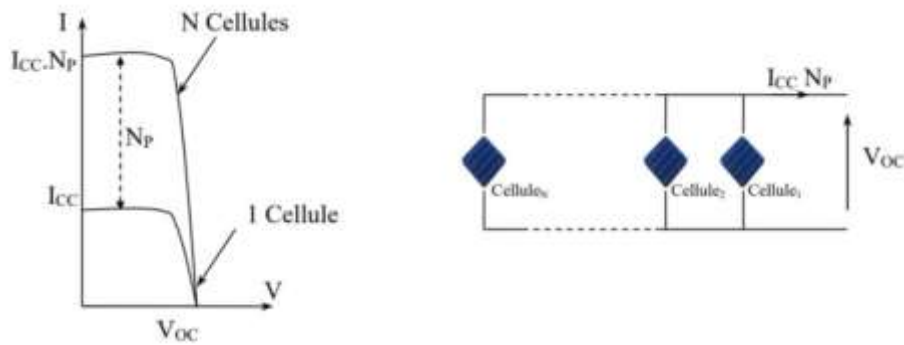


Figure I.9 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $N_s$  cellules en parallèle [12].

### I.6 Modules photovoltaïques

Un assemblage de ces cellules est nommé un module. Pour obtenir un module, on noie les cellules dans un bain de résine. Ensuite, on encapsule le tout entre deux vitres en verre trempées pour obtenir un module BIVERRE ou entre une vitre et une feuille de TEDLAR pour obtenir un module verre/TEDLAR. Cet ensemble est souvent entouré par un cadre en aluminium [13]

L'énergie convertie par un module change en fonction de la surface et la valeur du rayonnement solaire. On estime cette énergie en Watt-crête  $W_c$ . La puissance maximale pour l'ensoleillement de référence est de 1000 Watts par  $m^2$ .

Le rendement d'un module dépend aussi du nombre de cellules liées en séries. Les modules de faible puissance par exemple donnent une puissance inférieure à 75  $W_c$  et possèdent une tension d'usage estimée de 12 à 15 Volts.

L'amélioration du niveau de tension est l'augmentation du nombre de cellules en série et l'augmentation de la valeur de l'intensité du courant est l'augmentation du nombre de branches de cellules mises en parallèle.

La tension d'usage varie en fonction de la configuration de 24 Volts ou plus. La surface des modules est souvent compromise de 0,5 à 1  $m^2$  et atteint parfois 3  $m^2$  dans des conditions extrêmes. Un ensemble de modules interconnectés ainsi, forme un panneau et un groupe de panneau est un champ photovoltaïque.

### I.7 Champ photovoltaïque

Afin d'augmenter la puissance d'une installation photovoltaïque de quelques kilowatts (KW), on doit assembler les modules photovoltaïques suivant une architecture bien connue (selon les besoins des clients). La connexion des modules en séries et parallèles donne la forme d'un champ photovoltaïque [14], comme le montre La figure I.10.

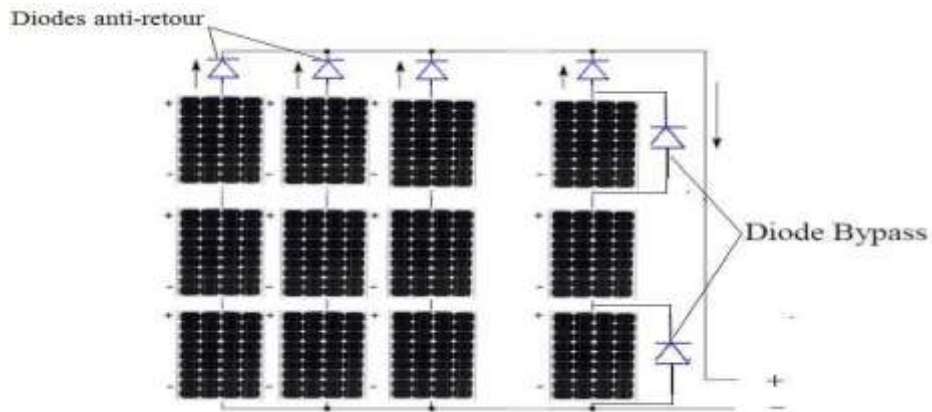


Figure I.10 : Un champ photovoltaïque [14].

### I.8 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un ensemble complet d'équipements pour transformer la lumière du soleil en électricité.

Les systèmes photovoltaïques sont constitués de plusieurs composants interconnectés. Ces systèmes sont conçus pour accomplir des tâches spécifiques allant de l'alimentation en énergie électrique de petits appareils jusqu'aux réseaux électrique.

Il existe deux principaux types de systèmes PV couramment utilisés sur le marché [15]:

- Le système autonome (non connecté au réseau).
- Le système raccordé au réseau électrique.

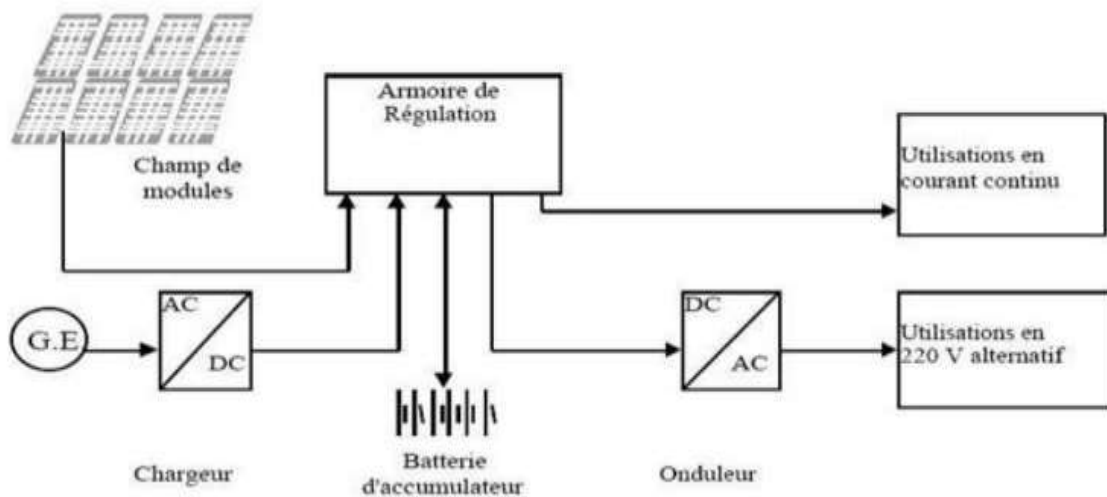


Figure I.11 : Schémas synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général [16].

#### I.8.1 Type de systèmes photovoltaïque

On peut représenter les systèmes photovoltaïques par une très grande variété de configuration et peuvent être classés en six groupes distincts. Les trois premiers groupes a , b

et c sont des systèmes autonomes non reliés à un réseau électrique. Par contre les groupes d, e et f sont reliés différemment au réseau électrique [17]

### **I.8.1.1 Système autonome avec batterie**

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison où il faut de l'électricité lorsqu'il ne fait plus jour.

### **I.8.1.2 Système autonome sans batterie**

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex. : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompe à eau).

### **I.8.1.3 Système hybride PV/génératrice**

Ce système utilise les avantages de l'énergie photovoltaïque et de la génératrice au diesel, au propane ou à l'essence. Le système photovoltaïque fournit une énergie intermittente mais souvent moins coûteuse en régions isolées ou éloignées. La génératrice sert d'énergie d'appoint, selon la demande. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries. Les systèmes hybrides PV/génératrices sont souvent utilisés pour les tours de télécommunications ainsi que pour les refuges et les camps forestiers en régions éloignées. Ils peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie telles les éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électriques.

### **I.8.1.4 Système PV centralisé**

Ce système fonctionne comme une centrale électrique normale mais doit tenir compte de la fluctuation de la production d'énergie qui est liée à l'ensoleillement.

### **I.8.1.5 Système PV sur réseau décentralisé**

Ce système photovoltaïque est branché directement sur un réseau électrique, mais il est installé près de la demande. Il peut être installé, par exemple, sur une résidence individuelle ou sur un centre commercial, de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau. Ce système permet de diminuer les frais de transport d'électricité et la surcharge de ligne, particulièrement en ce qui a trait aux charges adaptées à la production photovoltaïque tels les systèmes d'air conditionné (gestion de la demande). Ce système permet aussi d'éviter le stockage classique sur batteries (d'où réduction du coût global).

### I.8.1.6 Système PV sur réseau diesel

Ce système est utilisé principalement dans les communautés ou les villages éloignés. Le générateur PV est branché en parallèle avec les génératrices au diesel du réseau villageois et fournit l'électricité sur ce réseau lorsque l'ensoleillement le permet. Il permet de réduire la consommation d'un carburant diesel très coûteux en régions éloignées et diminue les temps de fonctionnement des génératrices.

### I.8.2 Protection des systèmes solaires photovoltaïques

#### I.8.2.1 Protection par diodes

Le choc électrique doit être évité aux cellules, car c'est des éléments fragiles, elles peuvent être détruites par un échauffement excessif par effet Joule si elles deviennent réceptrices de courant. A cet effet, les modules doivent être protégés par des diodes.

Les diodes séries : Un module peut devenir récepteur du courant fourni par les autres séries de modules ayant une tension plus élevée. Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les photopiles, ou pour empêcher une série de modules contenant un module défaillant ou masqué, une diode "anti retour" est intégrée dans chaque série [18].

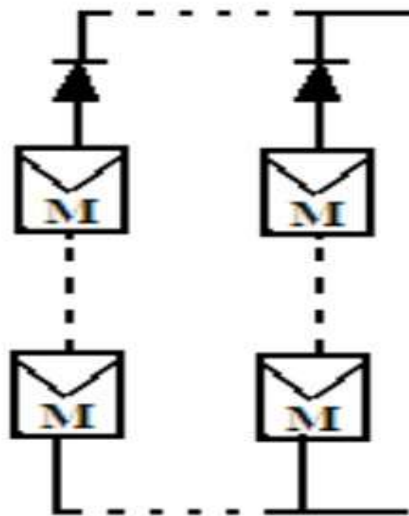


Figure I.12 : Protection par diodes en série [18].

### I.9 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque

#### I.9.1 Principaux avantages de l'énergie photovoltaïque [19]

- Energie solaire gratuite.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation. ➤ Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.

- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.

### **I.9.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque [19]**

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

## **Partie 2 : Centrales photovoltaïques**

### **I.10 Centrale solaire photovoltaïque**

L'expression « centrale photovoltaïque » est un terme générique. On utilisera les notions de « parcs photovoltaïques » pour les installations en forêt et de « fermes photovoltaïques » pour les installations sur des terres agricoles [20].

Une centrale photovoltaïque est une installation de production d'électricité qui utilise des panneaux solaires pour convertir l'énergie solaire en électricité. Ces centrales sont de plus en plus répandues à travers le monde en raison de leur capacité à fournir une énergie propre et renouvelable. Elles peuvent être de différentes tailles, allant des petites installations résidentielles aux grandes fermes solaires sur des terrains vastes.

Les centrales photovoltaïques contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre, à promouvoir la sécurité énergétique en diversifiant les sources d'électricité, et à créer des emplois dans le secteur des énergies renouvelables. De plus, les progrès technologiques continus dans ce domaine, tels que l'amélioration de l'efficacité des panneaux solaires et le développement de systèmes de stockage d'énergie.

#### **I.10.1 Centrales photovoltaïques en Algérie**

La société SKTM (Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadiada) a installé depuis 2014 un nombre de 23 centrales photovoltaïques sur le territoire national. Elles sont regroupées en trois groupes selon la situation géographique [21] :

- L'unité des Hauts Plateaux Est : elle comporte les contrôles suivants ; Msila, El Hadjira,

Oued Nechou, Batna, Djelfa et Souk Ahras. Elle présente une puissance totale de 121,1 MW.]

- L'unité des Hauts Plateaux Ouest : elle comporte les contrôles suivants ; Laghouat, S.B Abbes, Naama, Saida et El Bayadh. Elle présente une puissance totale de 145 MW.
- L'unité du Sud : elle comporte les contrôles suivants ; Adrar, Kabertène, Tindouf Djanet, Zouiet Kounta, In Salah, Timimoune, Tamanrasset, Reggane, Aoulef. Elle présente une puissance totale de 78MW.

<i>Wilaya</i>	<i>Localité</i>	<i>Capacité installée WM</i>	<i>Mise en service</i>
<b>ILLIZI</b>	Djanet	03	19/02/2015
<b>ADRAR</b>	Adrar	20	28/10/2015
<b>ADRAR</b>	Kabertene	03	13/10/2015
<b>TAMANRASSET</b>	Tamanrasset	13	03/11/2015
<b>TINDOUF</b>	Tindouf	09	14/12/2015
<b>ADRAR</b>	Zaouiet.kounta	06	11/01/2016
<b>ADRAR</b>	Reggane	05	28/01/2016
<b>ADRAR</b>	Timimoune	09	07/02/2016
<b>TAMANRASSET</b>	In-salah	05	11/02/2016
<b>ADRAR</b>	Aoulef	05	07/03/2016
<b>LAGHOUAT</b>	El-khnag (I)	20	08/04/2016
<b>LAGHOUAT</b>	El-khnag (II)	40	26/04/2017
<b>DJELFA</b>	Ain-el-ibel (I)	20	08/04/2016
<b>DJELFA</b>	Ain-el-ibel (II)	33	06/04/2017
<b>SOUK AHRAS</b>	Oued el kebrit	15	24/04/2016
<b>NAAMA</b>	SedrateLeghzal	20	03/05/2016
<b>SAIDA</b>	Ain-skhoua	30	05/05/2016
<b>SIDI-BEL-ABBES</b>	Telagh	12	29/09/2016
<b>EL BAYADH</b>	Biodh Sidi Chikh	23	26/10/2016
<b>M'SILA</b>	Ain-El-Melb	20	26/01/2017
<b>OUARGLA</b>	El-Hadjira	30	16/02/2017
<b>BATNA</b>	Oued El-Ma	02	16/01/2018

Tableau I.1 : Développement des centrales PV au niveau Nationale [16].

### I.10.2 Les critères de choix d'une centrale photovoltaïque

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

- Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet, une centrale toute entière.
- Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en

électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc.

- La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride.
- Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle.

### I.11 Eléments de l'installation photovoltaïque

Tout système photovoltaïque peut se composer, comme il est montré sur la figure I.13, en trois parties [22] :

- Une partie de production d'énergie.
- Une partie de conversion de cette énergie.
- Une partie de stockage de l'énergie.



Figure I.13 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage [23].

### **I.11.1 Production d'énergie (Panneaux photovoltaïques)**

La production d'énergie se réalise par la conversion d'énergie solaire en électricité, cette partie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules, Le panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W). Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque [24].

#### **I.11.1.1 Les types de panneaux PV [25]**

##### **A. Panneaux photovoltaïques orientables**

Avec des panneaux orientables, on peut modifier l'inclinaison tous les mois, mais par facilité, on peut également choisir une inclinaison pour l'été, une autre pour l'hiver. On utilise généralement ce genre de structure pour des applications au sol ou sur des toits plats. Pour ces systèmes à inclinaison variable, il existe un angle d'inclinaison des panneaux par rapport à l'horizontale, qui permet de maximiser la production d'électricité mensuelle.

##### **B. Panneaux photovoltaïques fixes**

Les panneaux fixes sont installés dans une position fixe tout au long de l'année (azimut et inclinaison). Le rendement optimum est obtenu pour une orientation sud avec une inclinaison de 35°. Dans cette position, un système d'une puissance d'1 kWc produit environ 900 kWh par an. Si on s'écarte de cette position, le rendement diminue. Cette diminution du rendement peut être calculée en multipliant le rendement obtenu en position optimale par le facteur de correction pour l'orientation et l'inclinaison choisie (ce qu'on appelle le Facteur de transposition qui tient compte de l'orientation et de l'inclinaison FT).

##### **C. Panneaux photovoltaïques mobiles ou suiveur solaire**

L'objectif du système de panneaux mobiles est de pouvoir suivre le soleil tout au long de la journée. Pour cela, la structure possède deux degrés de liberté : une rotation horizontale pour régler l'azimut et une rotation verticale pour l'inclinaison. Ce système permet aux panneaux photovoltaïques de suivre continuellement la position du soleil pour assurer une production électrique maximum. Ce type de structure permet d'augmenter la production d'électricité par rapport aux panneaux fixes, d'environ 25%.

### **I.11.2 Stockage de l'énergie**

Systèmes photovoltaïques, il est indispensable de pouvoir stocker l'énergie pour ajuster la production à la consommation.

Ceci est particulièrement vrai pour les systèmes autonomes (non connectés à un réseau électrique). Même dans le cas où le réseau électrique est présent, l'utilisation d'un moyen de stockage permet de lisser les productions intermittentes et d'injecter l'énergie pendant les périodes les plus pertinentes (la nuit et les jours "sans soleil").

Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique ; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. Vue l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire [26], une étude théorique des différents types de batteries est menée, en particulier la batterie au plomb qui est la moins coûteuse comparativement aux autres batteries.

### I.11.2.1 Principe général de fonctionnement d'une batterie [5]

Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par un électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions électrochimiques. A l'anode (Électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'oxydation selon la formule suivante :

$M1 \rightarrow M1^{n+} + n e^-$ , de potentiel redox  $E1$  ;  $M1$  étant l'espèce active de l'anode.

Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode.

(Électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction selon :

$M2^{n+} + n e^- \rightarrow M2$ , de potentiel redox  $E2$  ;  $M2$  étant l'espèce active de la cathode

I.11.2.2 Différents type de batterie (avantages et inconvénients)

Type de la batterie	Avantages	Inconvénients
<b>Plomb (Pb)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix bas.</li> <li>• Solides capables de fournir des courants élevés.</li> <li>• Eléments standards se trouvent n'importe où dans le commerce.</li> <li>• Facilité de mise en œuvre.</li> <li>• Sans effet mémoire (c'est dire qu'on peut les recharger quand on veut, à n'importe quel niveau de décharge).</li> <li>• Souplesse d'utilisation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité d'énergie.</li> <li>• Poids.</li> <li>• Autodécharge (1% par jour environ).</li> <li>• Sensibles aux températures négatives (perte d'autonomie jusqu'à -25% à -10°C).</li> <li>• Risque de cristallisation de sulfate de Pb si laissée trop longtemps déchargée.</li> </ul>
<b>Nickel Cadmium (Ni-Cd)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aptes à supporter de grands Courants décharge et décharge grâce à leurs faibles résistances internes.</li> <li>• Faible coût.</li> <li>• Solidité mécanique et électrique.</li> <li>• Recharge facile et grande tolérance face aux surcharges.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet mémoire.</li> <li>• Densité énergétique moyenne.</li> <li>• Recyclage compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant.</li> </ul>
<b>Nickel Métal Hydride (NiMH)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne densité d'énergie.</li> <li>• Supporte des courants importants car résistance interne faible (les Ni-cd gardent cependant l'avantage dans ce domaine).</li> <li>• Simples à stocker et à transporter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fragile car ne supportent pas la surcharge, nécessitant par conséquent l'usage de chargeurs automatiques performants et couteux</li> <li>• Détection de fin de charge difficile</li> <li>• Durée de vie faible</li> </ul>
<b>Lithium (Li)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité énergétique très élevée grâce aux propriétés physiques du lithium.</li> <li>• Autodécharge très faible (5% par mois).</li> <li>• Aucun effet mémoire.</li> <li>• Poids.</li> <li>• Agrément d'utilisation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix très élevé.</li> <li>• Nécessite un circuit de protection sérieux (B.M.S. et P.C.M.) pour gérer la charge et la décharge afin d'éviter la destruction des éléments.</li> </ul>

Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients des différents types de batterie [28].

### I.11.2.3 Caractéristiques de la batterie

- **Capacité nominale** : C'est la quantité maximum d'énergie que contient une batterie (Sous température idéale de 25°). Elle s'exprime en Ampère heure (Ah).
- **Etat de charge** : C'est le pourcentage de la quantité d'énergie disponible dans la batterie à un instant t.
- **Profondeur de décharge (PDD)** : C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. Elle ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie.
- **Température** : La variation de température influence le rendement de la batterie. Celle-ci a un fonctionnement idéal à température ambiante de 25°C ; Il faut donc prévoir si possible une régulation thermique pour maintenir sa durée de vie.
- **Tension nominale** : C'est la tension type de la batterie. Elle correspond aussi à la tension de fonctionnement du système autonome. Ex : Tension 12V, 24V, 48V...
- **Taux de décharge** : C'est le temps nécessaire pour décharger entièrement la batterie. Supposons une batterie de capacité de 100Ah et de courant de décharge de 5 A : Le taux de décharge sera 100Ah / 5A soit 20 heures ; Il est noté C/20.
- **Taux de recharge** : C'est la quantité de courant qu'il faut pour recharger une batterie en un temps donné (temps du taux de décharge). Supposons une batterie de 100Ah et de taux de décharge C/20 : Le taux de recharge sera 100Ah / 20h soit 5 A.
- **Cycle et durée de vie** : C'est le nombre de séquences de charge/décharge, que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Il détermine les performances de la batterie et sa durée de vie.
- **Nombres de jours d'autonomie** : C'est la durée pendant laquelle la batterie peut alimenter toute seule l'installation en courant, sans n'être rechargée ni endommagée [10].

### I.11.3 Système de régulation - contrôleur de charge

Tous les systèmes photovoltaïques doivent comporter une régulation soignée de la charge et de la décharge de la batterie. En effet, la batterie est l'un des éléments les plus fragiles d'un système PV ; sa durée de vie est étroitement liée à la façon dont elle est chargée et déchargée : une longévité raisonnable n'est atteinte que par une protection soignée contre la surcharge ou la décharge trop profonde.

Le régulateur a un rôle essentiel dans la réduction du courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites

bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit. Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tensions prééglés : seuil haut et seuil bas. Il existe plusieurs types de régulateurs.

### **I.11.3.1 Types de régulateurs [30]**

#### **a) Régulateur Shunt**

Convient aux applications de petite puissance comportant 1 ou 2 modules PV. Le régulateur shunt contrôle la charge de la batterie en court-circuitant le module photovoltaïque sans aucun risque. Tous les régulateurs shunt exigent la présence d'une diode anti-retour en série entre la batterie et l'élément shunt afin d'empêcher le court-circuit de la batterie.

#### **b) Régulateur Série**

Convient aux applications de moyenne puissance dont le courant des modules PV est supérieur à 10 A. Lorsque la batterie atteint la pleine charge, le régulateur coupe le courant provenant des modules PV.

#### **c) Régulateur MPPT**

Convient aux applications de grande puissance. Il garantit une récupération maximale de la puissance provenant des modules PV en mesurant en permanence le courant et la tension ; Cependant il faut considérer les pertes dues à cette technique. Aussi ce régulateur peut travailler dans une vaste gamme de température.

### **I.11.4 Système de conversion**

Le système de conversion d'énergie est disposé généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (dans ce cas il sera appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif) [31].

### **I.11.4.1 Le convertisseur continu– continu**

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95 %

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important [32].

### **I.11.4.2 Le convertisseur continu – alternatif**

Pour alimenter les appareils qui fonctionnent en courant alternatif, il faut interposer un convertisseur entre la batterie et ces appareils. Les convertisseurs les plus utilisés transforment le courant continu issu de la batterie en courant alternatif 220 V/50 Hz ou 380 V/50 Hz [13].

## **I.12 Avantages et inconvénients d'une installation PV**

### **I.12.1 Avantages [33]**

- 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.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- 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.
- 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, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

### **I.12.2 Inconvénients [33]**

- 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/km<sup>2</sup> 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.

### I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en détail le domaine passionnant de l'énergie photovoltaïque. En commençant par une discussion sur le principe fondamental de la conversion photovoltaïque, nous avons examiné de près la structure et le fonctionnement des cellules photovoltaïques ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques disponibles.

Dans la deuxième partie, nous avons plongé dans le monde des centrales photovoltaïques, en examinant leur fonctionnement et leur rôle dans la production d'électricité à grande échelle.

De plus, nous avons exploré les aspects pratiques de l'installation photovoltaïque, mettant en lumière les composants essentiels nécessaires pour garantir un système efficace et durable. En conclusion, il est clair que l'énergie photovoltaïque joue un rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie plus durables et renouvelables, offrant des opportunités significatives pour une utilisation plus large et plus efficace des ressources solaires disponibles.

En continuant à explorer et à investir dans ce domaine, nous pouvons contribuer de manière significative à la lutte contre le changement climatique et à la construction d'un avenir énergétique plus propre et plus durable pour les générations futures.

## CHAPITRE II

Description du fonctionnement des  
centrales photovoltaïques dans un  
environnement saharien  
fonctionnement des centrales  
photovoltaïques dans un  
environnement saharien

## II.1 Introduction

Au sein d'une centrale solaire photovoltaïque, des centaines voire des milliers de panneaux photovoltaïques sont installés selon les sites. Afin de convertir l'énergie solaire en électricité utilisable, toute une série d'équipements doivent être installés, notamment des convertisseurs, des câbles et des systèmes de protection. Ces dispositifs sont conçus pour optimiser la production d'électricité et assurer une distribution et un stockage efficaces. Cependant, comme toute installation industrielle, les centrales solaires photovoltaïques peuvent connaître des pépins et des anomalies qui réduisent leur efficacité. Ces problèmes peuvent être attribués à des défauts dans les composants de l'usine ou à des perturbations environnementales, provoquant parfois l'arrêt complet de la production. Ce chapitre abordera différents défauts observés dans les panneaux photovoltaïques.

## II.2 Défaut

Il s'agit de tout écart ou écart d'au moins une caractéristique observée d'un système surveillé par rapport à sa caractéristique de référence requise, correspondant aux conditions normales et standards de fonctionnement. Une panne n'entraîne généralement pas un arrêt complet du système, mais elle peut entraîner une panne. Les défauts peuvent avoir des origines physiques dues à une panne d'équipement, à des erreurs de conception, à des erreurs de fonctionnement du système et d'utilisation opérationnelle, ou à des erreurs lors d'opérations de maintenance. Après une panne, le système est incapable de remplir la fonction principale pour laquelle il a été conçu [34].

## II. 3 Défauts des panneaux photovoltaïques

### II.3.1 Défaut de mis match et l'effet d'ombrage

Le défaut de mis match est un problème sérieux dans les installations PV, car il conduit à une baisse de la puissance des panneaux PV. Il est dû à l'interconnexion séries ou parallèles des cellules ou modules PV qui n'ont pas les mêmes caractéristiques [35].

Le défaut d'effet d'ombrage est un cas particulier de défaut de non-concordance car sa présence fait que la cellule photovoltaïque reçoit moins de lumière solaire. Les défauts de non-concordance peuvent être causés par de légères différences dans les caractéristiques des cellules photovoltaïques au cours du processus de fabrication ou par des conditions de fonctionnement différentes résultant de défauts différents. Le tableau suivant (II.1) représente l'impact des différents défauts sur les paramètres de la batterie [36].

Nature des défauts	Paramètres affectés
<b>Module arraché ou cassé.</b> <b>Ombrage : feuille d'arbre, déjections, sable, pollution, neige ...</b>	Variation de photo courant ( $I_{ph}$ ).
<b>Echauffement des cellules.</b>	Variation de la température ( $T$ )
<b>Dégradation des interconnexions Fissure.</b> <b>Correction des liaisons entre cellules.</b>	Variation de tous les paramètres des cellules.
<b>Modules de performances différentes. Détérioration des cellules. Pénétration de l'humidité.</b>	Variation de tous les paramètres des cellules.

Tableau II.1 : Impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule [37].

### II.3.1.1 Types de défauts de mis match

#### a) Le défaut de mis match statique

Le défaut de mis match statique est lié à la tolérance de fabrication et au vieillissement des cellules photovoltaïques (PV). Pour les cellules à base de silicium, la tolérance de fabrication est inférieure à 1%. Les fabricants de panneaux PV offrent des tolérances différentes, variant entre  $\pm 3\%$  et  $\pm 5\%$ . De plus, les pertes de mis match peuvent atteindre jusqu'à 12% dans un string PV, en prenant en compte l'effet du vieillissement des cellules [38].

#### b) Le défaut de mis match dynamique

Le défaut de mis match dynamique est causé par les variations de niveau d'irradiance et est connu sous le nom d'ombrage partiel. Les sources d'ombrage partiel peuvent être divisées en celles faciles à prédire (arbres, bâtiments) et celles difficiles à prédire (nuages, salissure et neige). Les pertes causées par l'ombrage partiel réduisent le rendement énergétique annuel de 5% à 10% dans les systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments et de 3% à 6% dans les systèmes photovoltaïques terrestres [39].

### II.3.2 Défaut de la terre

Le défaut de la terre est un court-circuit accidentel impliquant la terre et un ou plusieurs conducteurs de courant. Pour éviter ce type de défaut, les systèmes photovoltaïques (PV) sont équipés d'une mise à la terre, qui établit une liaison conductrice entre un équipement ou un circuit électrique et la terre. Cette mise à la terre vise à minimiser les chocs électriques et réduire l'effet des interférences électromagnétiques en cas de configuration module onduleur [40].

Les défauts de terre peuvent être causés par les raisons suivantes [35] :

- Défaillance de l'isolation des câbles : un animal par exemple peut mâcher l'isolation des câbles et provoquer un défaut de terre.
- Court-circuit accidentel entre le conducteur et la terre : un câble dans une boîte de jonction PV en contact avec un conducteur de terre [41].

- Défaut de terre dans les modules PV : une cellule solaire court-circuite les cadres des modules à la terre en raison de la détérioration de l'encapsulation, des chocs, ou d'une corrosion dans le module PV (lié aux conditions climatiques).

La figure (II.1) montre un exemple de défaut de terre : le panneau photovoltaïque est connecté à la terre à cause d'un défaut électrique au point A. Ce défaut n'est pas forcément un contact franc et peut être modélisé par une résistance de défaut. En conséquence, il engendre un courant de fuite  $I_f$  et le courant  $I_1 = I_2 + I_f$  produit par le panneau est réparti entre l'onduleur  $I_2$  et la résistance de fuite.

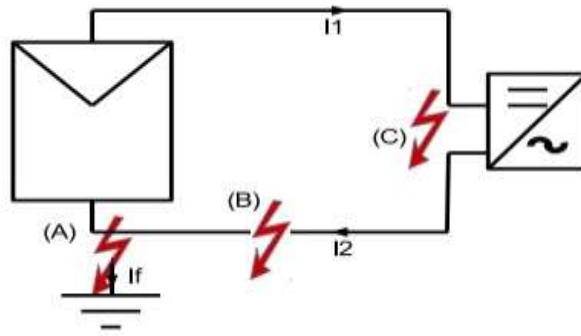


Figure II.1 : (A) défaut de terre, (B) arc série, (C) arc parallèle [41].

### II.3.3 Bulles d'air

Les bulles dans les panneaux photovoltaïques (PV) sont causées par une réaction chimique qui libère des gaz et par une mauvaise adhérence entre les couches du panneau. La formation de ces bulles rend la dissipation de la chaleur des cellules plus difficile, ce qui réduit le refroidissement et, par conséquent, réduit la durée de vie des PV. Les bulles ne sont pas toujours visibles à l'œil nu et peuvent être détectées uniquement en utilisant des techniques de réflexion infrarouge (RI) ou infrarouge (IR). Elles peuvent également être causées par le détachement de la cellule du verre. Les bulles situées sur la face avant du module peuvent réduire l'éclairement qui arrive sur le module, affectant ainsi le rendement des PV.

Elles provoquent la réflexion d'une partie de la lumière qui atteint le module. Ces bulles sont dues à une réaction chimique où des gaz sont libérés et la mauvaise adhérence entre les couches de panneau PV [42].

### II.3.4 Défaut d'arc électrique

Le défaut d'arc se produit lorsque deux fils avec une importante différence de potentiel sont mis en contact ou tirés hors du circuit. Ce défaut peut entraîner des pannes critiques et même causer la fin de la vie des modules ou des systèmes photovoltaïques (PV).

L'arc électrique créé par le courant continu DC est une étincelle qui se produit dans l'air ou dans un autre milieu diélectrique. Il se produit sous deux formes : arcs série et arcs parallèles.

- Un arc série : se produit le plus souvent quand une connexion est interrompue laissant un conducteur très près de l'autre. L'arc série peut se produire dans les boîtes de jonction, les connexions des câbles entre les modules et à l'intérieur des modules.
- L'arc parallèle : peut se produire lorsque deux conducteurs de tension différente sont proches l'un de l'autre, par exemple lorsque l'isolation de deux fils parallèles est défectueuse.

Lorsqu'un arc se produit en série, le courant est limité par la charge avec laquelle il est en série. En revanche, un arc parallèle peut absorber autant de courant qu'une source est capable de fournir. Pour détecter et protéger contre ces défauts, des dispositifs de protection tels que des fusibles ou des détecteurs d'arc électrique sont utilisés [43].

### II.3.5 Défaut d'augmentation de la résistance série ( $R_s$ )

La résistance en série est un facteur crucial influençant les performances des cellules solaires. L'augmentation de cette résistance est généralement causée par des facteurs tels que la corrosion de la connectique entre deux modules photovoltaïques (PV), une vis de connexion mal serrée, la corrosion de points de soudure entre cellules, etc. Normalement, la résistance de connectique est quasi nulle lors du fonctionnement normal. Cependant, cette résistance peut être augmentée dans des cas anormaux.

Une grande augmentation de cette dernière entraîne une perte en tension. Pour une limite donnée, la perte en tension peut être suffisamment grande pour rendre la tension du groupe négative et faire basculer la diode de by-pass en mode passant [44].

### II.3.6 Défaut de diminution de la résistance parallèle ( $R_{sh}$ )

Les pertes d'énergie importantes causées par la présence d'une résistance shunt ( $R_{sh}$ ) sont généralement attribuées à une mauvaise conception des cellules solaires. La résistance shunt caractérise le courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière, également connu comme les "bornes opposées d'une photopile". Elle est généralement bien supérieure à la résistance série ( $R_s$ ). La résistance parallèle représente également les pertes à travers la jonction, autour des bords de la cellule et dans les régions non périphériques, en présence de défauts du cristal et de la précipitation d'impuretés étrangères dans la région de la jonction [44].

### II.3.7 Défauts de la diode de by-pass et la diode anti-retour

La diode de by-pass est une solution pour protéger les cellules photovoltaïques contre l'ombrage partiel. Elle est généralement installée en parallèle avec un groupe de cellules. Cependant, cette diode peut être exposée à divers défauts de fabrication, tels que la diode déconnectée, la diode équivalente à une impédance quelconque, la diode court-circuitée et la diode inversée. De même, la diode anti-retour est également susceptible de ces défauts, incluant

le court-circuit, l'impédance quelconque, le circuit ouvert et la diode inversée, comme indiqué dans la figure (II.2). Ces défauts peuvent être détectés et corrigés par des professionnels pour assurer une fonctionnalité optimale des modules photovoltaïques [45].

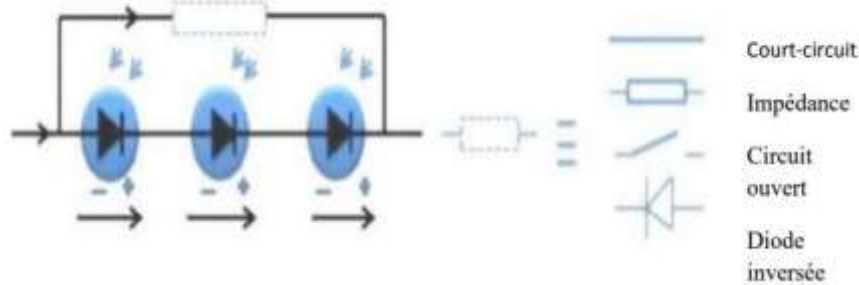


Figure II.2 : Défauts de la diode de by-pass [45].

### II.3.7.1 Défaut de circuit ouvert

Les défauts de circuit ouvert dans les systèmes photovoltaïques (PV) se rapportent à des déconnexions dans les sous-systèmes. Cela inclut la déconnexion des cellules d'un module, des modules d'une chaîne ou des chaînes d'un réseau PV. Pour détecter ces défauts, il est possible de réaliser un diagnostic en inspectant les indicateurs de tension et de courant. Bien que la tension du réseau PV reste constante, un défaut entraîne une baisse du courant. Les défauts de circuit ouvert peuvent être causés par des cellules endommagées, des diodes défectueuses et des erreurs de câblage [46].

### II.3.7.2 Défaut de court-circuit

La tension du groupe de cellules s'annule. Le courant du groupe de cellules constituant le module PV est égal à la somme du courant circulant dans les cellules et de celui circulant dans le chemin court-circuit. Le courant circulant dans les cellules est égal au courant maximum produit par les cellules et le chemin court-circuitant porte le courant en excès. Dans ce sous modèle, nous avons [47].

$$V_{BP} = (R_{BP}I_{BP} + V_O) \quad (\text{II.1})$$

Avec

$$V_M = K_{BP} * V_{BP} ; k_{bp}=0 \quad (\text{II.2})$$

$V_{BP}$  : la tension du groupe de cellules.

$R_{BP}$  : la résistance dynamique de la diode (en ohms).

$I_{BP}$  : le courant traversé la diode (en ampères).

$V_{OBP}$  : la barrière de potentielle (en volts).

$V_M$  : la tension du module photovoltaïque.

$K_{BP}$  : un coefficient qui décrit la relation entre la tension du groupe de cellules et la tension du module photovoltaïque

## II.4 Propriétés de la poussière

Les propriétés de la poussière jouent un rôle crucial dans son dépôt. Les propriétés physiques des particules déterminent la durée de leur voyage dans l'atmosphère. En comparaison avec les particules plus grossières, 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 tend à former des amas et des couches supérieures de particules. Sous l'effet du vent, ces amas sont détruits mais se réinstalleront ensuite en surface, tandis qu'une seule couche de particules est emportée de la surface par le vent. Les particules de sable rebondissent sur la surface du verre avant de se déposer, ce qui retarde ainsi la formation d'amas [48].

### II.4.1 Effet du vent de sable sur les panneaux photovoltaïques

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.

L'énergie solaire photovoltaïque peut être une solution, si elle est utilisée efficacement, pour assurer l'électrification, le pompage de l'eau et les communications dans des régions inaccessibles comme dans le sud de l'Algérie. Les panneaux solaires protégés par du verre fabriqué à ces fins sont cependant constamment exposés aux effets néfastes causés par les vents de sable [49].

Ce vent de sable affecte de nombreux facteurs qui rendent l'efficacité des panneaux photovoltaïques à son maximum. Le plus important de ces facteurs est l'éclairement solaire, l'état de surface des panneaux (verre), la durée de vie de ces panneaux, l'ossature. La figure II.3 montre l'effet des vents de sable sur les panneaux photovoltaïques :



Figure II.3 : Photographie de modules PV propres et poussiéreux [50].

### II.4.2 Effet du vent de sable sur l'éclairage solaire

Les caractéristiques physicochimiques de la poussière accumulée, la vitesse du vent, la durée d'exposition et l'orientation du module photovoltaïque (PV) jouent un rôle crucial dans le taux de pollution. Le dépôt de poussière sur les surfaces du module PV réduit la transmissivité du couvercle en verre, ce qui entraîne une réduction significative de la quantité d'irradiation solaire reçue par les cellules solaires. Cela conduit à une dégradation des performances de production d'énergie des modules solaires PV [51].

La plupart des études ont démontré que les particules plus petites, caractérisées par une surface spécifique, se répartissent plus uniformément sur les surfaces des modules photovoltaïques (PV). Cela réduit les vides entre les particules, empêchant ainsi le passage des rayons lumineux. Cette répartition uniforme des particules plus petites provoque une détérioration significative des performances des modules PV par rapport à celle causée par les particules grossières de la masse de poussière [52].

Il y a aussi la poussière atmosphérique qui disperse le rayonnement solaire, réduisant la quantité de rayonnement solaire direct atteignant l'élément de transmission de lumière des modules solaires [51].

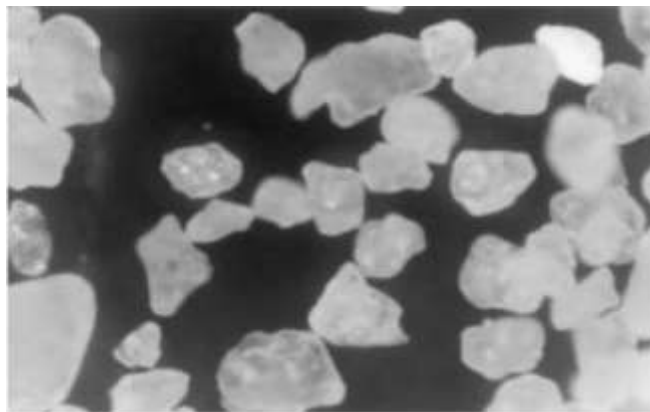


Figure II.4 : Micrographie optique montrant les formes irrégulières des particules de sable [49].

Le sable utilisé provient de la région désertique de Biskra (sud de l'Algérie). La forme des grains est irrégulière mais approximativement sphérique. La taille moyenne des grains varie entre 95 et 780  $\mu\text{m}$  [49].

Cette distribution irrégulière de ces molécules affecte sur la surface du module PV; d'où la puissance de sortie. Une densité de poussière (poids de la poussière divisé par la surface du module) de 6,184  $\text{gm}^2$  a été calculée pour une période d'exposition de dix mois (février à décembre). Plus la densité de poussière est élevée, moins la quantité de rayonnement solaire est transmise à travers le couvercle en verre du module aux cellules solaires [51].

### II.4.3 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 [52].

### II.4.4 L'effet du vent de sable sur la durée de vie des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques ont une durée de vie technique allant de 25 à 30 ans. Avec l'amélioration de la technologie de fabrication, la durée de vie des panneaux solaires peut atteindre 40 ans [53].

Il existe plusieurs les raisons qui affectent la durée de vie des panneaux photovoltaïques. Le premier est les dommages physiques causés par le vent, la grêle et le sable, par exemple, des branches tombées en raison des conditions météorologiques. La deuxième raison est la diminution continue des performances d'environ 0,5% à 3% par an en raison des cycles thermiques, de l'humidité et de l'exposition aux rayons ultraviolets. Habituellement, ce déclin est le principal facteur limitant la durée de vie de la plaque à 20-30 ans [54].

Les panneaux photovoltaïques ont un verre de protection qui protège les cellules solaires qui convertissent le rayonnement solaire en énergie électrique. Cependant, ce verre n'est pas suffisant pour protéger complètement les cellules car il est exposé aux dommages. Les dommages permanents causés par l'effet de sable sont un autre obstacle majeur à l'efficacité des panneaux solaires photovoltaïques. Les dommages mécaniques sont principalement causés par l'interaction du sable et de la surface (effet de sable). Il a été démontré que l'effet du sable affecte non seulement la résistance mécanique de la surface et sa durabilité, mais peut également entraîner une perte de transmission optique par la formation de distorsions et de fissures locales qui réduisent la transmission lumineuse [55].

Les dommages causés par les vents sableux sur les surfaces des panneaux, notamment des cellules solaires, se traduisent par une diminution du rendement des panneaux, et limitent ainsi la durée de vie de ces panneaux.



Figure II.5 : Photo de panneaux photovoltaïques endommagés par un vent de sable [55].

#### II.4.5 Particules de sables sur la surface du panneau

L'accumulation de grains de sable sur la surface du module photovoltaïque, comme illustré dans la figure II.6, entraîne l'occultation d'une ou de plusieurs cellules. Dans ces conditions, la cellule ombrée ne peut délivrer qu'un courant limité. Elle fonctionne alors en mode récepteur, à l'inverse des autres cellules non occultées du module qui délivrent un courant supérieur à ce courant limite. Ce fonctionnement en mode récepteur provoque un échauffement de la cellule, appelé "point chaud" (hot spot). Cet échauffement peut causer des dommages irréversibles, tels que la détérioration des contacts et de la couche antireflet, visibles à l'œil nu sous la forme d'une coloration brune de la cellule [56].



Figure II.6 : Accumulation de particule de sable sur un module [56].

Pour remédier à ce phénomène, il faut installer des diodes by-pass. Tel qu'indiquée sur la figure (II.7). Dans cette situation, les diodes de by-pass jouent leurs rôles en devenant passantes quand la somme totale des tensions des cellules devient négative, dérivant ainsi le courant en excès pour la cellule ombrée [57].

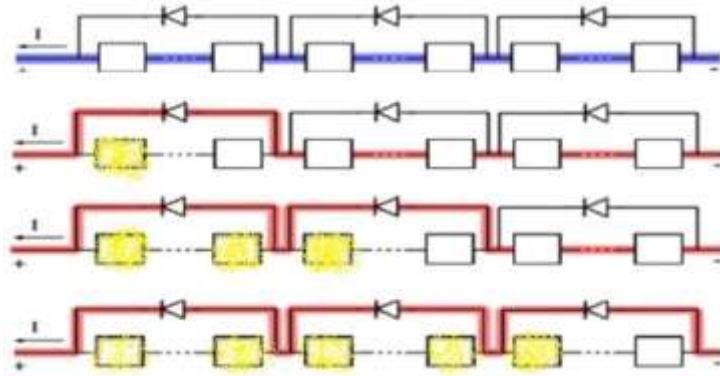


Figure II.7 : Écoulement du courant dans les cellules PV avec diodes de by-pass pour les cellules occultées [57].

### II.5 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 type de dégradation, au fil du temps, le verre de couverture, principalement composé de silice, réagit avec les acides ou les bases. Cela entraîne une surface inégale du couvercle en verre et une augmentation de la réflexion diffuse. Cette inégalité et cette augmentation de la réflexion diffuse détruisent l'uniformité de la diffusion de la lumière solaire dans le couvercle en verre, affectant ainsi la capacité de production photovoltaïque [58].

### II.6 Approche d'évaluation des performances du module PV

Les courbes caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  des modules photovoltaïques (PV) reflètent l'état de fonctionnement et constituent un indicateur important pour mesurer les performances de production d'énergie. Les caractéristiques de sortie du PV sont non linéaires et dépendent du

rayonnement solaire, de la température ambiante et de la charge. Seulement sous une certaine valeur de tension de sortie, la puissance de sortie du générateur PV peut atteindre la valeur maximale, correspondant au point de fonctionnement maximal ( $P_{max}$ ) 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 [58].

Outre les courbes caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$ , deux autres paramètres importants pour évaluer la performance photovoltaïque sont l'efficacité de conversion ( $\eta$ ) et le facteur de forme (FF). L'efficacité de conversion représente l'efficacité du module photovoltaïque à convertir l'énergie solaire absorbée en électricité. C'est un facteur crucial dans l'évaluation des performances des cellules solaires. Cette efficacité de conversion dépend de divers facteurs tels que les conditions d'ensoleillement, les matériaux, la température des particules, l'environnement de rayonnement et la température du système photovoltaïque [58].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100\% \quad (\text{II.3})$$

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (\text{II.4})$$

$I(V)$  : le courant de la cellule photovoltaïque en fonction de la tension aux bornes.

$P_{max}$  : la puissance maximale délivrée par la cellule.

$P_{in}$  : la puissance lumineuse incidente.

$\eta$  : le rendement de conversion en puissance.

FF : le facteur de forme de la courbe caractéristique de la cellule.

$V_{OC}$  : la tension de circuit ouvert de la cellule.

$I_{SC}$  : le courant de court-circuit de la cellule.

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

$$\eta_{module} = \frac{P_{max}}{G \times S} \quad (\text{II.5})$$

$\eta_{module}$ : l'efficacité de conversion du module photovoltaïque.

$P_{max}$  : la puissance maximale délivrée par le module photovoltaïque.

$G$  : l'irradiance solaire incidente (en watts par mètre carré).

$S$  : la surface de la cellule photovoltaïque (en mètres carrés).

## **II.7 Conclusion**

Les panneaux photovoltaïques sont des outils cruciaux dans la transition vers une énergie plus propre et renouvelable. En explorant différents types de panneaux et en identifiant certains

défauts tels que le mis match et les arcs électriques etc... Nous avons compris les défis techniques à surmonter. Cependant, malgré ces obstacles, l'innovation et la recherche continuent de perfectionner ces technologies, rendant les panneaux photovoltaïques de plus en plus efficaces et fiables. En outre, nous avons examiné l'impact des conditions environnementales telles que la poussière et le vent de sable sur leurs performances. Il est crucial de rechercher des solutions pour remédier aux défauts des panneaux photovoltaïques, car ces défauts peuvent compromettre l'efficacité énergétique des installations solaires.



## CHAPITRE III

### Méthodologie pour diagnostic des Centrales photovoltaïques

**III.1 Introduction**

Dans le paysage énergétique en constante évolution, les panneaux photovoltaïques et les systèmes photovoltaïques jouent un rôle crucial dans la transition vers une production d'énergie plus propre et durable. Cependant, pour garantir leur fiabilité et leur efficacité à long terme, il est essentiel de surveiller et de diagnostiquer régulièrement leur état de santé. Les panneaux photovoltaïques, constituant les composants de base des systèmes photovoltaïques, ainsi que ces derniers sont soumis à diverses sources de défaillance potentielles, telles que les défauts de composants, les variations environnementales et les interférences externes. Face à ces défis, la détection précoce et le diagnostic précis des anomalies sont devenus des éléments essentiels de la gestion proactive de ces installations.

**III.2 Système de diagnostic**

Le diagnostic était à l'origine utilisé dans le domaine médical. Ce terme signifie le raisonnement conduisant à l'identification de la cause (origine) d'une défaillance, d'un problème ou d'une maladie sur la base de caractéristiques ou de symptômes constatés par des observations, des contrôles ou des tests (il s'agit donc d'acquérir des connaissances par des signes observables), comme dans son sens médical, le diagnostic des systèmes industriels est une procédure qui consiste à détecter et localiser un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique. Il a pour objet de trouver la cause d'une défaillance. Nous adopterons la définition qui a été retenue par les instances de normalisation : (L'Association Française de Normalisation (AFNOR) et la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) ont défini avec précision les vocabulaires à utiliser dans les différents secteurs industriels [59]: ' Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test ''.

**III.3 Etapes du diagnostic**

La procédure du diagnostic de défaillances et de dégradations susceptibles d'affecter les différentes entités d'un processus industriel s'articule autour des étapes suivantes [60].

**III.3.1 Acquisition des données**

Cette fonction doit fournir une image du procédé. Les fonctions suivantes doivent être réalisées.

- Conditionnement et prétraitement du signal
- Validation du signal de mesure.

### III.3.2 Détection

La détection est le premier niveau du diagnostic consiste à prendre une décision binaire : soit le système fonctionne correctement, soit une panne s'est produite. Le résultat de la procédure de détection est une alarme signifiant que le fonctionnement réel du système ne concorde plus avec le modèle de fonctionnement sain.

### III.3.3 Localisation

C'est le deuxième niveau du diagnostic, déclenché par une procédure de détection, consistant à déterminer de manière plus approfondie les composants défectueux : capteur, actionneur, processus ou unité de commande.

### III.3.4 Identification

L'identification d'un défaut est le fait d'estimer l'amplitude et l'évolution temporelle du défaut afin d'expliquer au mieux le comportement du système. Cette partie d'identification du défaut est la dernière phase de la procédure de diagnostic.

### III.3.5 Prise de décision

Une fois le fonctionnement incorrect du système constaté, il est primordial d'agir de façon à maintenir les performances souhaitées ou à limiter les dégradations sur le système réel. Cette prise de décision permet de choisir entre plusieurs options comme arrêter le système pour faire de la maintenance ou accepter un fonctionnement dégradé. Il peut encore s'agir, quand cela est possible, de reconfigurer ou de réorganiser le système [60].



Figure III.1 : Organigramme de diagnostic des défauts [61].

### III.4 Performance d'une procédure de diagnostic

D'une manière générale un système de diagnostic se caractérise par quatre caractéristiques principales : détectabilité, isolabilité, sensibilité et robustesse. En fonction de ces quatre

## **Chapitre III Méthodologie pour diagnostic des centrales photovoltaïques**

caractéristiques, nous pouvons comparer les diverses approches de diagnostic ainsi de distingué la meilleure méthode convenable pour notre système [62].

### **III.4.1 Déteçtabilité**

C'est l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir déceler la présence d'une défaillance sur le procédé. Elle est fortement liée à la notion d'indicateurs de défauts (résidus) : le générateur de résidu doit, d'une certaine manière, être sensible à la défaillance que l'on souhaite détecter.

### **III.4.2 Isolabilité**

C'est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut. Une alarme engendre bien souvent de nouvelles alarmes et il devient dès lors difficile de retrouver l'organe défaillant. La propriété d'isolabilité est liée à la structure des résidus et à la procédure de détection elle-même.

### **III.4.3 Sensibilité**

Elle caractérise l'aptitude du système à détecter des défauts d'une certaine amplitude. Elle dépend non seulement de la structure des résidus mais aussi du rapport de l'amplitude du bruit de mesure avec celle du défaut.

### **III.4.4 Robustesse**

Elle détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation (sensibilité du résidu aux défauts et insensibilité vis à vis des perturbations). Généralement, la robustesse est définie par rapport à toutes les entrées inconnues. En pratique, d'autres critères sont à prendre en considération. En phase d'industrialisation, les contraintes ergonomiques et économiques sont essentielles. La rapidité de détection peut être un facteur déterminant. De même, les coûts économiques vont conditionner la stratégie de diagnostic : le système nécessite-t-il des composants trop chers pour sa conception, le temps de développement est-il trop important.

## **III.5 Architecture de diagnostic**

Les principaux objectifs de la surveillance du système PV sont la détection de la défaillance, l'évaluation de la performance et l'assurance du bon fonctionnement du système. Ceci nécessite des données électriques et environnementales à des panneaux photovoltaïques. Pour atteindre ces objectifs, des composants dédiés, tels que les capteurs, l'acquisition de données systèmes, les systèmes de communication de données et le logiciel dédié et les algorithmes pour l'analyse de données sont utilisés [63].

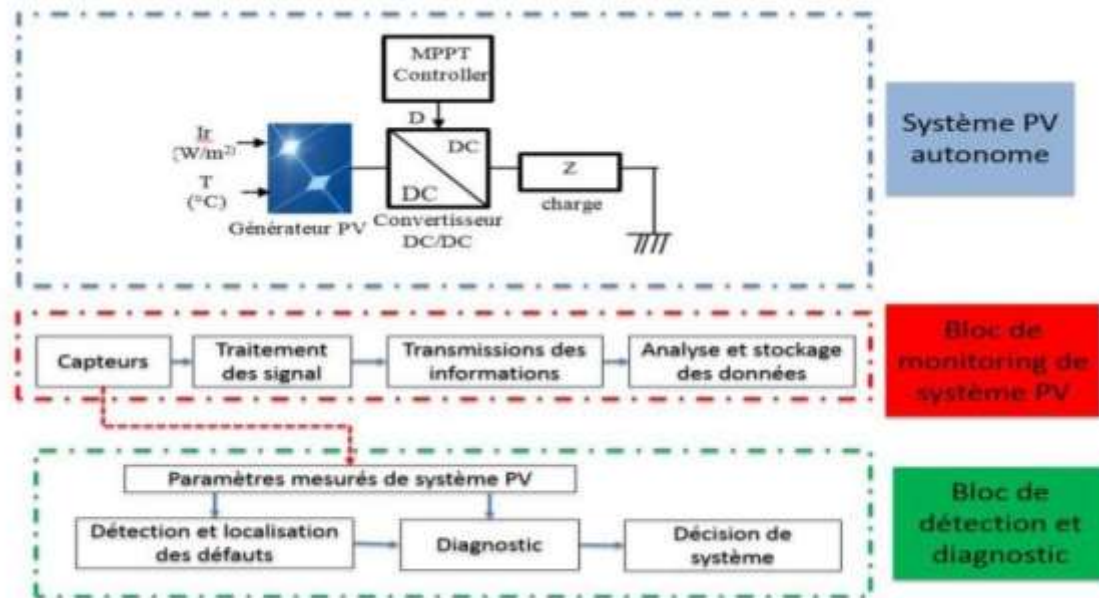


Figure III.2 : Schéma global de détection et de diagnostic des défauts [61].

### III.6 Méthodes de diagnostic d'une installation PV

Le contrôle de performances régulières sur le fonctionnement des systèmes PV connectés au réseau sont nécessaires pour Assurer une production d'énergie Fiable et optimale. L'objectif est la détection précoce de défaut dans les systèmes PV et Changer les conditions de fonctionnement pour empêcher les pertes d'énergie et financières subséquentes pour l'opérateur. Ainsi, un system simple et sûr à Manipuler à long terme pour vérifier les Performances et l'état du système PV est nécessaire pour garantir la sécurité de ce Dernier et réduire les pertes. Le but des Systèmes de diagnostics est non seulement la détection des dysfonctionnements, mais aussi la mise à disposition des informations sur la source de défaillance la plus probable [64].

#### III.6.1 Méthodes de diagnostic courants industrialisées

On peut distinguer deux catégories de méthodes de diagnostic courantes industrialisées : des méthodes reposant sur l'analyse du courant et de la tension (que nous appellerons méthodes électriques) et des méthodes reposant sur l'analyse d'autres grandeurs que I et V (que nous appellerons méthodes non-électriques) [65].

##### III.6.1.1 Méthodes non –électriques

Cette catégorie de méthodes est principalement destinée à la détection de la fissure. On peut citer comme méthodes : les essais mécaniques de flexion, l'imagerie par photoluminescence et électroluminescence. Dans notre cas (diagnostic des modules PV) l'imagerie infra rouge et réflectométrie sont les plus répandus [65].

###### III.6.1.1.1 Méthode de l'imagerie numérique infrarouge thermique

Les inspections visuelles et l'analyse de l'imagerie infrarouge et thermique pour la détection et la localisation des défauts sont classées comme des méthodes non électriques. Ces méthodes

### **Chapitre III Méthodologie pour diagnostic des centrales photovoltaïques**

n'exigent pas de données électriques mesurées du système PV. Les méthodes visuelles et thermiques sont utilisées spécifiquement pour détecter la décoloration, le brunissement, les salissures, points chauds, rupture et délaminage des modules PV. L'inspection visuelle des modules est longue et ne convient pas aux systèmes PV à grande échelle [66].

Les méthodes de détection des défauts thermiques et infrarouges dépendent généralement aux équipements (caméras thermiques ou infrarouges, drones, etc.) et Les vitesses de détection sont basées sur la fréquence de la surveillance des plantes. Ces méthodes sont révélées efficaces, mais elles ne sont pas adaptées aux installations photovoltaïques de petite échelle [67].

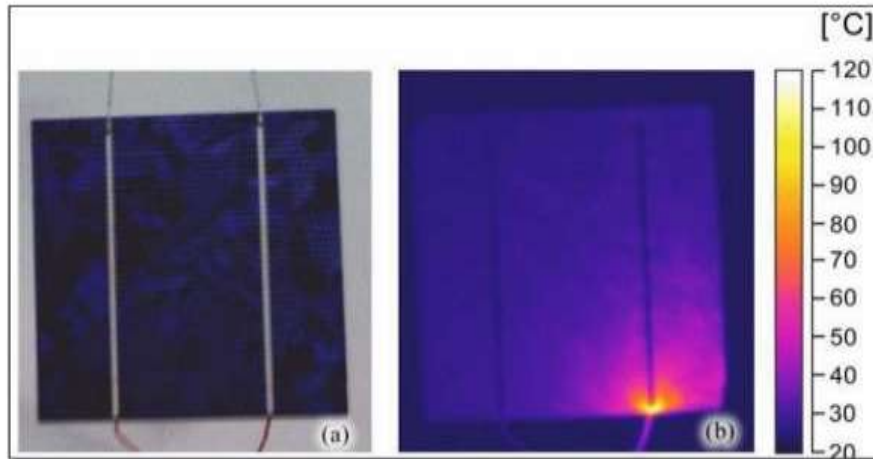


Figure III.3 : Exemple de la localisation de défauts par la caméra thermique [68].

#### **III.6.1.2 Méthodes électriques**

Les systèmes de monitoring actuels d'un système PV sont essentiellement intégrés aux onduleurs. Dans ce cadre, les données mesurées sont souvent les mêmes d'un système à l'autre. Les grandeurs mesurées les plus courantes sont [65] :

- Le courant débité par le champ PV
- La tension aux bornes du champ PV
- La résistance d'isolement entre les bornes positive et négative du champ PV

Il est aussi possible d'ajouter les grandeurs complémentaires que sont la température ambiante du site et l'ensoleillement aux mesures électriques. Ces données nécessitent un capteur spécifique (sonde de température et cellule de référence). Il convient, dans le cas où ces grandeurs sont nécessaires, de les traiter à l'aide d'un automate spécifique. Cet automate est relié à l'onduleur et centralise la totalité des données afin de les enregistrer et/ou de les envoyer sur un serveur distant.

Les mesures du côté AC sont plus importantes en nombre car directement liées à l'énergie qui sera vendue. Il est courant de relever :

- Le courant AC

- La tension AC
- La fréquence
- L'impédance du réseau vue par l'onduleur

Des mesures décrites dans les deux paragraphes précédents, il est aisé de déduire :

- La puissance instantanée DC
- La puissance instantanée AC
- L'énergie produite sur différentes périodes (suivant la capacité de stockage des données) côtés DC et AC

Ces données sont calculées directement par le microcontrôleur embarqué dans l'onduleur ou par l'automate associé. On y ajoute souvent :

- La durée de fonctionnement de l'onduleur
- La date de mise en service
- Le CO<sub>2</sub> non rejeté dans l'atmosphère (« économisé »)
- Les alertes de défaillance du système (principalement les défauts d'isolement)

On voit que les produits existants offrent des fonctions pour l'exploitation d'une centrale (exploitation limitée à de la mesure du productible). Les informations peuvent être traitées localement ou à distance, sur une ou plusieurs installations.

### **III.6.2 Méthodes dans la littérature**

De nombreuses méthodes de diagnostic ont été proposées pour détecter et localiser les défauts dans un système PV. Nous résumons dans cette partie les différentes méthodes proposées [65].

#### **III.6.2.1 Méthode de réflectométrie**

La méthode de réflectométrie est une méthode de diagnostic qui consiste à envoyer un signal dans le système ou le milieu à diagnostiquer. Ce signal se propage selon la loi de propagation du milieu étudié et lorsqu'il rencontre une discontinuité, une partie de son énergie est renvoyée vers le point d'injection. L'analyse du signal réfléchi permet de déduire des informations sur le système ou le milieu considéré. Cette méthode a été également appliquée pour détecter le défaut dans un string photovoltaïque [69,70].

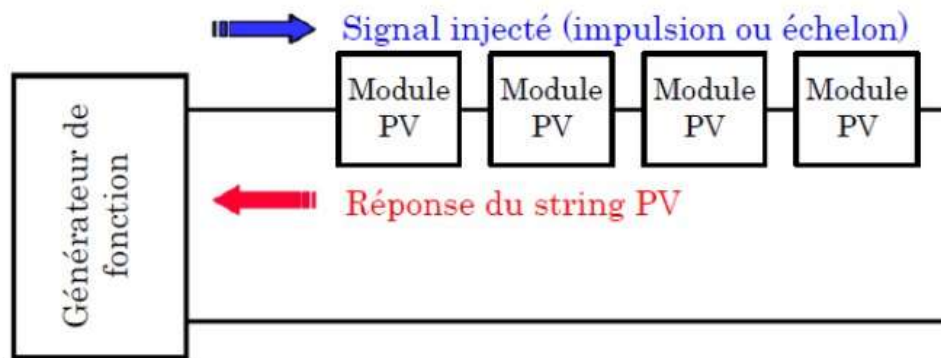


Figure III.4 : Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV [65].

Un signal de type d'échelon ou d'impulsion est injecté dans le string PV qui consiste en une série de modules connectés par des câbles. L'étude expérimentale menée par [69,70] a confirmé la possibilité de localiser la position de défaut de type « circuit ouvert », « court-circuit » et « augmentation d'impédance » dans le string.

### III.6.2.2 Mesure de tension/courant

Cette technique est basée sur les mesures des signaux électriques, qui sont la tension et le courant. Hirata et al., (2011) ont développé une fonction de diagnostic qui permet d'obtenir les courbes I (V) des PV modules de la même branche pour détecter automatiquement certaines défaillances [71].

Kaplanis et al., (2011) ont calculé de facteur de forme (FF), les résistances série et parallèle à partir de la courbe I (V) [72].

### III.6.2.3 Analyse des pertes de puissance

L'analyse des pertes de puissance dans le PV système revient à déterminer les pertes de puissance qui sont calculées en comparant les données mesurées aux résultats simulés. Chouder et al., (2010), ont proposé une méthode de détection, de supervision et de défaut sur la base des analyses de pertes de puissance [73].

Silvestre et al., (2013) ont utilisé les ratios de tension et de courant dans l'algorithme de détection de pannes et ce en mesurant les pertes capturées dans un système PV [74].

### III.6.2.4 Analyse du point de fonctionnement

Outre la comparaison de la puissance ou de l'énergie produite actuelle et celle attendue, la comparaison du point de la puissance maximale actuel (courant et tension correspondant à la puissance maximale) et celui attendu peut apporter plus d'information sur l'état du système PV [75].

La comparaison relationnelle entre ces courants et entre ces tensions donne deux couples de valeur binaire (0 ou 1). Suivant la combinaison de ces deux couples, la nature des problèmes du champ PV peut être identifiée. Les quatre familles de problèmes sont les suivantes :

- Modules défectueux dans un string
- String défectueux
- Famille de défauts non discriminables : ombrage, erreur de MPPT, vieillissement  
Fausses alarmes.

### III.6.2.5 Analyse de la caractéristique statistique

Nous avons vu précédemment qu'un champ photovoltaïque peut être décrit par sa caractéristique statique courant/tension (caractéristique I-V). La modification d'une telle caractéristique peut être espérée lorsque qu'il y a un changement de l'état du champ PV provoqué par un changement de la condition de fonctionnement (ensoleillement et température) ou par une apparition d'un ou de plusieurs défauts dans le champ. La Figure III.5 montre l'allure d'une caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant (ombrage sur des cellules) comparée avec celle en fonctionnement normal [75].

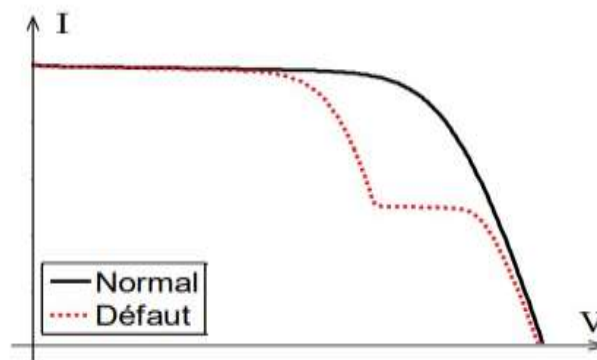


Figure III.5 : Allure d'une caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant [65].

L'utilisation de la caractéristique I-V pour détecter et localiser les défauts a été menée dans très peu de travaux. Par contre, l'analyse dans le sens inverse a été effectuée par de nombreuses études. Une telle analyse consiste à étudier l'impact des différents défauts (dans la cellule, module, string et champ) sur la performance du champ PV, donc sur la caractéristique I-V de celui-ci [76].

**III.6.2.6 Technique d'intelligence artificielle**

Cette technique est appliquée pour la DCD. Elle se base sur l'apprentissage qui permet des nouvelles conditions correspondant à un type de données particulier. (Schapire, 2008). Diverses techniques pour la DCD basées sur l'intelligence artificielle (IA) ont été citées dans la littérature.

Parmi ces articles, on peut citer, Shah et al., (2016) ont traité les défauts liés à l'ombrage en utilisant l'algorithme de la logique floue, 'LF' [77]. Zhou et al., (2015) avait présenté un contrôleur basé sur la logique floue, 'LF' pour atteindre le MPP [78]. Liu et al., (2014) ont utilisé le réseau de neurones artificiel (ANN) les différents défauts liés au fonctionnement du champ PV [79].

**III.7 Méthodes de classification supervisées pour la détection et le diagnostic**

De nos jours, les procédés étant de plus en plus automatisés, ils nous fournissent de plus en plus de données, principalement récupérées par les capteurs. Beaucoup de données sont récupérées lorsque le procédé est en fonctionnement normal, mais également lorsque le procédé subi une défaillance (faute). Lorsque ces défaillances sont diagnostiquées (la cause de la défaillance est identifiée), on peut catégoriser les données récoltées suivant les différentes causes associées aux dysfonctionnements. Lorsque les différentes fautes ne sont pas diagnostiquées, on peut tout de même réaliser une catégorisation par recherche de classes (cluster analysis). Lorsque nous représentons graphiquement les données des différentes fautes, on peut alors chercher à dresser au mieux des frontières entre les différentes classes afin de définir les régions de chaque faute comme illustré sur la figure III.6 : [76]

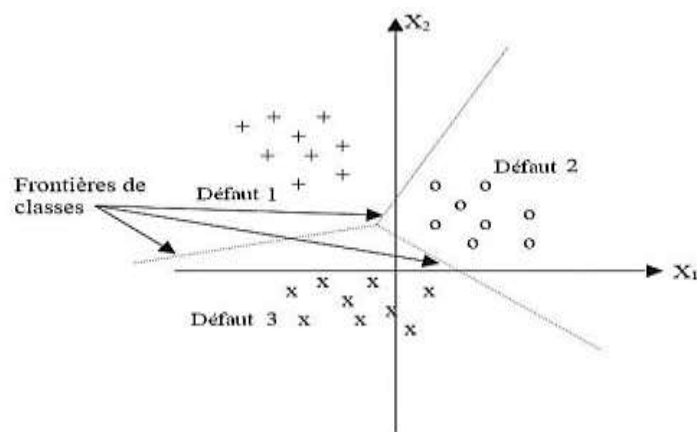


Figure III.6 : Exemple de frontières de classes [76].

Lors de l'apparition d'une nouvelle anomalie (supposée détectée), en la représentant graphiquement, on voit tout de suite à quelle région d'anomalie elle appartient et on peut ainsi diagnostiquer cette nouvelle observation hors-contrôle. L'attribution d'une classe à une nouvelle observation est l'un des buts de la reconnaissance de forme (ou classification).

Maintenant que nous avons étudié la classification supervisée, nous allons voir les différentes méthodes (appelées classifieurs) permettant de réaliser une telle tâche. Il n'y a pas de classifieurs meilleurs que d'autres sur toutes les applications. Il est donc utile de connaître les différents classifieurs utilisables, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Bien que la liste des classifieurs présentés ici ne soit pas exhaustive, elle comporte tout de même la majorité des classifieurs les plus performants [76].

### III.7.1 Les séparateurs à vaste marge

Les SVM (Support Vector Machines) ou Machines à Vecteurs Supports, ou bien encore Séparateurs à Vaste Marge, sont des outils modernes permettant la classification et la régression de données. Nous étudions ici leur application à la classification supervisée. Les SVM sont des classifieurs binaires, ils ne peuvent différencier que deux classes d'individus. De plus, les variables descriptives du problème doivent être des variables continues. Pour un jeu de données avec deux classes, le but d'un séparateur à vaste marge est de trouver un classifieur séparant les données et maximisant la distance entre ces deux classes. Ce classifieur linéaire est appelé hyperplan 1 [80].

Dans la figure III.7, on détermine un hyperplan séparant les deux ensembles de points. Les points les plus proches sont appelés vecteurs de support. Il est évident qu'il existe une multitude d'hyperplans valides mais la propriété remarquable des séparateurs à vaste marge est que cet hyperplan doit être optimal. Nous cherchons donc parmi les hyperplans valides, celui qui passe "au milieu" des points des deux classes d'exemples. Intuitivement, cela revient à chercher l'hyperplan "le plus sûr".

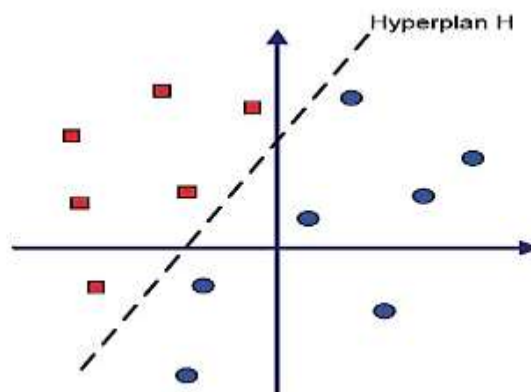


Figure III.7 : Séparation des données par l'hyperplan H [76].

#### **Remarque**

Dans un espace à une dimension, le séparateur linéaire sera un point. Dans un espace à deux dimensions, le séparateur sera une droite. Dans un espace à trois dimensions, le séparateur sera un plan. Dans un espace de dimension supérieur à 3, le séparateur sera nommé hyperplan. Mais

pour plus de simplicité, peu importe la dimension de l'espace, nous appellerons le séparateur hyperplan [76].

#### III.7.2 Les k plus proches voisins

La méthode des k plus proches voisins (k Nearest Neighborhood), ou kNN, est une technique de discrimination non-paramétrique, c'est à dire qu'aucune estimation de paramètres n'est nécessaire à son exécution. Cette technique de classification est plutôt ancienne puisqu'elle date d'environ 1950. Cette méthode s'emploie sur des données continues. Il est également possible de prendre en compte des données binaires (variable discrète à 2 modalités), mais pas multinomial (variable discrète avec plus de 2 modalités) [81].

L'idée de cette méthode est d'observer les k plus proches voisins d'une nouvelle observation afin de décider de la classe d'appartenance de cette nouvelle observation. Pour une nouvelle observation à classer, cet algorithme calcule la distance entre cette nouvelle observation, et chaque observation présente dans un ensemble d'apprentissage. On sélectionne les k voisins ayant la distance la plus faible avec la nouvelle observation. Au vu des classes d'appartenance des k plus proches voisins, on décide de la classe d'appartenance du nouvel individu. Généralement, on attribue la classe du nouvel individu comme étant la classe la plus représentée parmi ses k plus proches voisins. Pour illustrer cette règle, un exemple de classification de deux classes en deux dimensions est proposé sur la figure III.8.

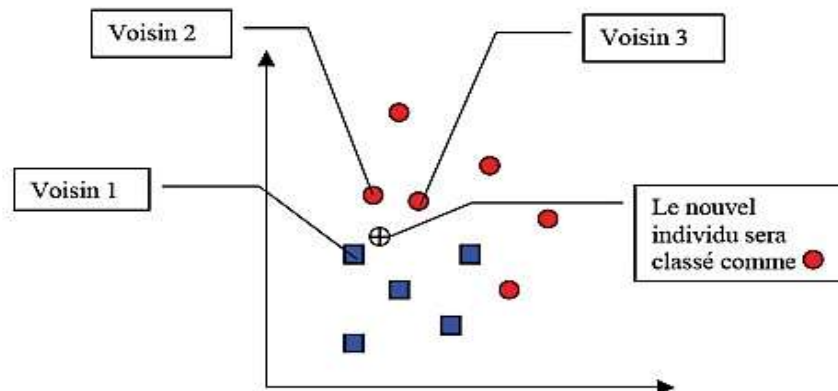


Figure III.8 : Exemple d'une attribution avec la règle des 3 plus proches voisins [76].

#### III.7.3 Les arbres de décision

Un outil reconnu de discrimination entre plusieurs classes est l'arbre de décision. L'intérêt principal des arbres de décision est qu'ils peuvent aisément se transformer sous forme de règles compréhensibles. Ainsi, le cheminement (la logique) amenant l'arbre à une décision est très clair pour l'utilisateur [82].

Comme son nom l'indique, un arbre de décision se représente graphiquement sous les traits d'une arborescence (voir figure III.9). La lecture d'un arbre se fait du haut vers le bas. Dès que l'on croise un nœud, une décision est à prendre, représentée par un test sur l'un des attributs du système. Pour chaque test, plusieurs décisions sont possibles. Si l'attribut est binaire, nous avons deux décisions possibles, alors que si l'attribut possède  $k$  modalités, nous avons  $k$  décisions possibles. L'arbre s'étoffe donc en fonction du nombre d'attributs du système, mais également en fonction du nombre de modalités pour chaque attribut. Les nœuds terminaux de l'arbre sont les feuilles de celui-ci, ils représentent la décision finale : la classe d'appartenance pour l'individu dont les observations ont servi aux différents tests de l'arbre.

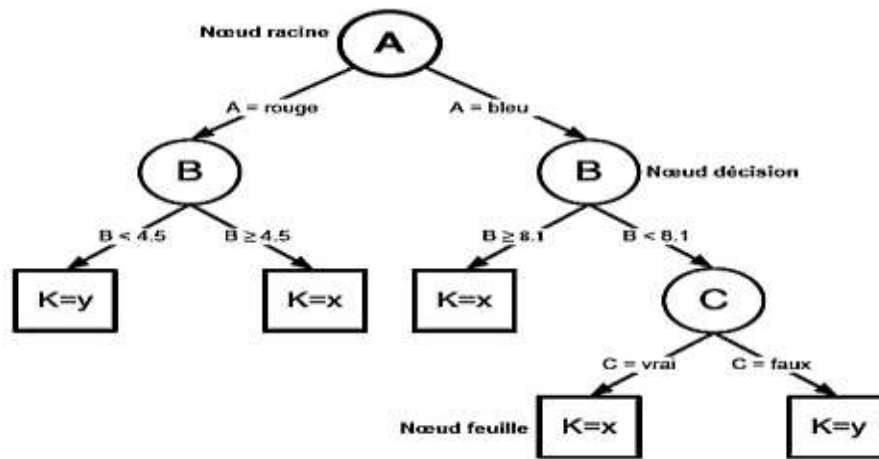


Figure III.9 : Exemple d'un arbre de décision [76].

#### III.7.4 Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels, également appelés réseaux neurone mimétiques, constituent une technique non-linéaire de prédiction de données. Cet outil se veut ressemblant au fonctionnement des réseaux de neurones humains qui sont considérés comme les calculateurs les plus puissants qu'ait réalisés la nature [83]. Pour plus de simplicité, nous les nommerons réseaux de neurones. Mais, avant d'étudier un peu plus les réseaux de neurones, regardons ce qui est considéré comme neurone. Un schéma d'un neurone artificiel est présenté sur la figure III.10.

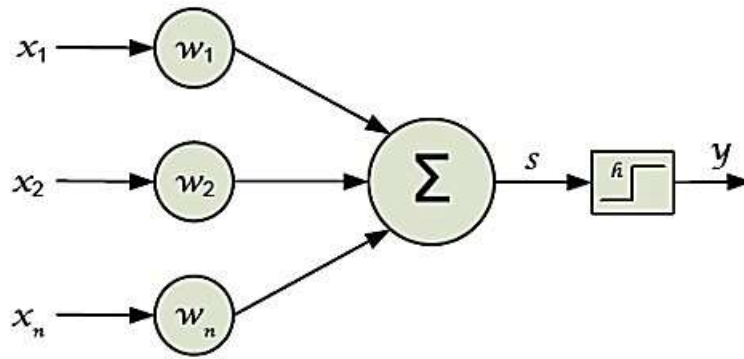


Figure III.10 : Un neurone artificiel [76].

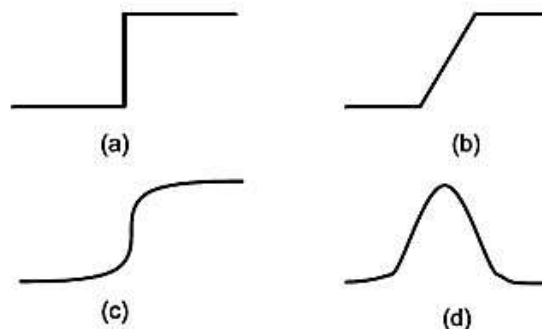
Nous pouvons observer qu'un neurone reçoit une information de la part de plusieurs entrées ( $n$  en l'occurrence) :  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Chaque entrée est pondérée par un poids propre  $w_j$  que l'on nomme poids synaptique (en référence aux synapses du neurone naturel). Le neurone effectue la somme de toutes ces entrées pondérées. Nous nommons  $s$  cette somme.

$$\sum_{i=1}^n w_i x_i \quad \text{III.1}$$

La somme  $s$  représente l'état interne du neurone. Elle est transmise à une fonction de transfert nommée fonction d'activation  $h$ . La sortie de cette fonction donne la sortie générale du neurone  $y$ . Le fonctionnement du neurone peut donc simplement s'écrire sous la forme de l'équation III.2.

$$y = h\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i\right) \quad \text{III.2}$$

Un neurone permet de modéliser une quantité considérable de comportements suivant les poids synaptiques  $w_i$  qu'il possède mais également suivant la fonction d'activation qu'il renferme. Différentes fonctions d'activation peuvent être utilisées [84], mais les principales sont représentées sur la figure III.11.

Figure III.11 : Les différentes fonctions d'activation  $h$  : (a) fonction à seuil, (b) fonction linéaire, (c) fonction sigmoïde, (d) fonction gaussienne [76].

**III.8 Choix d'un classifieur pour la surveillance des procédés**

Le tableau III.1 permet de mettre en évidence les avantages et les inconvénients des différents classifieurs décrits auparavant : [76]

- ❖ ++ : signifie que le classifieur permet de prendre en compte ce critère.
- ❖ + : signifie que le classifieur permet de prendre en compte ce critère sous certaines conditions.
- ❖ - - : signifie que le classifieur ne permet pas de prendre en compte ce critère.

Classifieurs	Séparateur a vaste Marge	K plus proches voisins	Arbre de Décision	Réseaux de Neurones
Gère un grand nombre de classe	--	+	+	++
Nombre d'observations nécessaire faible	--	++	+	+
Temps d'apprentissage correct	--	++	+	+
Temps de calcul admissible	+	--	++	++
Nombre de paramètre à régler faible	--	+	++	+
Gère des données manquantes	+	+	+	++
Corrélation entre les variables	++	++	++	++
Gère certaines non-linéarités	++	++	++	++
Information redondante	+	+	+	+
Prise en compte du temps	+	+	+	+
Adaptabilité : facile de réadapter l'outil	+	+	+	+
Tolérance correcte au bruit	++	++	--	++

Tableau III.1 : Tableau comparatif des différents classifieurs [76].

**Remarque**

A travers le tableau ci-dessus, on peut voir clairement que les réseaux de neurones possèdent de nombreux avantages dans le domaine de la classification [76].

**III.9 Conclusion**

Dans notre exploration du diagnostic des installations photovoltaïques, ce chapitre nous a plongés dans un monde d'ingéniosité et d'innovation. En explorant les étapes, la procédure et l'architecture du système de diagnostic, nous avons tracé un chemin vers l'excellence en matière de maintenance et de performance des installations photovoltaïques.

Au fil de notre exploration, nous avons dévoilé un éventail de méthodes de diagnostic. Parmi elles, les méthodes courantes industrialisées telles que les méthodes non-électriques ont offert des solutions pratiques et largement utilisées dans l'industrie. Parallèlement, des avancées révolutionnaires dans la littérature, comme la réflectométrie et l'analyse du point de fonctionnement..., ont ouvert de nouvelles perspectives pour le diagnostic.

### **Chapitre III                      Méthodologie pour diagnostic des centrales photovoltaïques**

En dernier lieu, nous avons exploré les méthodes de classification supervisées, qui représente une avancée significative dans la détection et le diagnostic des anomalies. Cette approche, basée sur l'apprentissage automatique, permet une analyse intelligente des données.

L'étude de ces différentes méthodes de classification a été menée afin de choisir la méthode la plus adaptée pour analyser la variation dynamique des lieux du point de puissance maximale en fonctionnement sain et défaillant. La méthode de classification par les réseaux de neurones probabilistes a été considérée comme la méthode la plus adaptée.



## CHAPITRE IV

Application au diagnostic et résultats

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons simuler les performances d'un générateur photovoltaïque (GPV) soumis à divers défauts. Nous examinons les effets de quatre types de défauts spécifiques : l'ombrage partiel, la dégradation de la résistance série ( $R_s$ ), la dégradation de la résistance shunt ( $R_{sh}$ ) et le court-circuit. Ces simulations nous aideront à comprendre l'impact de ces défauts sur l'efficacité et la fiabilité du système PV, en tenant compte de différentes conditions météorologiques.

### IV.2 Outils et Matériels

MATLAB Simulink est un environnement de simulation et de modélisation graphique intégré à MATLAB, utilisé pour la modélisation, la simulation et l'analyse de systèmes dynamiques multi domaines. Grâce à sa bibliothèque de blocs fonctionnels préconstruits, Simulink permet de créer des schémas de simulation en assemblant visuellement des composants et des signaux, facilitant ainsi la conception et la vérification de systèmes complexes. Dans le cadre de ce mémoire, MATLAB Simulink a été utilisé pour modéliser et simuler un système photovoltaïque, en générant des courbes de résultats détaillées.

### IV.3 Simulation d'un Système Photovoltaïque

Le schéma bloc du système PV étudié est représenté dans la figure IV.1. La bibliothèque Sim-power-system a été utilisée pour construire la partie puissance, composée du panneau photovoltaïque, de l'hacheur Boost et de la charge. La partie contrôle est basée sur l'algorithme MPPT utilisant la méthode de perturbation et observation (P&O), qui fait partie des techniques les plus fréquentes dans la littérature. En outre, nous nous intéresserons particulièrement à la simulation du générateur photovoltaïque pour évaluer ses performances et son comportement sous différentes conditions de fonctionnement.

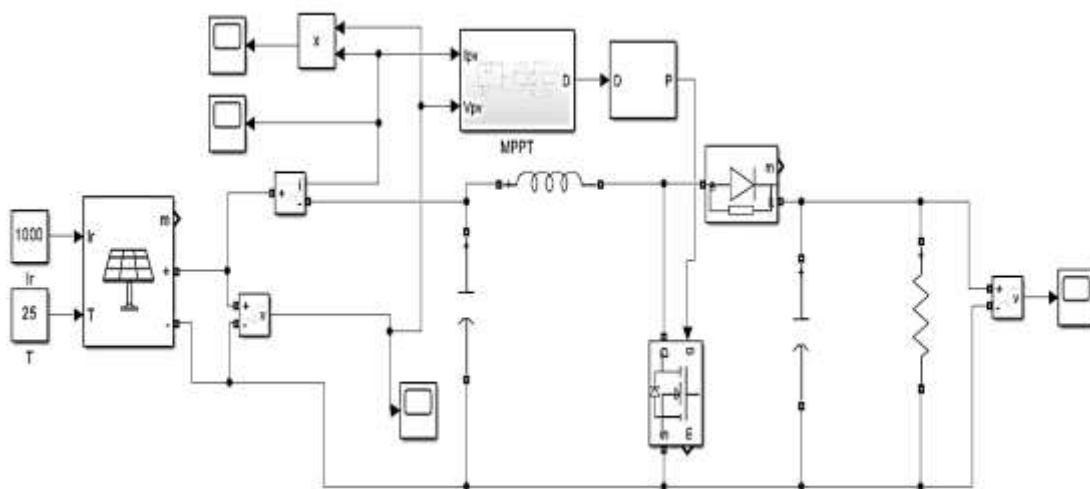


Figure IV.1 : Schéma bloc d'un système PV.

### IV.3.1. Choix et caractérisation du module photovoltaïque numéro 1

Pour étudier les caractéristiques du module solaire photovoltaïque Canadian Solar CS6P255P, composé de 60 cellules, une simulation a été réalisée dans l'environnement MATLAB/Simulink. Les spécifications du module sont présentées dans le tableau IV.1, montrant une puissance maximale de 255W à une tension maximale de 30.2V, dans des conditions standards (1000 W/m<sup>2</sup> et 25 °C).

Ce module a déjà été utilisé dans la centrale photovoltaïque d'El Abiodh Sidi Cheikh, située dans la wilaya d'El Bayadh, couvre une superficie de 39 hectares et atteint une puissance de 23,92 MWc. Elle est composée de 12 sous-systèmes de 2 MWc chacun, qui convertissent le courant continu en alternatif pour injection dans le réseau. Chaque sous-système, couvrant 2,5 hectares, utilise 3984 panneaux poly cristallins CS6P 255-P inclinés à 15° vers le sud. Les modules sont connectés en chaînes de 24, regroupées en tables et générateurs, avec des câbles en aluminium et des protections par fusibles [85].

Modèle	Canadian Solar CS6P-255P
<b>Puissance nominale maximale (<math>P_{max}</math>)</b>	255w
<b>Tension en fonctionnement optimal (vmp)</b>	30,2v
<b>Courant en fonctionnement optimal (imp)</b>	8,43a
<b>Tension en circuit ouvert (Voc)</b>	37,4v
<b>Intensité de court-circuit (Isc)</b>	9,00a
<b>Rendement par panneau</b>	15,85%
<b>Température de fonctionnement</b>	- 40°c ~ +85°c
<b>Tension maximale du système</b>	1000v (iec)
<b>Calibre maximal des fusibles en série</b>	15 a
<b>Tolérance de puissance</b>	0 ~ +5w
<b>Dimensions</b>	1638 x 982 x 40 mm

Tableau IV.1 : Caractéristiques du module PV Canadian Solar CS6P-255P [85].

### IV .3.1.1 Caractéristiques du module PV

Les courbes caractéristiques I-V et P-V du générateur Canadian Solar CS6P-255P ont été simulées dans des conditions standards ( $1000 \text{ W/m}^2$  et  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) sont représentés dans les figures suivantes :

➤ La caractéristique  $I = f(V)$  pour  $T=25^\circ\text{C}$  et  $G=1000 \text{ W/m}^2$ .

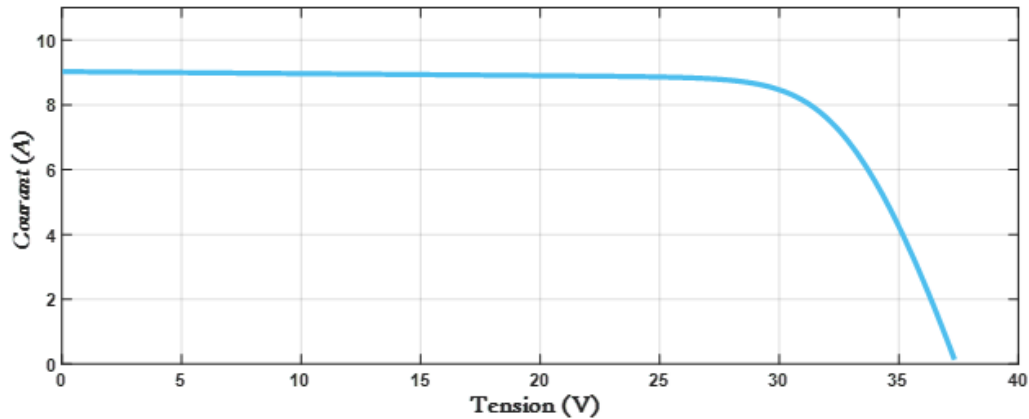


Figure IV.2 : Caractéristique I (V) du module PV.

La figure IV.2 montre que Le courant du module photovoltaïque reste pratiquement constant jusqu'à une tension de 28 V, puis il diminue exponentiellement jusqu'à son annulation. Cette variation du courant est due à la zone de courant constant de la caractéristique du module.

➤ La caractéristique  $P = f(V)$  pour  $T=25^\circ\text{C}$  et  $G=1000 \text{ W/m}^2$ .

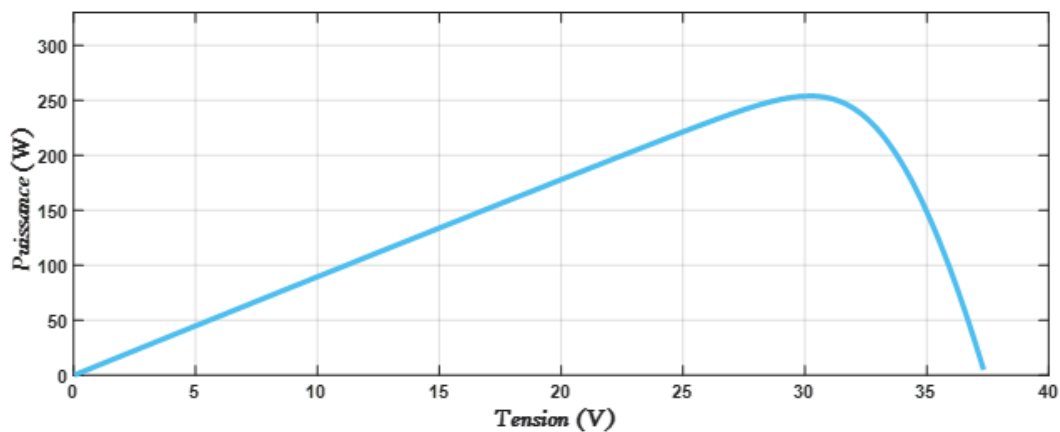


Figure IV.3 : Caractéristique P (V) du module PV.

La figure IV.3 La courbe de puissance du module photovoltaïque présente un point de puissance maximale (MPP) d'environ 255 W, après lequel la puissance décroît progressivement jusqu'à s'annuler. Ce point de puissance maximale correspond au point où le produit tension courant est maximal, ce qui est le point de fonctionnement optimal du module.

### IV .3.1.2 Effet de l'éclairement sur les caractéristiques $I= f (V)$ et $P=f (V)$

À température ambiante constante ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ), nous faisons varier l'éclairement de 400 à 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ .

➤ Effet de l'éclairement sur la caractéristique  $I = f (V)$

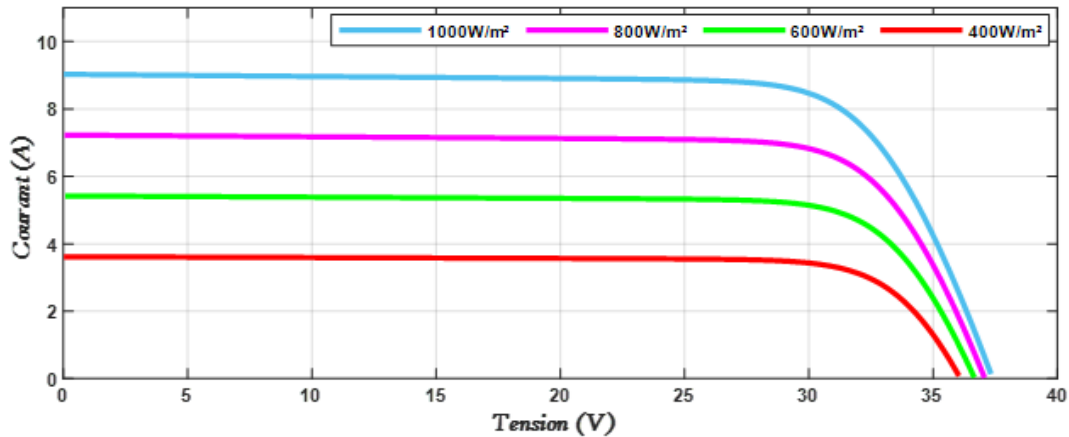


Figure IV.4 : Caractéristique  $I = f (V)$  du module PV.

La figure IV.4 illustre les courbes de la variation du courant en fonction de la tension montrant que la tension en circuit ouvert est complètement insensible à la modification de l'éclairement, restant à environ 2 volts, tandis que le courant subit une transformation radicale, passant de 3.5 ampères pour un éclairement de 400  $\text{W}/\text{m}^2$  à 9 ampères pour un éclairement de 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ .

➤ Effet de l'éclairement sur les caractéristiques  $P = f (V)$

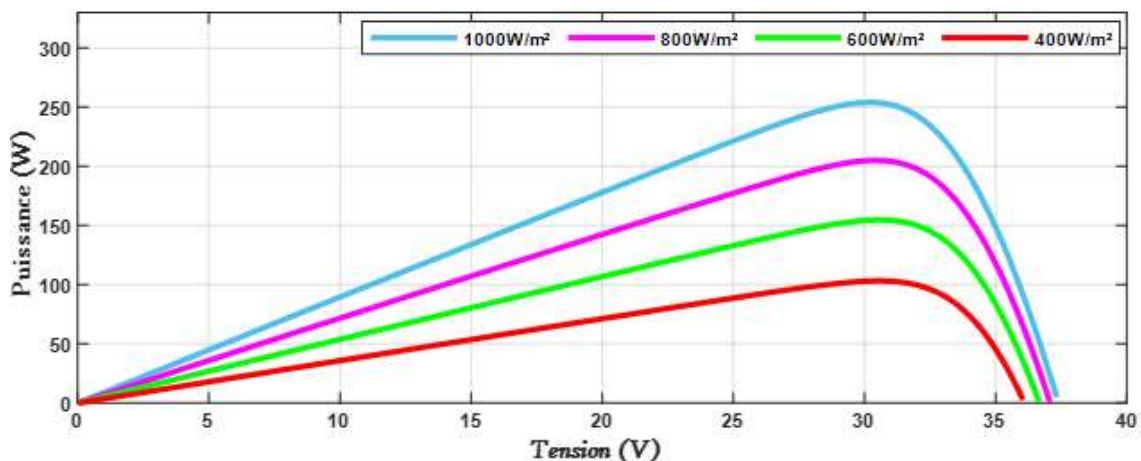


Figure IV.5 : Caractéristique  $P = f (V)$  du module PV.

La figure IV.5 montre que la puissance du module photovoltaïque varie en fonction de l'éclairement, passant de 100 W pour un éclairement de 400  $\text{W}/\text{m}^2$  à 255 W pour un éclairement de 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ . Bien que la tension en circuit ouvert soit pratiquement invariante, l'augmentation du courant généré par le panneau avec l'irradiation solaire entraîne cette augmentation de puissance, en vertu de la relation  $P = V \times I$ .

### IV .3.1.3 Effet de la température sur les caractéristiques $I= f (V)$ et $P=f (V)$

En fixant l'éclairement à  $1000 \text{ W/m}^2$  et en faisant varier la température de  $0^\circ\text{C}$  à  $75^\circ\text{C}$

➤ Effet de la température sur les caractéristiques  $I = f (V)$

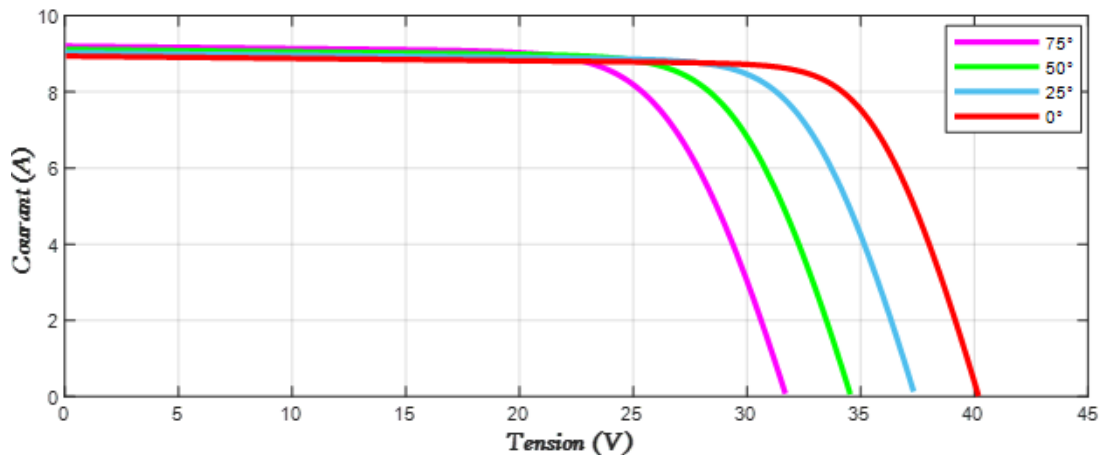


Figure IV.6 : Caractéristique  $I = f (V)$  du module PV.

La figure IV.6 montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension en circuit ouvert du GPV. En revanche, le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'élévation de la température du module PV. Ce courant résulte de variations de température affectant la concentration des porteurs intrinsèques, ce qui entraîne un taux de recombinaison plus élevé à l'intérieur du semi-conducteur.

➤ Effet de la température sur les caractéristiques  $P = f (V)$

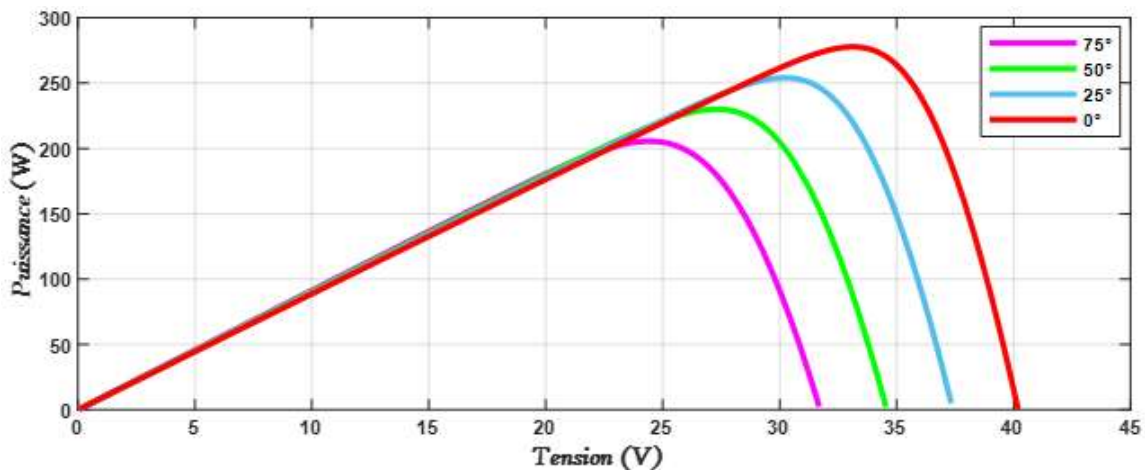


Figure IV.7 : Caractéristique  $P = f (V)$  du module PV.

La figure IV.7 montre que l'élévation de la température réduit la puissance maximale et la tension en circuit ouvert d'un générateur photovoltaïque (GPV) en raison de la diminution de la conductivité des matériaux semi-conducteurs des cellules solaires avec la chaleur, ce qui diminue la différence de potentiel disponible.

### IV.3.2 Choix et caractérisation du module photovoltaïque numéro 2

Pour étudier les caractéristiques du module solaire photovoltaïque S-Energy SN255P-10 composé de 60 cellules, une simulation a été réalisée dans l'environnement MATLAB/Simulink. Les spécifications du module sont présentées dans le tableau IV.2, montrant une puissance maximale de 255W à une tension maximale de 30 V, dans des conditions standards (1000 W/m<sup>2</sup> et 25 °C).

Modèle	S-Energy SN255P-10
<b>Puissance nominale maximale (<math>P_{max}</math>)</b>	255 W
<b>Tension en fonctionnement optimal (<math>v_{mp}</math>)</b>	30 V
<b>Courant en fonctionnement optimal (<math>i_{mp}</math>)</b>	8,5 A
<b>Tension en circuit ouvert (<math>V_{oc}</math>)</b>	37,6 V
<b>Intensité de court-circuit (<math>I_{sc}</math>)</b>	8,93 A
<b>Rendement par panneau</b>	15,61%
<b>Température de fonctionnement</b>	- 40°C ~ +85°C
<b>Tension maximale du système</b>	1000 V (iec)
<b>Calibre maximal des fusibles en série</b>	15 A
<b>Tolérance de puissance</b>	0 ~ +2 W
<b>Dimensions</b>	1650 x 990 x 30 mm

Tableau IV.2 : Caractéristiques du module PV S-Energy SN255P-10.

### IV .3.2.1 Caractéristiques du PV

Les courbes caractéristiques I-V et P-V du générateur S-Energy SN255P-10 ont été simulées dans des conditions standards ( $1000 \text{ W/m}^2$  et  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) sont représentés dans les figures suivantes :

➤ La caractéristique  $I = f(V)$  pour  $T=25^\circ\text{C}$  et  $G=1000 \text{ W/m}^2$ .

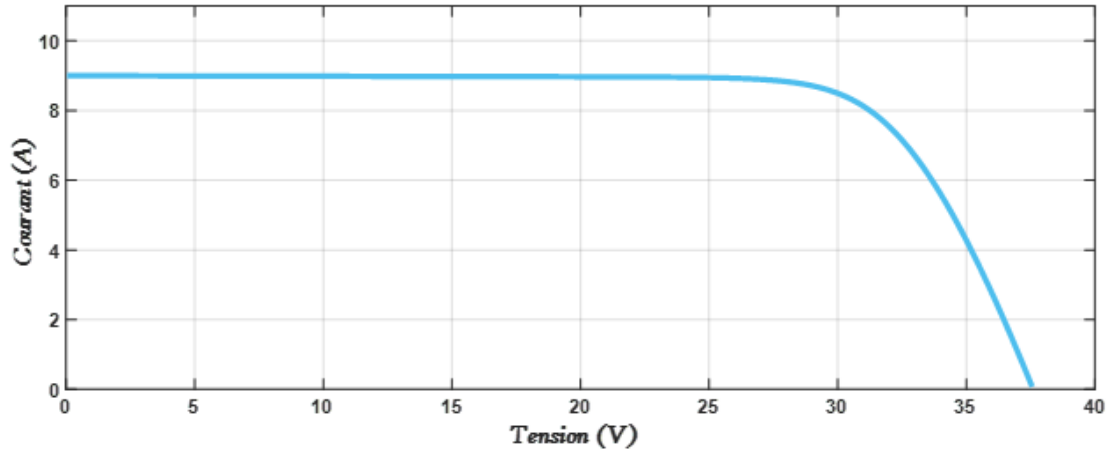


Figure IV.8 : Caractéristique I (V) du module PV.

La figure IV.8 montre la caractéristique de courant constant du module photovoltaïque, où le courant reste constant jusqu'à une certaine tension avant de diminuer rapidement.

➤ La caractéristique  $P = f(V)$  pour  $T=25^\circ\text{C}$  et  $G=1000 \text{ W/m}^2$ .

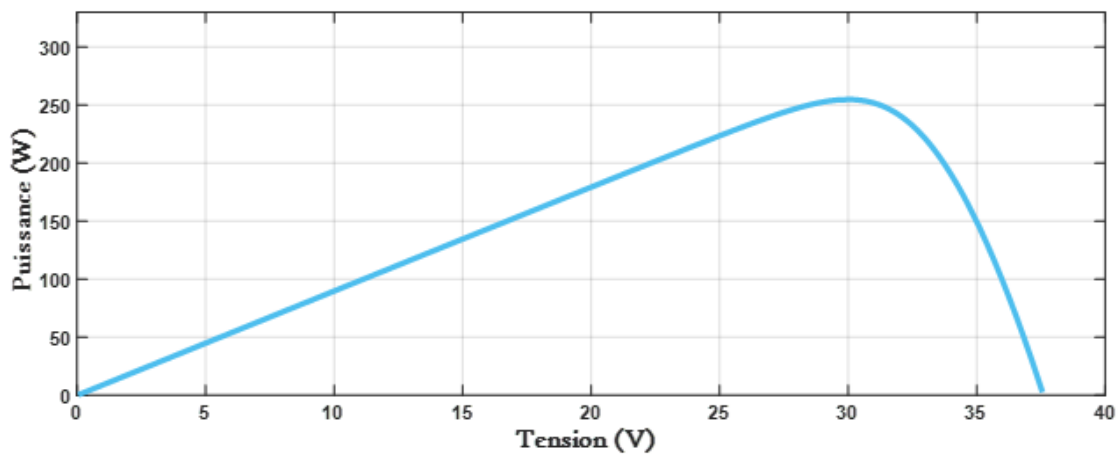


Figure IV.9 : Caractéristique P (V) du module PV.

La figure IV.9 présente la courbe de puissance du module photovoltaïque, avec un point de puissance maximale (MPP) où la puissance atteint son optimum.

IV .3.2.2 Effet de l'éclairement sur les caractéristiques  $I= f (V)$  et  $P=f (V)$

➤ Effet de l'éclairement sur les caractéristiques  $I = f (V)$

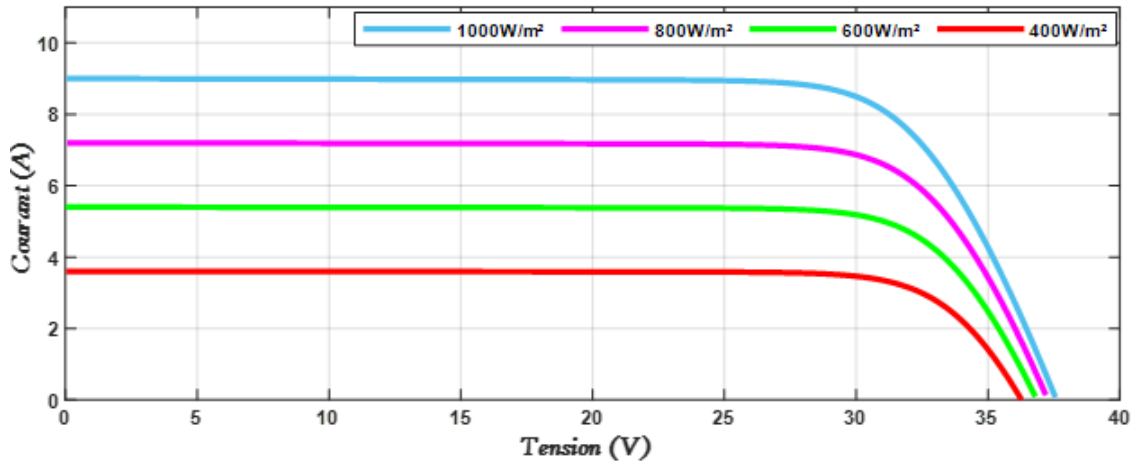


Figure IV.10 : Caractéristique  $I = f (V)$  du module PV.

La figure IV.10 montre que la tension en circuit ouvert est insensible à l'éclairement, restant constante à environ 2 volts, tandis que le courant subit une transformation radicale.

➤ Effet de l'éclairement sur les caractéristiques  $P = f (V)$

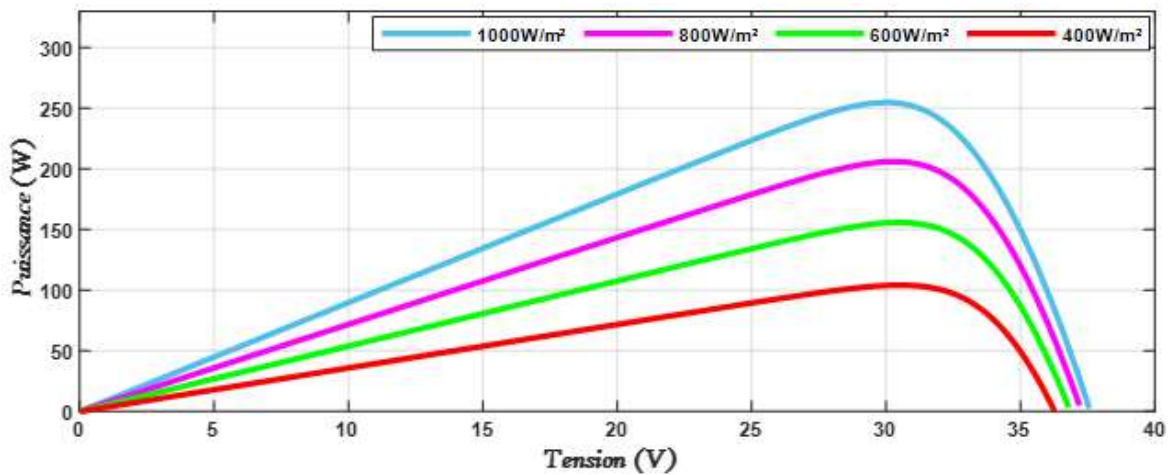


Figure IV.11 : Caractéristique  $P = f (V)$  du module PV.

La figure IV.11 montre que la puissance du module photovoltaïque varie en fonction de l'éclairement, augmentant avec l'irradiation solaire.

### IV .3.2.3 Effet de la température sur les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$

➤ Effet de la température sur les caractéristiques  $I = f(V)$

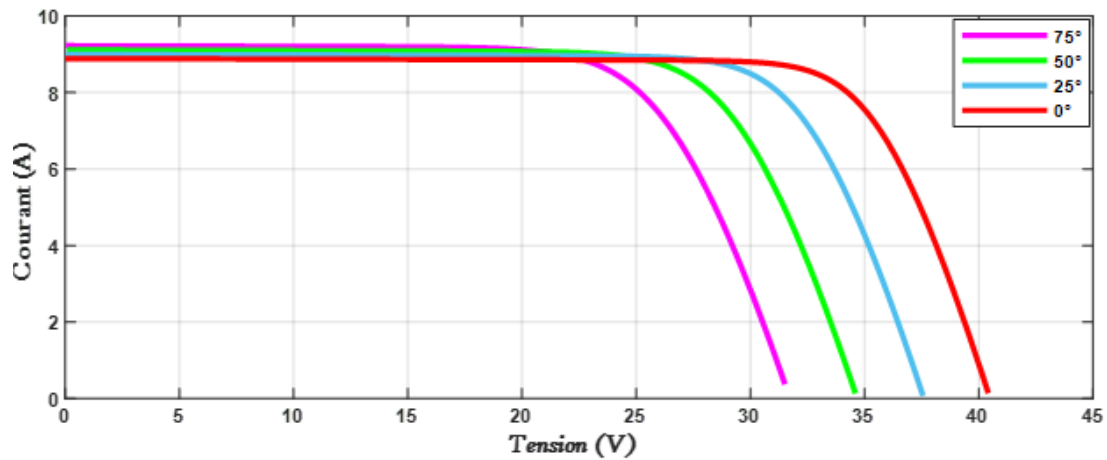


Figure IV.12 : Caractéristique  $I = f(V)$  du module PV.

La figure IV.12 montre que l'augmentation de la température réduit la tension en circuit ouvert du GPV, tandis que le courant de court-circuit augmente légèrement en raison de la variation de la concentration des porteurs intrinsèques.

➤ Effet de la température sur les caractéristiques  $P = f(V)$

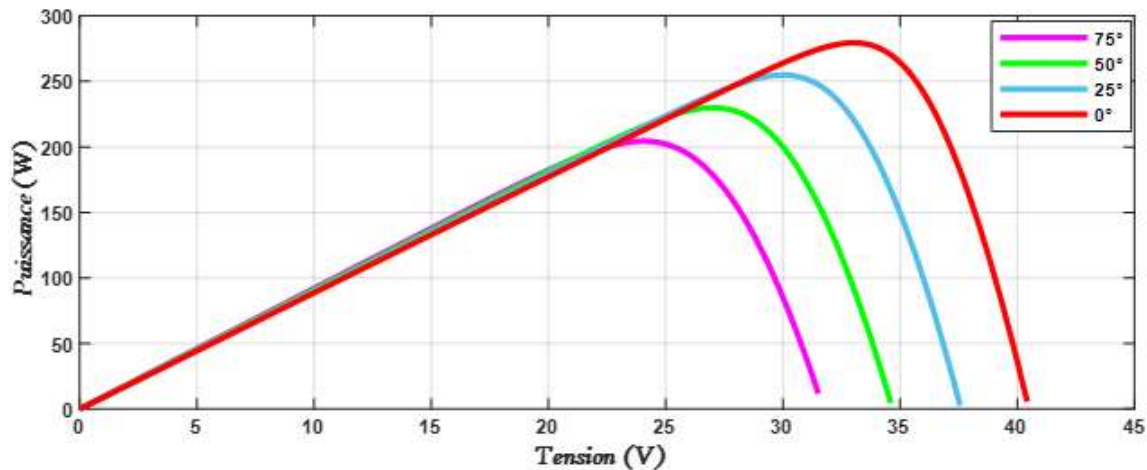


Figure IV.13 : Caractéristique  $P = f(V)$  du module PV.

La figure IV.13 montre que l'élévation de la température réduit la puissance maximale et la tension en circuit ouvert du GPV en raison de la diminution de la conductivité des matériaux semi-conducteurs des cellules solaires avec la chaleur.

#### IV .4 Comparaison de deux modules PV

Critères de Comparaison	Module PV: Canadian Solar CS6P-255P	Module PV: S-Energy SN255P-10
<b>Courbe I-V</b>	I=8,43 A V=30,2 V	I=8,5 A V=30 V
<b>Courbe P-V</b>	P=254,58 W V=30,2 V	P=255 W V=30 V
<b>Puissance maximale (Pmax)</b>	255 W	255 W
<b>Courant de court-circuit (Isc)</b>	9 A	8,93 A
<b>Tension de circuit ouvert (Voc)</b>	37,4 V	37,6 V

Tableau IV.3 : Comparaison entre les deux modules de panneaux PV.

#### Interprétation :

Les deux modules photovoltaïques, le Canadian Solar CS6P-255P et le S-Energy SN255P-10, ont des caractéristiques similaires, mais avec des légères variations. Les courbes I-V et P-V montrent des augmentations régulières du courant et de la puissance avec la tension. Les deux modules ont une puissance maximale de 255 W et une tension de circuit ouvert similaire.

#### IV .5 Simulation des différents défauts d'un système PV

Les systèmes PV peuvent être soumis à plusieurs défauts durant leur fonctionnement, et on peut distinguer deux types principaux :

- Défauts permanents (dégradation, court-circuit, circuit ouvert...).
- Défauts temporaires (ombrage partiel, accumulation de poussière...).

L'analyse des caractéristiques I-V et P-V est un outil essentiel pour diagnostiquer et identifier les défauts dans un système photovoltaïque. Étant donné que ces défauts peuvent apparaître du côté DC d'une chaîne photovoltaïque, nous analysons ici les défauts bien connus (court-circuit, ombrage partiel, etc.) qui peuvent apparaître et leur impact sur ces caractéristiques. Le module photovoltaïque utilisé dans cette étude est le Canadian Solar CS6P-255P, dont le schéma de simulation est représenté dans la figure (IV.14).

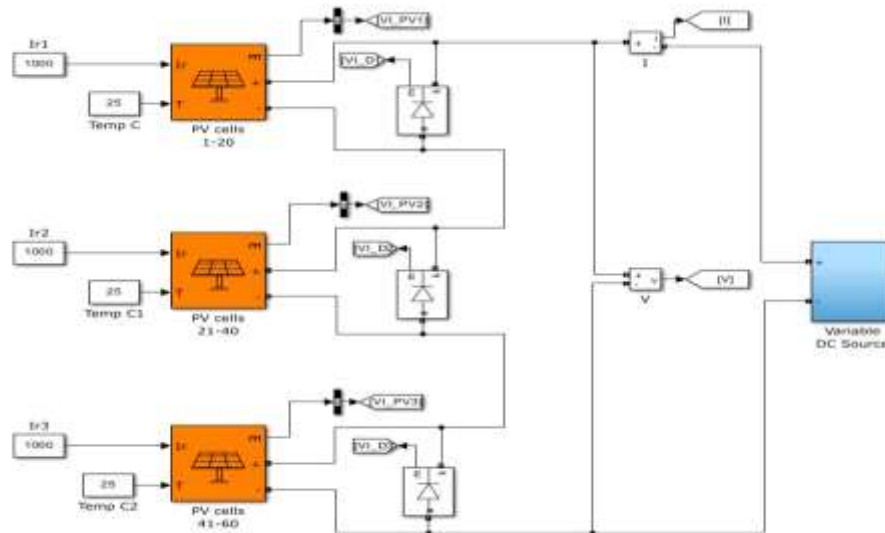


Figure IV.14 : Schéma fonctionnel d'une chaîne photovoltaïque qui se compose de 3 modules PV connectés en série.

**IV .5.1 Défaut d'ombrage :**

L'ombrage partiel est simulé en modifiant la valeur d'éclairement de certains modules PV.

Pour une meilleure appréciation de la méthode de diagnostic, 03 cas de défauts d'ombrage ont été simulés comme le montre le tableau IV.4 :

Conditions de fonctionnement	E1 (W/m <sup>2</sup> )	E2 (W/m <sup>2</sup> )	E3 (W/m <sup>2</sup> )
Ombrage 1	1000	1000	500
Ombrage 2	1000	300	600
Ombrage 3	800	300	400

Tableau IV.4 : Cas de défauts d'ombrage simulés.

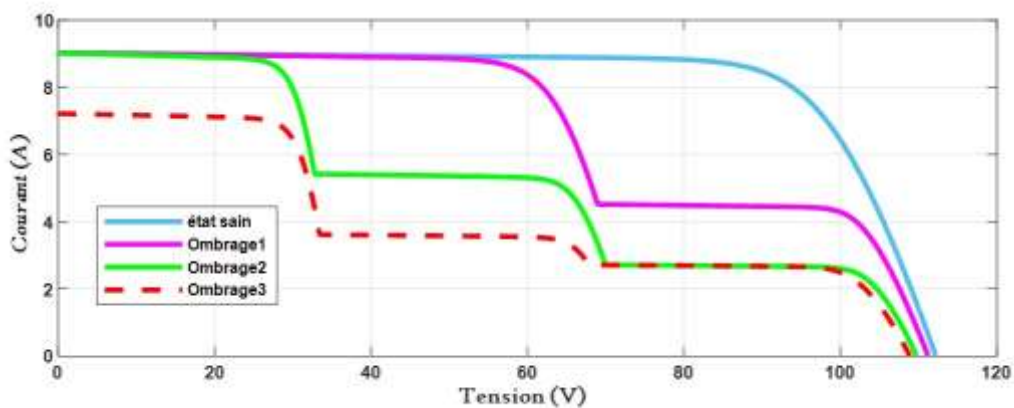


Figure IV.15 : Caractéristique I-V pour différents % d'ombrage.

La Figure IV.15 illustre l'impact d'un ombrage partiel sur la courbe caractéristique I-V du module photovoltaïque, montrant une altération de la relation entre le courant et la tension.

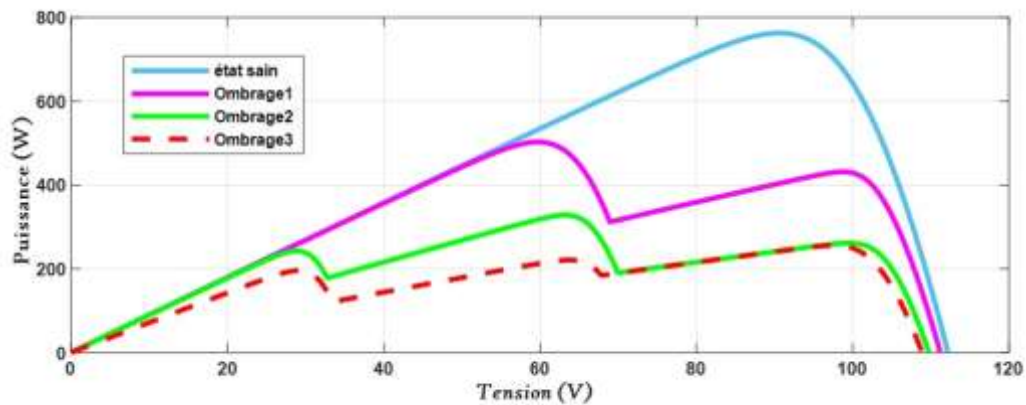


Figure IV.16 : Caractéristique P-V pour différents % d'ombrage.

La Figure IV.16 révèle que la relation P-V présente de multiples pics, en raison de l'activation des diodes de dérivation installées en parallèle pour prévenir les points chauds et protéger le module PV.

La disposition des diodes de dérivation peut influencer l'impact de l'ombrage partiel. Lorsqu'une diode est activée par l'ombrage, elle induit une chute de tension qui réduit la puissance produite. La diode ne s'active qu'au-delà d'un certain seuil de polarisation inverse. Cela modifie la pente de la courbe, entraînant des changements dans les résistances série et parallèle du module.

#### IV .5.2 Défaut de diode by-pass court-circuitée

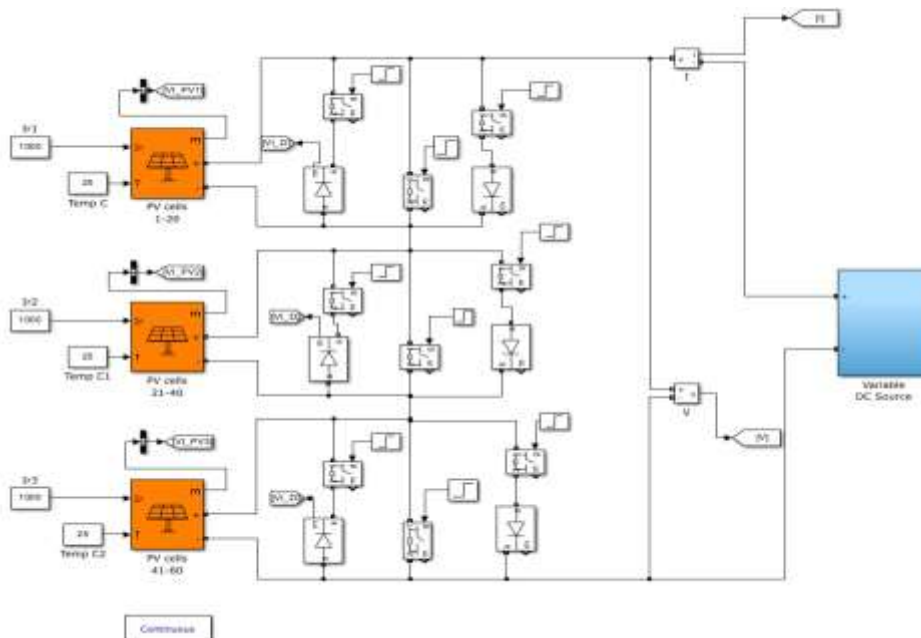


Figure IV.17 : Schéma de simulation d'un défaut de diode by-pass court-circuitée.

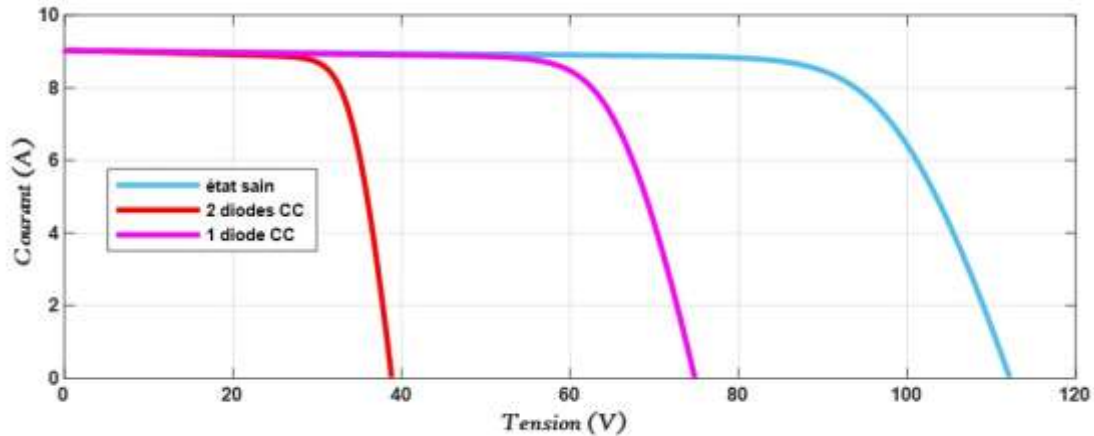


Figure IV.18 : Caractéristique I-V avec défaut de court-circuit.

La figure IV.18 démontre clairement que lorsque la diode by-pass est court-circuitée, la tension en circuit ouvert du générateur photovoltaïque diminue. Ce phénomène perturbe la production d'énergie solaire en réduisant son efficacité. La correction rapide de ce type de défaut est essentielle pour assurer le bon fonctionnement et la performance optimale des systèmes photovoltaïques.

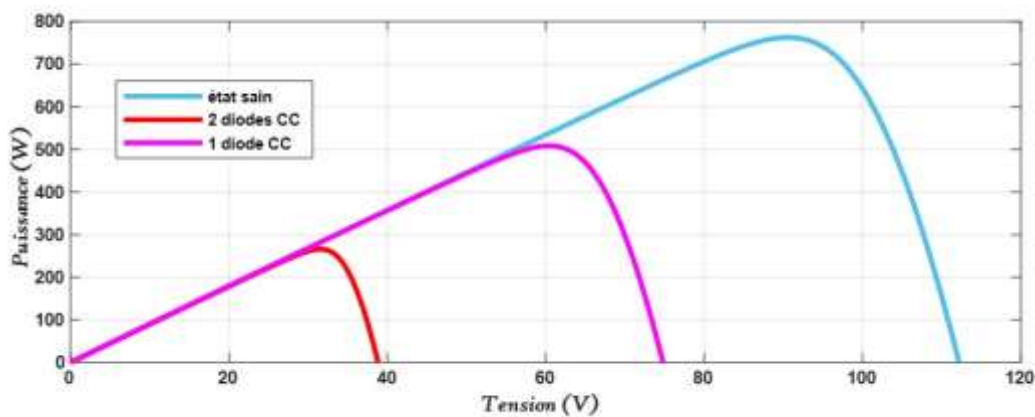


Figure IV.19 : Caractéristique P-V avec défaut de court-circuit.

La figure IV.19 montre que lorsqu'il y a un court-circuit de la diode de by-pass, la puissance maximale du générateur photovoltaïque diminue significativement. Cela s'explique par le fait que la diode de by-pass a pour rôle de protéger le générateur en cas de fonctionnement en récepteur. Lorsqu'elle est court-circuitée, elle ne peut plus jouer ce rôle, ce qui entraîne une baisse de la puissance totale produite par le module.

IV .5.3 Défaut de dégradation

IV .5.3.1 Résistance Série (Rs)

Pour simuler le défaut de résistance interne des cellules, une résistance en série a été placée dans le schéma bloc pour modéliser la résistance interne. Cette résistance a été augmentée pour représenter différents niveaux de dégradation, ce qui a entraîné une diminution proportionnelle de la tension associée.

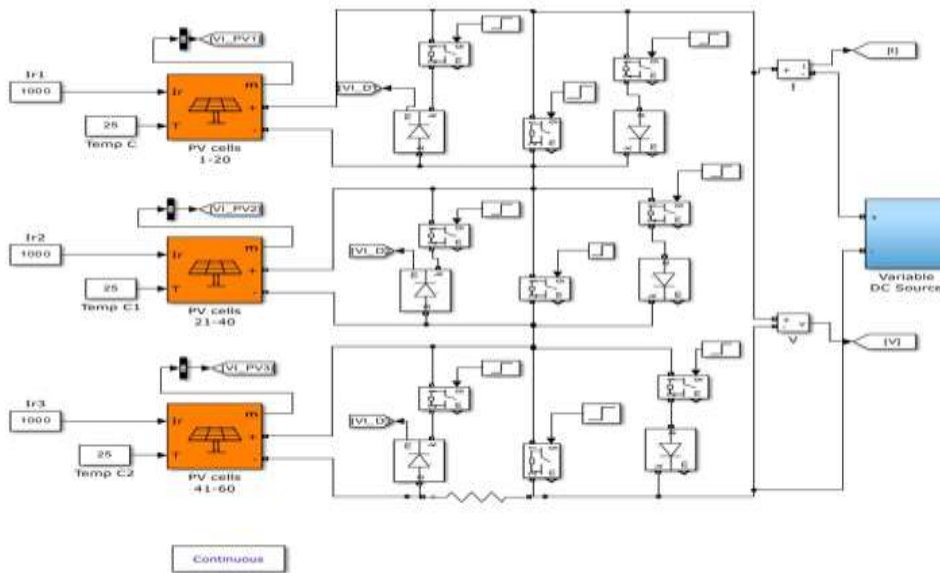


Figure IV.20 : Schéma de simulation d'un défaut de la Résistance Série (Rs).

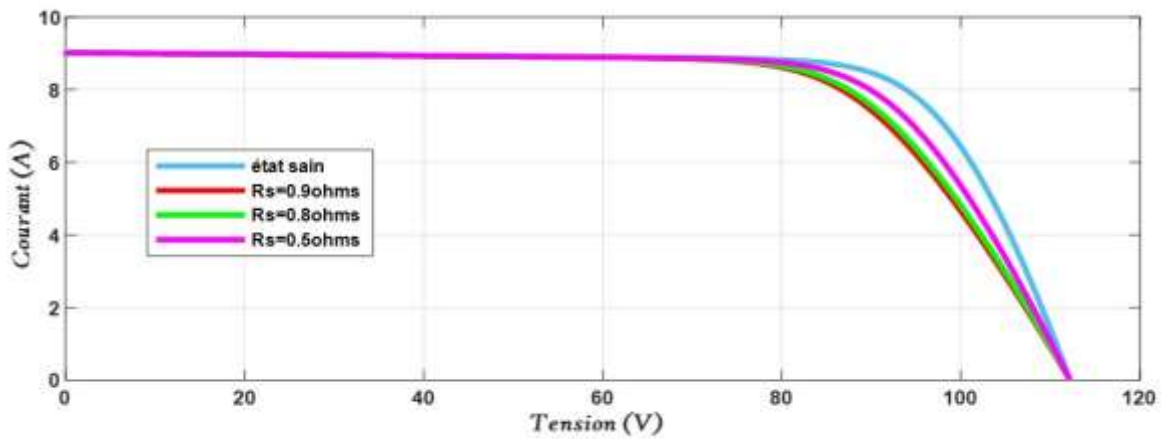


Figure IV.21 : Caractéristique I-V avec l'augmentation de la résistance série (Rs).

La figure IV.21 démontre comment la dégradation de la résistance série affecte la caractéristique I-V d'un générateur PV. Cette altération entraîne une modification significative de la pente de la courbe, indiquant une diminution du courant pour une même variation de tension.

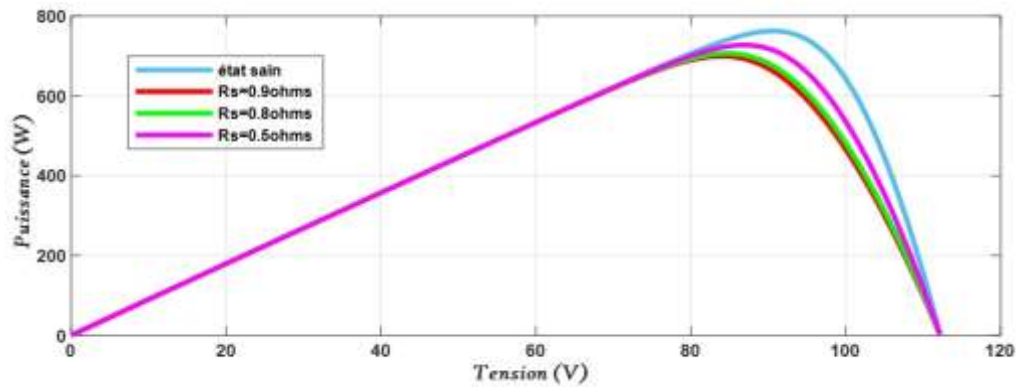


Figure IV.22 : Caractéristique P-V avec l'augmentation de la résistance série  $R_s$ .

Dans la figure IV.22, la courbe P-V illustre comment la puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque varie en fonction de la tension appliquée. Lorsque la résistance série augmente, la puissance disponible diminue, impactant directement les performances du système photovoltaïque.

#### IV .5.3.2 Résistance parallèle ( $R_{sh}$ )

Pour simuler le défaut de la résistance shunt (parallèle), une résistance a été placée en parallèle dans le schéma bloc. Cette résistance a été diminuée pour représenter différents niveaux de dégradation.

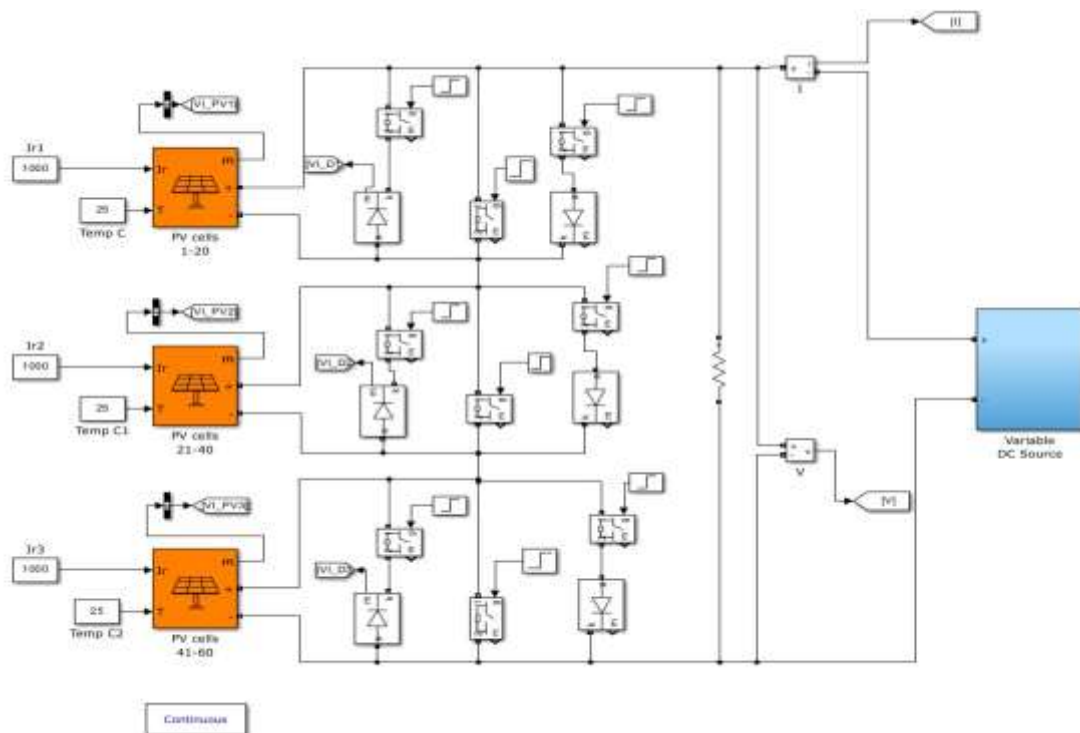


Figure IV.23 : Schéma de simulation d'un défaut de la Résistance shunt ( $R_{sh}$ ).

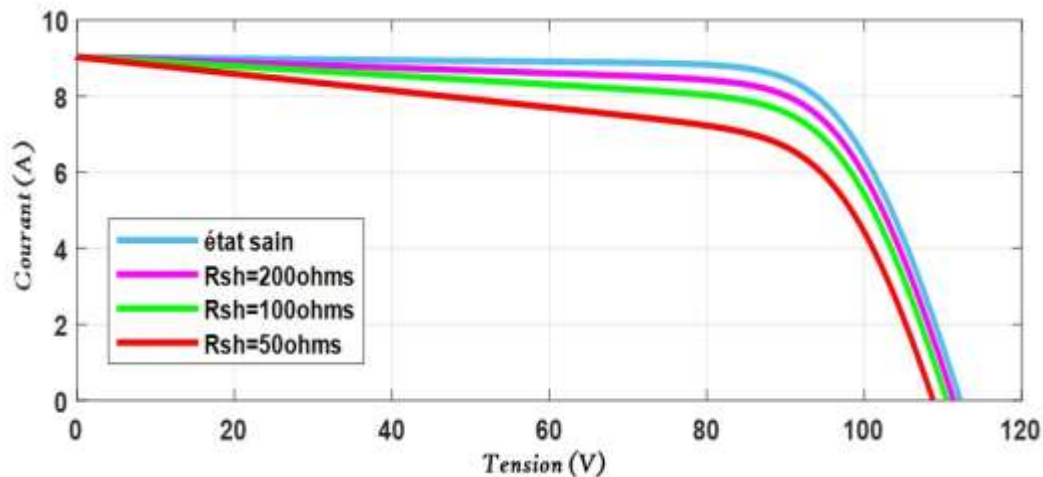


Figure IV.24 : Caractéristique I-V avec la diminution de la résistance shunt (Rsh).

Dans la figure IV.24, la caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque montre comment le courant varie en fonction de la tension appliquée. La simulation de différents niveaux de dégradation de la résistance shunt (Rsh) illustre clairement l'impact de ces variations sur les performances électriques du panneau solaire, influençant la production de courant en fonction de la tension.

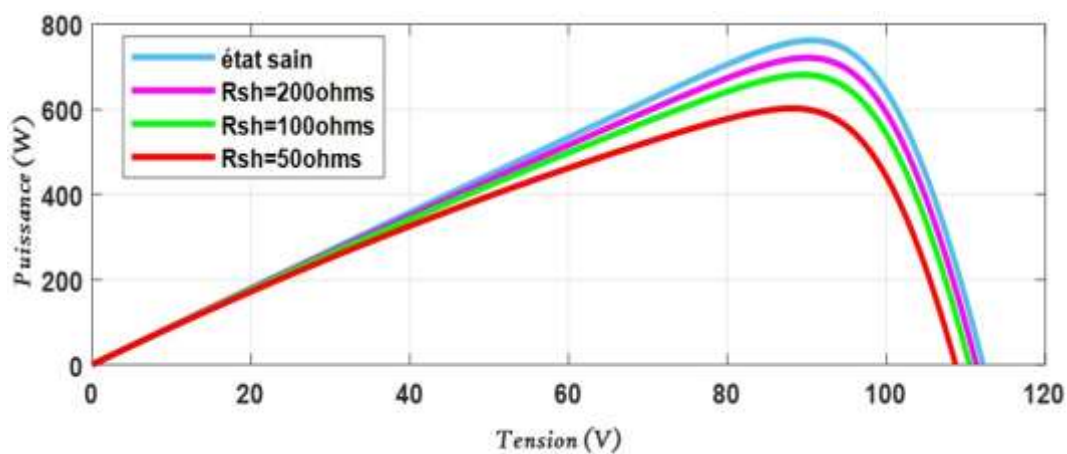


Figure IV.25 : Caractéristique P-V avec la diminution de la résistance shunt (Rsh).

Figure IV.25 montre que la diminution de la résistance shunt due à différents niveaux de dégradation entraîne une réduction de la puissance maximale disponible du générateur photovoltaïque. Cela met en évidence l'importance de maintenir le système en bon état pour assurer des performances optimales et une efficacité énergétique maximale.

#### IV.6 Courbes de différents types de défauts d'un système PV

Les courbes I-V et P-V révèlent des différences dans les caractéristiques du générateur photovoltaïque en cas de défauts, notamment en termes de variation de tension ou de courant et de pertes de puissance.

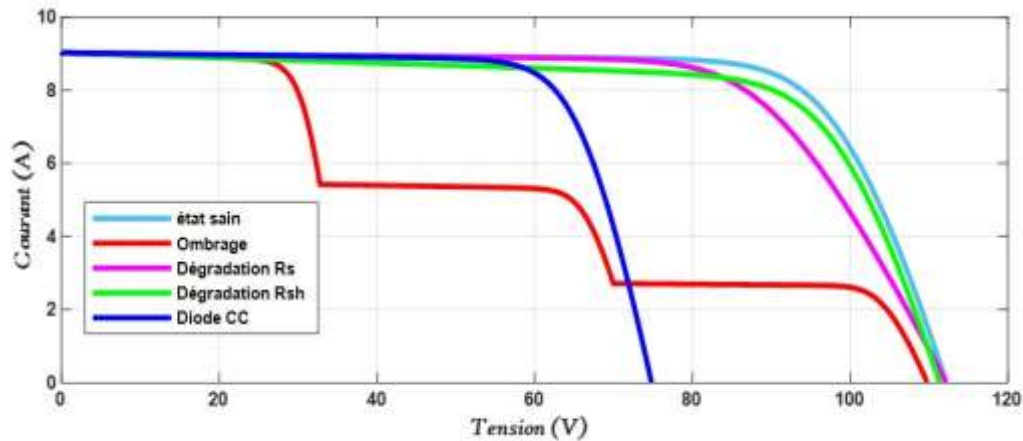


Figure IV.26 : Caractéristique I-V des différents défauts d'un système PV.

Figure IV.26, la caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque montre comment le courant varie en fonction de la tension appliquée. L'analyse des courbes I-V révèle les variations causées par les défauts, ce qui permet de les détecter précisément en fonction de leur impact sur les performances du système photovoltaïque.

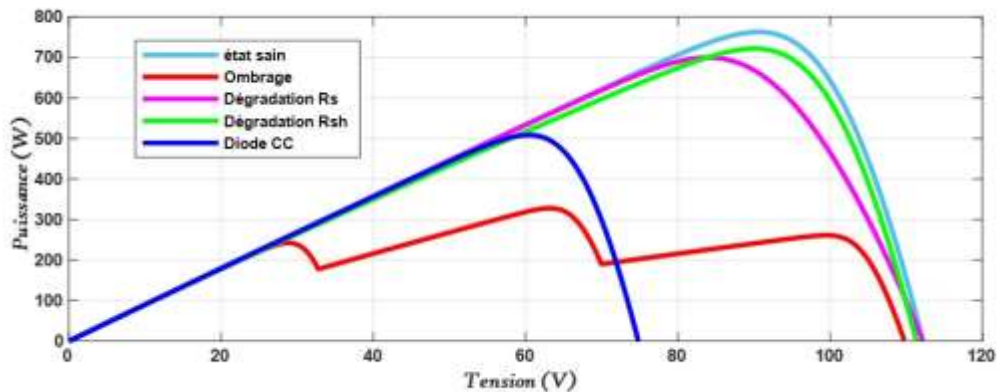


Figure IV.27 : Caractéristique P-V des différents défauts d'un système PV.

Dans la Figure IV.27, la courbe P-V d'un générateur photovoltaïque illustre comment la puissance maximale du panneau solaire change en fonction de la tension appliquée, offrant ainsi une perspective sur l'impact des défauts sur l'efficacité globale du système photovoltaïque.

**IV.7 Conclusion**

Les simulations réalisées sous Matlab/Simulink, basées sur les courbes I-V et P-V, ont révélé l'impact distinct de chaque type de défaut sur les performances d'un générateur photovoltaïque. Ces résultats mettent en évidence l'importance des systèmes de détection et de diagnostic automatiques pour identifier rapidement ces défauts. Une telle approche est essentielle pour garantir une exploitation et une maintenance optimales, assurant ainsi la fiabilité, la sécurité et l'efficacité des systèmes photovoltaïques dans des conditions réelles.

A decorative scroll frame with a blue outline, featuring a rolled-up top edge and a curled bottom-left corner. The text "Conclusion Générale" is centered within the frame.

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

L'énergie photovoltaïque représente une étape importante dans la transition vers une énergie renouvelable et durable. Cet article, intitulé « Évaluation des performances des systèmes photovoltaïques dans des environnements critiques », vise à examiner en profondeur les différents aspects techniques et pratiques de cette technologie tout en soulignant les défis spécifiques de son déploiement dans des conditions environnementales difficiles.

Tout au long de ce travail, nous examinons d'abord les principes de base de la conversion photovoltaïque, détaillant la structure et le fonctionnement des cellules photovoltaïques, ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques existants. Ce socle théorique permet de mieux comprendre les mécanismes de production d'énergie solaire et les innovations qui continuent d'améliorer cette technologie.

Nous avons ensuite étudié les centrales photovoltaïques, leur fonctionnement et leur rôle clé dans la production d'électricité à grande échelle. Nous discutons également des aspects pratiques de l'installation photovoltaïque, en mettant en évidence les composants importants qui garantissent un système efficace et durable. Cette section met en évidence l'importance de l'énergie photovoltaïque dans la transition énergétique mondiale et les opportunités qu'elle offre pour une utilisation plus large des ressources solaires.

Nous explorons également les défis techniques liés à l'utilisation de panneaux photovoltaïques, notamment les défauts tels que les discordances et les arcs électriques, ainsi que l'impact des conditions environnementales telles que la poussière et le sablage sur leurs performances. Ces éléments sont essentiels pour comprendre les obstacles à surmonter et les solutions potentielles pour améliorer l'efficacité des installations solaires.

Le diagnostic des installations photovoltaïques constitue un autre aspect important de nos recherches. Nous examinons une variété de méthodes de diagnostic, depuis les méthodes industrielles courantes jusqu'aux avancées innovantes telles que la réflectométrie et l'analyse du point de fonctionnement. L'utilisation de méthodes de classification supervisées, notamment les réseaux de neurones probabilistes, s'est révélée particulièrement prometteuse pour la détection et le diagnostic d'anomalies pour la poursuite de ce travail réalisé dans le cadre de préparation d'un master.

Enfin, des simulations réalisées sous Matlab/Simulink ont permis de quantifier l'impact de différents types de défauts sur les performances du générateur photovoltaïque. Ces résultats soulignent l'importance des systèmes automatisés de détection et de diagnostic pour garantir la fiabilité, la sécurité et l'efficacité des systèmes photovoltaïques, en particulier dans les environnements critiques.

La méthode des réseaux de neurones est une solution innovante et efficace pour la détection et le diagnostic des défauts des panneaux photovoltaïques. Grâce à leur capacité à analyser de grandes quantités de données et à identifier des motifs complexes.

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de recherche appliquée visant à optimiser les performances des systèmes photovoltaïques en tenant compte des conditions environnementales difficiles. En poursuivant ces recherches, nous espérons apporter une contribution significative à la lutte contre le changement climatique et à la construction d'un avenir énergétique plus propre et plus durable pour les générations futures.

## Références bibliographiques

- [1] Jean-Marie Malherbe, "Optique et spectro polarimétrie solaire", HAL Id: cel-00682270 <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00682270>, 2012.
- [2] Yaiche, M. R., et al., "Resived solar maps of Algeria based on sunshine duration", Energy Conversion and Management, V.82, (2014), 114-123.
- [3] Yaiche, M. R and bouhanik, A., "Atlas solaire algérien", CDER, (2013).
- [4] C. Lerouge, et al., Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis 2006, SCIENCES PHYSIQUES ETATS-UNIS.
- [5] MULLER, J.-C., Électricité photovoltaïque, in BE 8578. 2007, Techniques d'Ingénieur.
- [6] Aad Abdullah Ahsan AL-qamadi, «Etude de la centrale photovoltaïque de Dhaya (Sidi Bel Abbés) », Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF -M'SILA, 2019 /2020.
- [7] R. Touahir et M. A. K. Ben Zahia, « contrôleur neuronal pour la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque », Mémoire master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2015.
- [8] Bernard EQUER, "Energie solaire photovoltaïque "jeune 2005.
- [9] B. Flèche, D. Delagnes, " Energie solaire photovoltaïque "STI ELT Approche générale ; juin 07.
- [10] Francis Domain - INES Education - Savoie Technolac - BP258 - F73375 Le Bourget du Lac -Novembre 2007.
- [11] Mohamed Redha REZOUG, «Etude et Réalisation d'un Système d'Orientation et de Conversion Destiné à Optimiser le Rendement d'un Système Photovoltaïque », thèse de l'obtention du diplôme de doctorat en Sciences option Commande, Université des Frères Mentouri de Constantine, 20/06/2018.
- [12] F Lasnier, T.G Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4.
- [13] Brahim Moudjed, « Caractérisation expérimentale et théorique des écoulements entraînés par ultrasons. Perspectives d'utilisation dans les procédés de solidification du Silicium Photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, MECANIQUE DES FLUIDES, ÉCOLE DOCTORALE: MECANIQUE - ENERGETIQUE - GENIE CIVIL – ACOUSTIQUE. Le 02 décembre 2013.
- [14] Bouzaki Mohammed Moustafa, « Etudes comparées et modélisation des performances des différentes technologies de cellules photovoltaïques en vue du dimensionnement des

- « systèmes et installations photovoltaïques », Thèse Doctorat, Université Tlemcen, 2017. ENIE CIVIL – ACOUSTIQUE. Le 02 décembre 2013.
- [15] R. Messenger and G. Ventre, « Photovoltaic Systems Engineering, Second Edition ». Wiley, 2003.
- [16] ALLAOUI Bachire, « étude et conception de la centrale photovoltaïque Naama », mémoire de master en électrotechnique, universitaire Salhi Ahmed-Naama, 2021.
- [17] MEHDAOUI AHMED “ Identification par Rauschenbach et par Neuro-Flou du Point de Puissance Maximal du Générateur Photovoltaïque d’un Système Solaire En Milieu Saharien ” thèse de magister ; Ecole Normale Supérieure de l’Enseignement Technique d’ORAN ; 2007.
- [18] Ressources Naturelles Canada, “Technologie et application – Photovoltaïque ; Intégration des panneaux solaires aux immeubles ”
- [19] F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003.
- [20] AMARA KARIMA, Contribution à l’étude de conception d’une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, Mémoire de Magister, Université MOULOUD MAMMERI De TIZI-OUZOU, 2014/2015.
- [21] Hneini Mema Babe « Etude de la centrale photovoltaïque d’Ain Skhoua (Saida) », mémoire de master en génie mécanique option énergétique. Université de Mohamed Boudiaf M’sila, 2019.
- [22] NAIM Houcine « Etude de gestion d’une mini-centrale solaire et mise au point d’un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l’énergie électrique.
- [23] Pierre-Franck Chevet, « Installations photovoltaïques au sol Guide de l’étude d’impact », directeur général de l’Énergie et du Climat, 2009.
- [24] Y. Azoumah, D. Yamegueu, P. Ginies, Y. Coulibaly, P. Girard, “Sustainable electricity generation for rural and peri-urban populations of sub-Saharan Africa: The flexy-energy concept” Energy Policy; 39: 133-134, 2011.
- [25] [www.dmseducation.com](http://www.dmseducation.com)
- [26] D. Linden, T.B. Reddy, "Handbook of Batteries, 3rd Edition". Edition McGraw-Hill, INC New York 2002.
- [27] Julien LABBÉ, “L’hydrogène Electrolytique Comme Moyen De Stockage D’électricité Pour Systèmes Photovoltaïques Isoles” thèse de doctorat ; l’Ecole des Mines de Paris ; 2006.
- [28] Théodore Wildi, Electrotechnique 2, édition ESKA, presses de l’Université de Laval, 1991.

- [29] Jimmy Royer et Eric Schiller, Pompage photovoltaïque, édition Multi mondes, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.
- [30] Julien LABBÉ, "L'hydrogène Electrolytique Comme Moyen De Stockage D'électricité Pour Systèmes Photovoltaïques Isoles" thèse de doctorat ; l'Ecole des Mines de Paris ; 2006.
- [31] M. Belarbi "Modélisation et Simulation d'un Système de pompage photovoltaïque" Mémoire de magister en électronique Université des sciences et de la technologie d'oran, juin 2006.
- [32] B. Mamri, M. Zaidi "contribution de système photovoltaïque avec pompage", Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine, 2006.
- [33] D.Turcotte, M.Ross and F.Sheriff. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools» PV Horizon, Canada, 2001.
- [34] A. Djalab, Diagnosis Of Faults In A Renewable Energy System Based On Artificial Intelligence Techniques: Application On A Photovoltaic System, Thèse De Doctorat, Université Ziane Achour-Djelfa, 2020.
- [35] Mohammed Telidjane, " Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic", thèse de doctorat, Université de Lyon, 2017.
- [36] Seif Eddine NAFFOUTI, « Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque », thèse pour obtenir le diplôme national d'ingénieur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 02/07/2012.
- [37] Quintana M.A., King D.L., McMahan T.J., Osterwald C.R, « Commonly observed degradation in field-aged photovoltaic modules », Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1436- 1439, 2002.
- [38] Agarwal, N. et Agarwal, A. (2014). Mismatch Losses in Solar Photovoltaic Array. MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering, 4(1):16-19.
- [39] M., Pérez, P. J., Aguilera, J., et Aguilar, J. D. (2008). A New Estimation Method of Irradiance on a Partially Shaded PV Generator in Grid-Connected Photovoltaic Systems. Renewable Energy, 33 :2048-2056.
- [40] M., Vera, J. a., Marroyo, L., Lorenzo, E., et Pérez, M. (2009). Solar-Tracking PV Plants in Navarra: A 10 MW Assessment. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 17 :337-346.
- [41] O. Hachana, (2015) "Etude D'un Système Photovoltaïque En Vue Du Diagnostic", Université Ferhat Abbes – Setif1. P 23

- [42] [Kopp, 2012] Kopp [46], E. S. (2012). I-V Analysis of Photovoltaic Modules Deployed Outdoors at Tucson Electric Power Solar Test Yard. Master of science thesis, The University of Arizona
- [43] Khenfer Raid, « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro énergétique », thèse doctorat, université de Ferhat Abbas Setif ,2015
- [44] Banavar, M., Braun, H., Buddha, S. T., Krishnan, V., Spanias, A., Takada, S., Takehara, T., Tepedelenlioglu, C., et Yeider, T. (2012). Signal Processing for Solar Array Monitoring, Fault Detection, and Optimization, volume 7. Edition, Morgan & Claypool Publishers.
- [45] Boubeker Mounia, Charif Ala, «Diagnostic des défauts dans les panneaux photovoltaïques par SVM », Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Mémoire de magister en Electromécanique, 2022.
- [46] M. Benkara & W. Benarroudj, (2021) "Détection Et Compensation De Défaut Dans Un Système Photovoltaïque", Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A. P23\_24
- [47] A. Djalab, Diagnosis of Faults In A Renewable Energy System Based On Artificial Intelligence Techniques: Application On A Photovoltaic System, Ziane Achour University – Djelfa, This De Doctorate, 2020,
- [48] A. Mendil Et M. Abdelli, Développement De Modèles Mathématiques D'aide au Diagnostic Des Systèmes Photovoltaïques, Université Mohamed Boudiaf - Msila, 2017 /2018.
- [49] BOUREGA Med Lamine et MEFROUM Mohamed, Etude expérimentale sur l'influence de la salissure sur les modules PV, Master Energies Renouvelables en Electrotechnique, Université de Ghardaïa, 2021.
- [50] Bouaouadja N, Bouzid S, Hamidouche M, Bousbaa C, Madjoubi M. Effects of sandblasting on the efficiencies of solar panels. J Apple Energy 2000; 65:99e105.
- [51] Abderrezek M, Fathi M. Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield. Sol Energy 2017; 142:308–20. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.040>.
- [52] Mehmood U, Al-ahmed A, Al-sulaiman FA, Malik MI, Shehzad F, Ul A, et al. Effect of temperature on the photovoltaic performance and stability of solid- state dye sensitized solar cells : a review. Renew Sustain Energy Rev 2017; 79:946–59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.114>.

- [53] Javed W, Wubulikasimu Y, Figgis B, Guo B. Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha. Qatar. *Solar Energy* 2017; 142:123–35. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.053>.
- [54] P. K, "What forces cause solar panel degradation and failure," *Solar Power World*, 2017 05 June. [Online]. Available: <https://www.solarpowerworldonline.com/2017/06/causes-solarpanel-degradation>. [Accessed 20 Sept 2021].
- [55] D. C. Jordan and S. R. Kurtz, "Photovoltaic degradation rates— an analytical review," *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, p. 12–29, 2013.
- [56] IBERRAKEN Fairouz, MAOUCHE Cherif, « Analyse des Modes de Défaillance des Systèmes Photovoltaïques installés dans le sud Algérien», Diplôme de master en électrotechnique, UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA BEJAIA, Juin 2012.
- [57] E.Díaz-Dorado et al « Influence of the shadows in photovoltaic systems with different configurations of bypass diodes» *SPEEDAM* pp 134.139, 2010.
- [58] 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.
- [59] W. Rezgui. Système intégré pour la supervision et le diagnostic des défauts dans les systèmes de production d'énergies: les installations photovoltaïque. Thèse de Doctorat, Université de Batna 2 -Batna-, 2015.
- [60] D. Maquin, J. Ragot, *Diagnostic des systèmes linéaires*. 2000.
- [61] N. Aouchiche, "Défauts liés aux systèmes photovoltaïques autonomes et techniques de diagnostic - Etat de l'art », Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Algies, Algeria, 2018.
- [62] P. Ripoll. Conception d'un système de diagnostic flou appliqué au moteur automobile. Thèse de Doctorat, université de Chambéry, 1999.
- [63] S.R. Madeti and S.N. Singh, 'A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system', *Solar Energy*, Vol. 158, pp. 161 - 185, 2017. doi:10.1016/j.solener.2017.08.069.
- [64] Sabri Nassim, "Benkrecha Rabah, contribution à la détection et diagnostic des défauts dans les systèmes photovoltaïques par l'intelligence artificielle", Diplôme de Master en Electronique option automatique, Université Saad Dahlab Blida, 2012/2013.

- [65] L. Bun. Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [66] D. W. Peter. Fault Detection and Performance Visualisation for a Grid-Connected Photovoltaic Power Plant Using Sensor Data. Master of Engineering Thesis, Stellenbosch University, 2019.
- [67] J. A. Tsanakas, L. Ha, C. Buerhop. Faults and infrared thermographic diagnosis in operating c-Si photovoltaic modules: A review of research and future challenges. *Renewable sustainable energy reviews*. Vol 62, pp. 695-709, 2016.
- [68] A. DJALAB. Diagnostic des défauts d'un système d'énergie renouvelable basée sur les techniques d'intelligence artificielle : Application sur un système photovoltaïque. Thèse de Doctorat, Université Ziane Achour de Djelfa, 2020.
- [69] L. Schirone and F. P. Califano, "Fault finding in a 1 MW photovoltaic plant by reflectometry," in *Photovoltaic Energy Conversion, 1994.*, Conference Record of the Twenty Fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1994, pp. 846-849.
- [70] T. Takashima, J. Yamaguchi, K. Otani, T. Oozeki, K. Kato, et al., "Experimental studies of fault location in PV module strings," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, pp. 1079-1082, 2009.
- [71] Hirata Y, Noro S, Aoki T, Miyazawa S. Diagnosis Photovoltaic Failure by Simple Function Method to Acquire I - V Curve of Photovoltaic Modules String 2011:10– 3.
- [72] I. Tro, 'Fault Detection in a Photovoltaic Plant by Time Domain Reflectometry', Vol. 2, pp. 35 - 44, 1994.
- [73] A. Chouder and S. Silvestre, 'Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis', *Energy Conversion Management*, Vol. 51, pp. 1929 - 1937, 2010. doi:10.1016/j.enconman.2010.02.025.
- [74] S. Silvestre, A. Chouder and E. Karatepe, 'Automatic fault detection in grid connected PV systems', *Solar Energy*, Vol. 94, pp. 119 - 127, 2013. doi:10.1016/j.solener.2013.05.001.
- [75] A. Chouder and S. Silvestre, "Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 1929-1937, 2010.
- [76] LABRAOUI Mohamed. Détection et diagnostic des défauts dans les systèmes photovoltaïques par réseaux de neurones. Diplôme de Master en Automatique, Ecole Nationale polytechnique, 2013.

- [77] N. Shah and C. Rajagopalan, 'Experimental evaluation of a partially shaded photovoltaic system with a fuzzy logic-based peak power tracking control strategy', *I.E.T., Renewable Power Generation*, pp. 1 - 10, 2015. doi:10.1049/ietrpg.2015.0098.
- [78] T. Zhou and W. Sun, 'Study on maximum power point tracking of photovoltaic array in irregular shadow', *International Journal of Electric Power Energy System*, Vol. 66, pp. 227 - 234, 2015. doi:10.1016/j.ijepes.2014.10.030.
- [79] Y. Liu, M. Li, X. Ji, X. Luo, M. Wang and Y. Zhang, 'A comparative study of the maximum power point tracking methods for PV systems', *Energy and Conversion Management*, Vol. 85, pp. 809 - 816, 2014. doi:10.1016/j.enconman.2014.01.049.
- [80] Vladimir N. Vapnik. "The Nature of Statistical Learning Theory", Springer, 1995.
- [81] T.M. Cover et P.E. Hart. "Nearest neighbor pattern classification", *IEEE Transactions on Information Theory*, 13 :21–27, 1967.
- [82] Antoine Cornuéjols, Laurent Miclet, et Yves Kodratoff. *Apprentissage artificiel : concepts et algorithmes*. Eyrolles, 2002.
- [83] Gérard Dreyfus, Jean-Marc Martinez, Manuel Samuelides, Mirta Gordon, Fouad Badran, Sylvie Thiria, et Laurent Héroult. *Réseaux de neurones : Méthodologie et applications*. Eyrolles, 2<sup>ème</sup> édition, 2004.
- [84] R. O. Duda, P. E. Hart, et D. G. Stork. *Pattern Classification* 2nd edition. Wiley, 2001.
- [85] DAHMOUN Mouhcn El- Hadi, "Evaluation des performances et la gestion de l'énergie produite par une centrale photovoltaïque réalisée au sud algérien avec l'intégration d'un système de stockage », *Thèse de Doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem*, 2022.