



. RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI – TÉBESSA
Faculté des Science Exactes et des Science de la Nature et de la Vie
DÉPARTEMENT : Science de la matière



MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Option: Physique de la matière condensée

Thème

**Diagnostic des défauts d'un système photovoltaïques par
l'intelligence artificielle**

BOUTARFIF BOUTHAINA & RAIS FATMA ZAHRA

Soutenu le: 13 /06/2023

Devant le jury:

Président:	Bouhlel Mouna	Pr	Université Echahid Eeikh Larbi Tébessi – Tébessa
Rapporteur:	Saouane Izzeddine	MCB	Université Echahid Eeikh Larbi Tébessi – Tébessa
Examineur:	Khechba Mourad	MCA	Université Echahid Eeikh Larbi Tébessi – Tébessa

2022/2023



Remerciement

Avant tout nous remercions dieu qui nous a donné la force et la patience de terminer ce travail.

*Nous tenons grand merci à notre encadreur **Dr Saouane Izzeddine** pour les efforts faits durant l'année universitaire, et pour leurs conseils précieux.*

*Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté L'évaluation de ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques : Pr **Bouhlel Mouna** pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant présider le jury de cette soutenance et ou Dr **khechba Mourad** pour avoir acceptée d'examiner ce travail.*

Nous remercions tous les enseignants de département de Science matière.

Enfin nous tenons à remercier tous ceux ou celles qui ont eu l'honneur, de près ou de loin, à nous aider à présenter ce travail.

BOUTHAINA / FATMA

Dédicace

A l'homme le plus précieux ma vie, mon père (**YAZID**),
(**HEMIDA**) merci d'être mon père, merci pour ton travail acharné et
ton sacrifice, que dieu prolonge ta vie et t'accorde toute la bonté.

A ma mère (**NABILA**), j'aimerais que tu sois avec moi pour
récolter tes fruits, ma mère que dieu ait pitié de toi et t'accorde le
paradis.

A mon soutien indéfectible va à mon frère(**HOUSSEM**) et sa
femme (**SOUMAYA**).

A ma sœur (**HANEN**) ma seconde maman mon amour mon soutien et
son mari(**NABIL**).

A mon amie et témoin de ma persévérance, ma sœur (**DOAA**), je te
souhaite le meilleur dans ton parcours académique, mon amour

A mes trois poussins (**GHAITHI**) (**MARYEM**) (**ZAINEB**) que
dieu vous protégé a ma sœur et mon âme sœur mon amie (**MARWA**)

A mon futur mari et mes enfants un jour tu seras fier de ta
mère.

Boutarfif bouthaina



Dédicace

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné
le courage et la patience pour réaliser ce travail.*

Je dédie ce modeste travail À :

*Ma chère mère (**Hanane Hladji**)*

*Mon cher père (**Tahar**)*

*Que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et
financier pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont
endurés.*

*Mes frères (**Mohamed Islam**) et (**Mohamed Kassem**)*

*Ma belle-sœur (**Assil**)*

*Ma grand-mère (**Luiza**)*

*Ma grand-mère (**Yamina**) que Dieu lui fasse miséricorde*

Mes familles Rais

Tous Mes chère Amis

Rais Fatma Zahra

Table des matières

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur le système photovoltaïque

I.1.Introduction.....	05
I.2.Situation énergétique en Algérie.....	05
I.3. Développement des systèmes photovoltaïques en Algérie.....	07
I.4. Effet photovoltaïque.....	07
I.5. La cellule photovoltaïque.....	08
I.5.1. Caractéristique électrique d'une cellule PV.....	09
I.5.2. Schéma électrique équivalent.....	10
I.6. Le module photovoltaïque.....	12
I.6.1. Protection des modules photovoltaïques.....	12
I.7. Systèmes photovoltaïques.....	14
I.7.1. Système autonome.....	14
I.7.2.Système connecté au réseau.....	14
I.8. Conclusion.....	15
I.9. Références bibliographiques.....	16

Chapitre II : Défauts liés aux systèmes photovoltaïques et méthodes de diagnostic

II.1. Introduction.....	18
II.2. Défauts dans les systèmes photovoltaïques.....	18
II.2.1. La corrosion.....	18
II.2.2. La décoloration.....	19
II.2.3. La délamination.....	20
II.2.4. Les points chauds ou Hot-spots.....	20
II.2.5. Ombrage partiel.....	21
II.2.6. Défaut de circuit ouvert.....	22
II.2.7. Défaut de court-circuit.....	22
II.3. Méthodes de détection et de diagnostic des défauts d'un système PV.....	22
II.3.1. Méthodes non –électriques.....	23
II.3.1.1. Méthode de l'imagerie numérique infrarouge thermique.....	23
II.3.1.2. Méthode de réflectométrie.....	24
II.3.2. Méthodes électriques.....	24
II.3.2.1. Méthode d'analyse de la puissance produite.....	24
II.3.2.2. Méthode d'analyse des caractéristiques I-V et P-V.....:	25
II.3.2.3. Méthode d'analyse du point de fonctionnement.....	25
II.4. Méthodes basées sur des techniques d'intelligence artificielle IA.....	25
II.4.1. Les algorithmes génétiques (AG).....	25
II.4.2. Réseaux de neurones artificiels (RNA).....	26
II.4.2.1. Physiologie du cerveau humain.....	26
II.4.2.2. Structure d'un réseau de neurones artificiels.....	27

II.5. Conclusion	29
II.6. Références bibliographiques	30

Chapitre III : Simulation de la détection et classification de défauts

III.1. Introduction	33
III.2. Simulation du générateur photovoltaïque en fonctionnement sans défaut	33
III.3. Simulation du module PV en fonctionnement défaillant	35
III.3.1. Défauts dans un module PV	35
III.3.1.1. Défaut d'ombrage	35
III.3.1.2. Défaut sur la résistance série	35
III.3.1.3. Défaut sur le nombre de cellules	36
III.3.2. Détection et classification des différents défauts	37
III.3.2.1. Détection et classification du défaut de la résistance série	37
III.3.2.2. Détection et classification d'un défaut Ns	38
III.3.2.3. Détection et classification d'un défaut d'ombrage	40
III.4. Application de la méthode des réseaux de neurones (ANN)	41
III.5. Formation du réseau	45
III.6. Conclusion	48
III.7. Références bibliographiques	52
Conclusion générale	51

INTRODUCTION

La croissance démographique et l'industrialisation ont entraîné une forte augmentation de la demande mondiale d'énergie primaire. Le secteur résidentiel représente plus d'un tiers de la demande énergétique mondiale [1]. La consommation d'énergie liée aux équipements de chauffage, ventilation et climatisation dans les bâtiments représente entre 16% et 50% de la consommation énergétique totale à l'échelle mondiale [2].

L'examen de l'utilisation finale de l'énergie par secteur d'activité en Algérie met en évidence que le secteur résidentiel occupe la deuxième position, représentant environ 41% de la consommation énergétique finale nationale. L'utilisation principale des produits pétroliers dans la consommation d'énergie entraîne une contribution significative aux émissions de gaz à effet de serre (31%) [3].

L'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national constitue un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable. Dans le cadre du programme de développement des énergies renouvelables 2011-2030, l'Algérie accorde une grande importance aux énergies renouvelables dans ses politiques énergétiques et économiques. Cela comprend le déploiement à grande échelle du photovoltaïque et de l'éolien [3].

Le générateur photovoltaïque est le seul convertisseur direct qui peut transformer les rayons solaires en énergie électrique à travers les cellules photovoltaïques. Leurs développements constituent de ce fait, un enjeu majeur dans la perspective d'un approvisionnement énergétique compatible avec les contraintes d'environnements locaux et globaux (l'ombrage total ou partiel des panneaux dû aux nuages, aux arbres, poussière, neige, l'ombres des aux feuilles, aux bâtiments...)[4]. Pendant le fonctionnement du système PV, les cellules peuvent subir des perturbations dues à l'exposition à des facteurs atmosphériques externes ou à diverses pannes internes, ce qui affecte la stabilité du système et réduit leur efficacité et leur rendement de production. La détection efficace et précise des défauts du système PV peut protéger le système contre les temps d'arrêt ou l'effondrement, tout en améliorant l'efficacité du système PV, en garantissant un fonctionnement sûr et en réduisant les coûts de production d'électricité...)[5].

Par conséquent, le développement de méthodes de diagnostic pour la détection des défauts dans le comportement des systèmes PV est particulièrement important et nécessaire en

raison du degré d'expansion des systèmes PV et de la nécessité d'optimiser leur fiabilité et leurs performances. C'est dans cette démarche que s'inscrit notre travail de mémoire dont l'objectif est le diagnostic des défauts d'un système PV .

Le manuscrit est organisé en trois chapitres, complétés par une introduction et une conclusion générales. Le chapitre initial aborde les aspects généraux des systèmes photovoltaïques, y compris des statistiques sur la production d'énergie photovoltaïque. Il présente également la construction des cellules photovoltaïques, leur fonctionnement, les différents types de cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques électriques, ainsi que la composition d'un module photovoltaïque. Dans le deuxième chapitre, nous allons discuter des différents types de défauts des cellules photovoltaïques et des méthodes de diagnostic disponibles. Le troisième chapitre se concentre sur l'utilisation de la simulation pour la détection et la classification de défauts. Nous explorerons les principes fondamentaux de la simulation, les techniques et les modèles utilisés dans ce contexte. Nous présenterons également des études de cas illustrant l'application de la simulation de détection de trois défauts (résistance en série, nombre des cellules et l'ombrage).

-
- [1] N. Belkacem, « Contribution à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales d'un habitat individuel bioclimatique : cas de la maison pilote de Souidania –Alger- (Algérie) », Thèse de doctorat, université Hassiba Benbouali de Chlef,(2017).
 - [2] Service de la donnée et des études statistiques (SDES), «Chiffres clés de l'énergie», (2018).
 - [3] Ministère de l'Energie Algérie, «Bilan énergétique national de l'année 2017», (2018).
 - [4] A. DJALAB, «Diagnosis of faults in a renewable energy system based on artificial intelligence techniques: Application on a photovoltaic system», Thèse de doctorat, Ziane Achour University of Djelfa,(2020).
 - [5] L. Bun, «Détection et localisation de défauts pour un système PV», Thèse de doctorat, Université de Grenoble,(2011).

Chapitre I :

***Généralités sur le système
photovoltaïque***

I.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques. On a commençant par un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque. Ensuite, quelques statistiques sur la production d'énergie photovoltaïque et la fabrication des modules.

Puis la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi leur principe de fonctionnement, et présentation les différents types des cellules photovoltaïques, et les différents caractéristique électrique d'une cellule. Après, nous étudierons leurs interconnexions et les éléments de sécurité à introduire lors de la réalisation d'un module ou d'un champ photovoltaïque, la constitution d'un module photovoltaïque et le système PV.

I.2.Situation énergétique en Algérie

L'énergie consommée est obtenue à la suite d'un long processus appelé chaîne énergétique. Comme illustré à la figure I.1, cette chaîne débute par une énergie primaire (Pétrole brut, buche de bois) qui subit des transformations physico-chimiques pour produire une énergie dite secondaire [1].

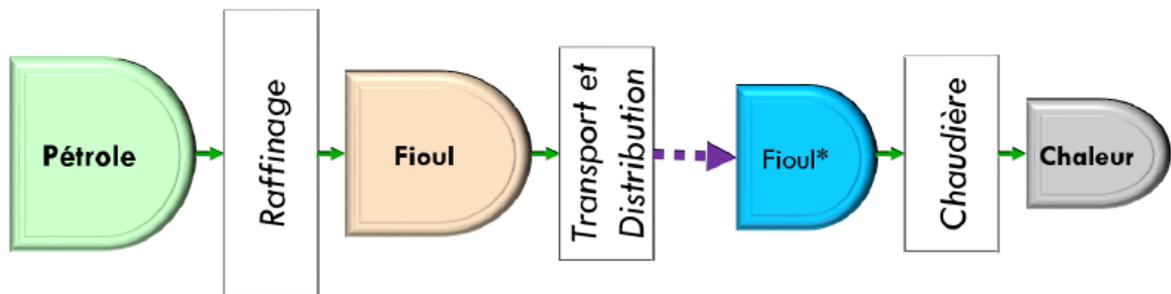


Figure I.1. La chaîne énergétique pour la production de la chaleur [1]

Sur la figure I.2 suivante on remarque une structure de la consommation d'énergie finale par produit en Algérie qui est basée essentiellement sur l'utilisation des produits pétroliers.

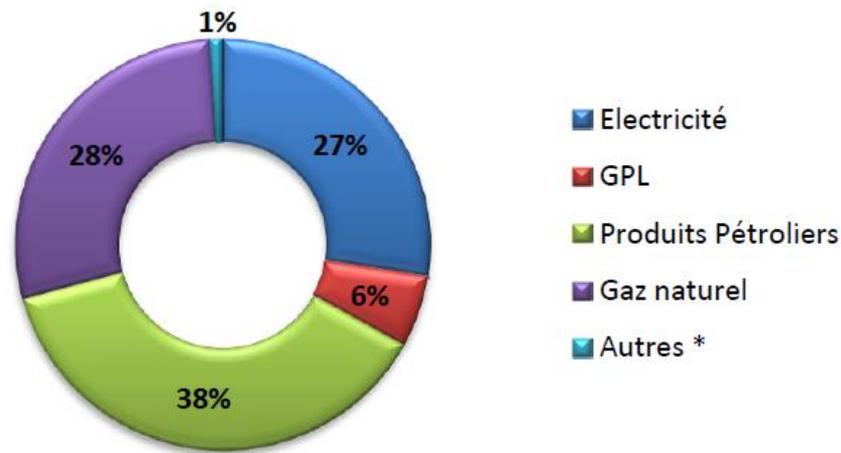


Figure I.2. Structure de la consommation d'énergie finale par produit en Algérie [2]

Afin d'analyser l'évolution de la consommation énergétique finale par secteur, on présente la figure I.3 suivante:

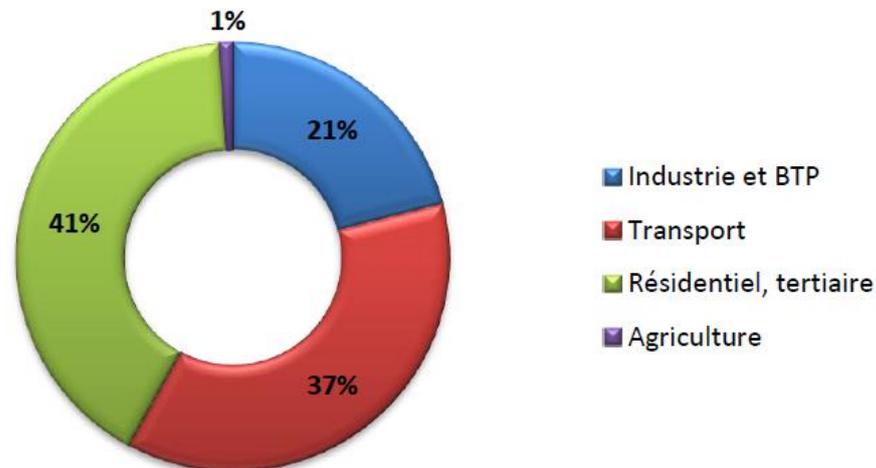


Figure I.3. Consommation énergétique finale par secteur en Algérie pour l'année 2014 [2]

L'analyse de la tendance générale de la consommation énergétique du secteur résidentiel en Algérie montre que cette énergie reste dans l'écrasante majorité, d'origine fossile, d'autre part les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont essentiellement liées à cette consommation, c'est pour cela que ce secteur occupe le second poste le plus émetteur des rejets nationaux [3].

Le concept de développement durable est un modèle de développement qui a pour but la satisfaction des besoins fondamentaux de l'humanité et la gestion rationnelle et efficace des ressources, tout en conservant et protégeant la qualité environnementale. Un développement énergétique durable implique le développement et l'utilisation des énergies renouvelables [4].

I.3. Développement des systèmes photovoltaïques en Algérie

Le programme national pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique vise la mise en service d'une capacité de production d'énergie renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030 (Figure I. 4), dont plus de 4 500 MW seront réalisés d'ici 2020 [5].



Figure I.4. Programme ERS Algérien : allocation de l'objectif de 22 GW à atteindre de 2030 [5].

I.4. Effet photovoltaïque

La technologie des cellules photovoltaïques utilise le principe de conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Une cellule solaire typique est constituée d'une jonction p-n formée dans un matériau semi-conducteur similaire à une diode. La Figure I.5 montre un schéma de la structure de la section transversale d'une cellule solaire cristalline. Elle est constituée d'une épaisse plaquette de silicium ayant deux couches aux propriétés électriques différentes. Un champ électrique est établi à la jonction entre les couches de silicium négatives et positives. Si la lumière du soleil frappe la cellule solaire, les paires de trous d'électrons sont générées à la jonction où elles sont séparées par un champ électrique. Une tension électrique est générée au niveau des contacts externes, de sorte qu'un courant circule lorsqu'une charge est connectée, comme le montre la figure I.5 [6].

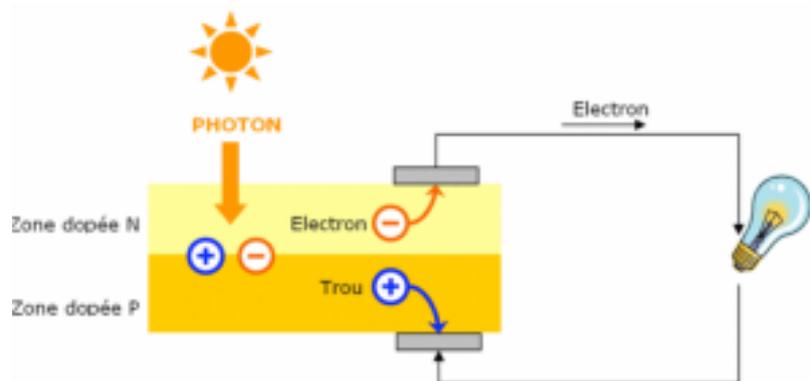


Figure I.5. Principe de l'effet photovoltaïque.

I.5. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est constituée de différentes couches de matériaux, chacune ayant un rôle particulier à jouer. Parmi ces couches, la plus essentielle est la couche semi-conductrice qui subit un traitement spécifique. Elle est composée de deux couches distinctes type p et type n (figure I.6) [7].

De chaque côté du semi-conducteur, on trouve une couche de matériau conducteur qui assure la "collecte" de l'électricité produite. Il est important de noter que la face arrière ou ombragée de la cellule peut être entièrement recouverte par le matériau conducteur, tandis que la face avant ou éclairée doit utiliser ce matériau de manière mesurée afin de ne pas obstruer une trop grande partie du rayonnement solaire atteignant le semi-conducteur. Une dernière couche, appliquée uniquement sur le côté éclairé de la cellule, constitue le revêtement antireflet. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V [8].

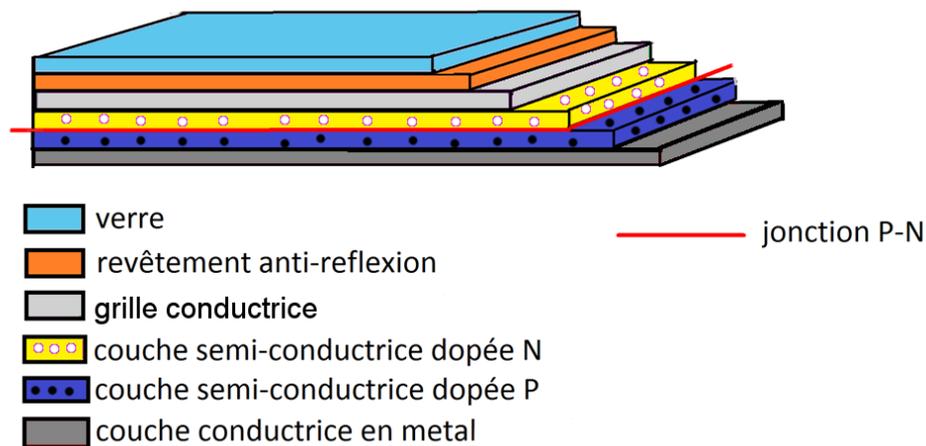


Figure I.6. Structure d'une cellule photovoltaïque[8].

Il existe trois technologies principales des cellules solaires à base de silicium : cellule en silicium monocristallin, poly-cristallin et cellule en silicium amorphe avec une quatrième technologie qui consiste à la mise en contact des deux matériaux, appelé cellule hétérojonction.

I.5.1. Caractéristique électrique d'une cellule PV

En l'absence de lumière, le courant à travers une structure de type jonction p-n est connu sous le nom de courant d'obscurité, qui peut être représenté par la formule suivante :

$$I_{abs} = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{gKT}\right) - 1 \right) \quad (I.1)$$

Le courant d'obscurité, également connu sous le nom de courant de diode (I_d), est généré par la polarisation de la jonction dans une cellule photovoltaïque. Ainsi, le courant fourni à une charge par une cellule photovoltaïque éclairée peut être exprimé de la manière suivante:

$$I(V) = I_{ph} - I_{abs}(V) \quad (I.2)$$

Soit :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{gKT}\right) - 1 \right) \quad (I.3)$$

Au sein d'une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et le courant d'obscurité. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode, sous éclairement la caractéristique à l'allure présentée sur la figure I.7.

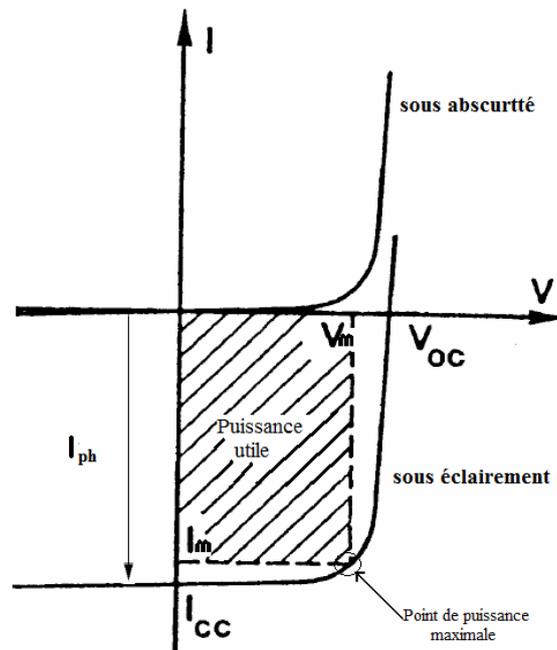


Figure I.7. Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.

Les grandeurs caractéristiques suivantes peuvent être extraites de ce graphique :

- V_{co} : tension de circuit ouvert : elle représente la tension aux bornes de la cellule sous

éclairage sans circuit de charge. V_{co} est donnée par la relation :

$$V = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} - 1 \right) \quad (I.4)$$

- I_{cc} : courant de court-circuit correspondant à $V=0$.
- V_m : tension correspondant à la puissance maximale fournie.
- I_m : courant correspondant à la puissance maximale fournie.

Le point de fonctionnement de la cellule photovoltaïque est déterminé par la résistance de charge plutôt que par la cellule elle-même. En choisissant soigneusement la résistance de charge, il est possible d'atteindre la puissance maximale souhaitée. soit : $P_m = V_m \cdot I_m$.

- FF : facteur de forme, il détermine la qualité électrique de la cellule.

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

Dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0,89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension.

- η : le rendement est le rapport entre la puissance électrique fournie par la cellule et la puissance incidente.

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{E \times S} \quad (I.6)$$

I.5.2. Schéma électrique équivalent

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairage, et celui d'un générateur de courant produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement réel de la cellule. Pour tenir compte des différentes limitations de la cellule photovoltaïque, on introduit le modèle à deux diodes représenté sur la figure I.8 [9].

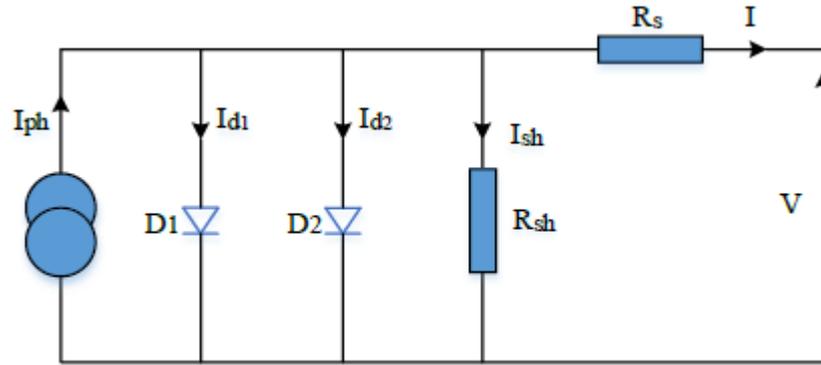


Figure I.8. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- Le générateur de courant : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo-généré.
- La résistance série R_s : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques.
- La résistance parallèle R_p : également connue sous le nom de résistance de court-circuit. Elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur.
- La diode d_1 : elle modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.
- La diode d_2 : elle modélise la génération-recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace.

Le courant au sein de la cellule photovoltaïque est donné par la relation :

$$I = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{Y_1 K T_c} \right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{Y_2 K T_c} \right) - 1 \right) + \frac{V + IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (I.7)$$

Le terme en I_{01} correspond au courant de diffusion dans la base et l'émetteur, I_{01} à proprement parler est le courant de saturation de ce phénomène. Le paramètre Y_1 est le facteur d'idéalité de la diode d_1 , et doit être proche de 1 dans ce cas. Le terme en I_{02} traduit la recombinaison de porteurs au sein de la zone de charge d'espace. I_{02} est le courant de saturation, et Y_2 est le facteur d'idéalité de la diode d_2 , qui doit être ≥ 2 .

I.6. Le module photovoltaïque

Le module PV est construit en connectant des groupes de cellules PV en série et en parallèle avec leurs dispositifs de protection, ce qui représente l'unité de conversion dans le système de production. La plupart des modules commerciaux sont composés de 36 ou 72 cellules. Les modules se composent d'une face avant transparente, des cellules PV encapsulées et d'une face arrière (Figure I.9). Pour protéger les modules PV contre le point chaud (hot-spot) à cause d'un déséquilibre d'éclairement il faut monter une diode au silicium "diode de by-pass" en parallèle tête-bêche sur une branche en général de dix-huit cellules en série [10].

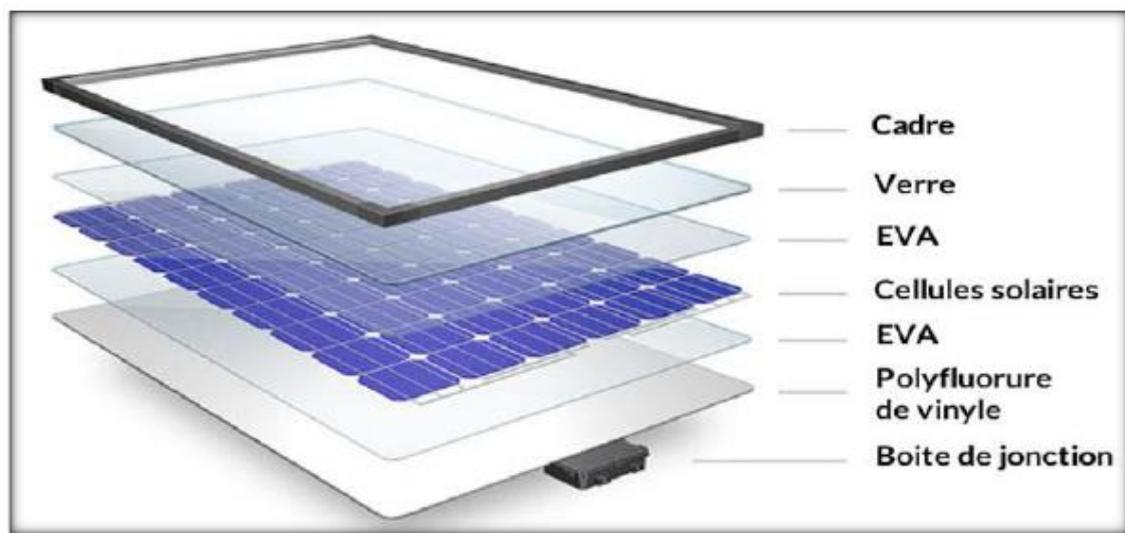


Figure I.9. Structure d'un module photovoltaïque [10].

Pour augmenter la tension, les modules peuvent être connectés en série, tandis que pour augmenter le courant, ils peuvent être connectés en parallèle.

I.6.1. Protection des modules photovoltaïques

Deux types de protections sont employés dans les installations photovoltaïques; la diode de dérivation (ou diode by-pass) et la diode anti-retour.

Selon l'illustration figurant à la figure I.10, la cellule ombragée cesse de générer de l'énergie électrique et présente plutôt un comportement similaire à celui d'une résistance semi-conductrice. Donc elle génère moins de courant que les deux autres cellules, ce qui diminue fortement la production d'énergie de la chaîne. En conséquence, la puissance produite par les cellules exposées au soleil sera absorbée par la cellule ombragée, ce qui peut entraîner une surchauffe progressive (points chauds) et éventuellement la dégradation de ladite cellule défaillante [11].

Les diodes de by-pass sont connectées à l'extérieur et en antiparallèle avec chaque cellule PV pour fournir un chemin électrique alternatif pour courant généré. Car il ne peut pas traverser la cellule lorsqu'il est ombragé [12].

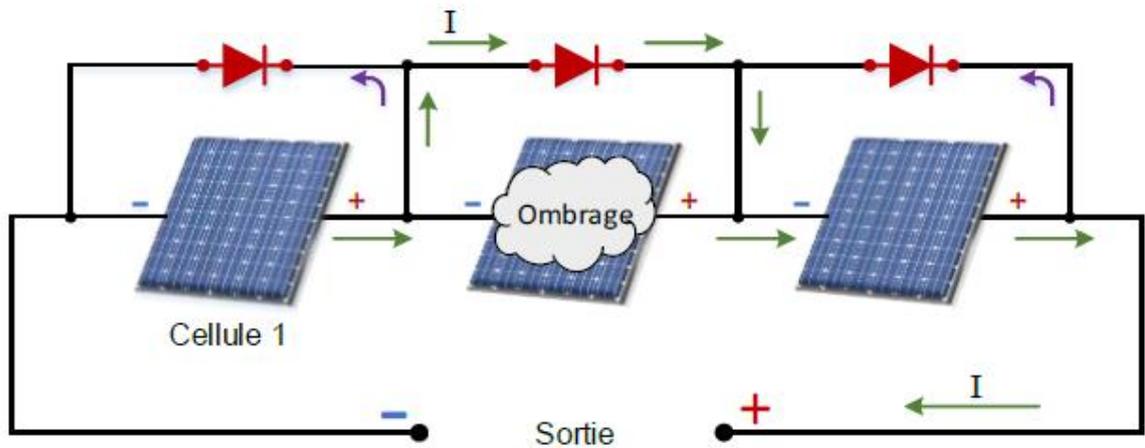


Figure I.10. Schéma de fonctionnement de diode by-pass [11].

Dans la nuit, lorsqu'aucune tension n'est produite par les panneaux, la tension de la batterie ferait circuler un courant dans la direction opposée à travers les panneaux, déchargeant la batterie. Les diodes anti-retour seront nécessaire dans tel système pour charger une batterie (Figure I.11) [12].

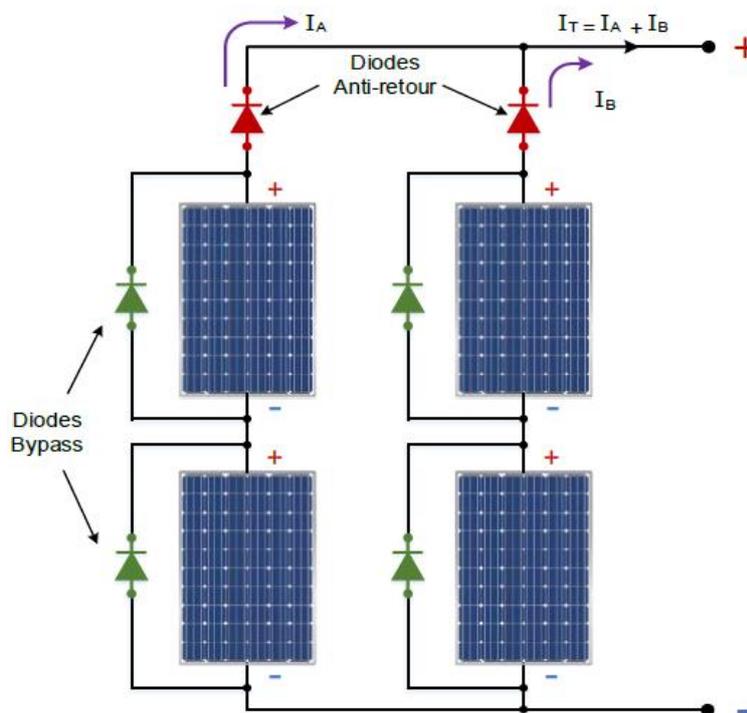


Figure I.11. Schéma d'un champ photovoltaïque avec diodes by-pass et diode anti-retour[11].

I.7. Systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée [13].

I.7.1. Système autonome

Les systèmes autonomes ont pour objectif de fournir de l'énergie à un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone éloignée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la figure I.12 qui représente l'exemple d'un système PV autonome, pour alimenter des équipements tels que des lampes, des petits appareils (radio, télévision, ordinateur, des pompes, etc...). Le système fournit généralement une tension nominale de 12V en courant continu (CC) qui peut être adapté en fonction de son utilisation, (12VCC, 24VCC, 220VCA ou 110 VCA)[13].

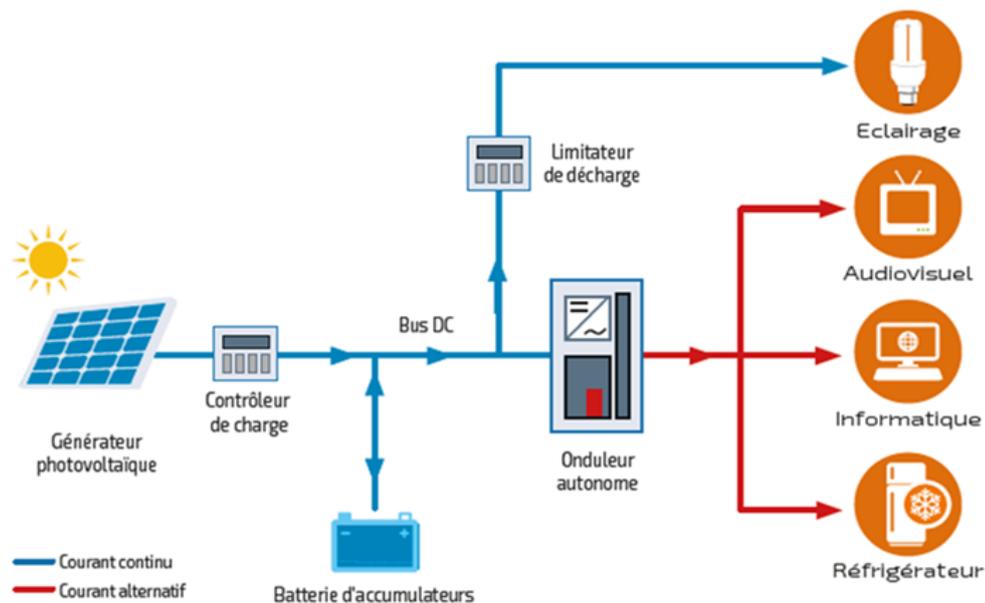


Figure I.12. Schéma de principe d'un système PV autonome .

I.7.2. Système connecté au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement, voir figure I.13 les installations non autonomes rattachées au réseau de distribution électrique.

Dans Les systèmes reliés aux réseaux, les consommateurs standards de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur).

Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public et les demandes de puissance qui existent l' capacité de production du générateur sont attachées sur le réseau [14].

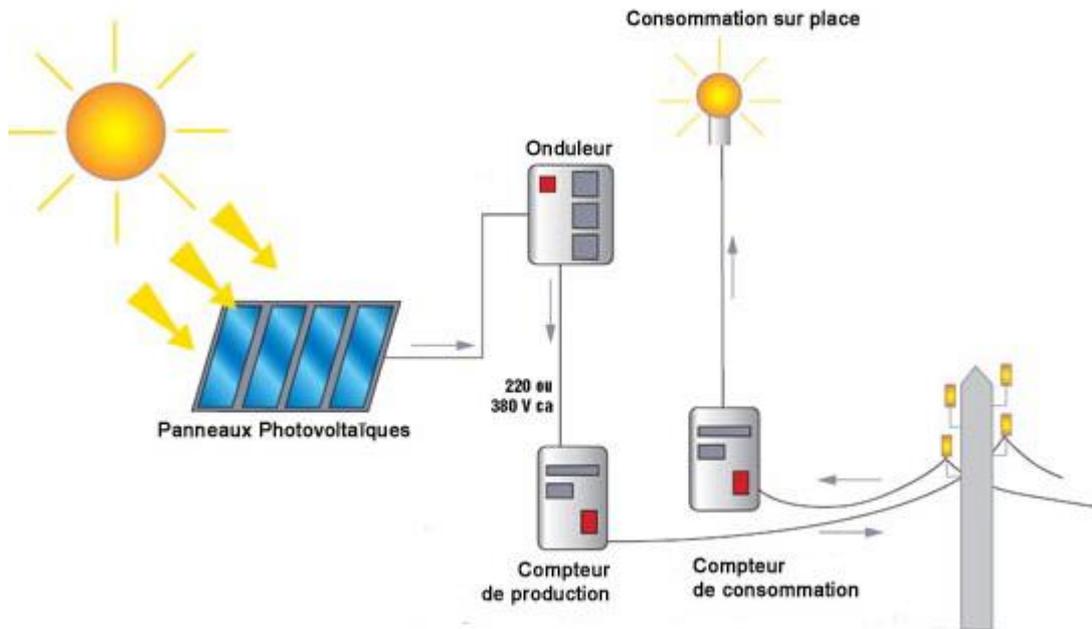


Figure 1.13. Schéma de principe d'un système PV autonome .

I.8. Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons exposé des généralités sur les systèmes de production de l'énergie électrique qui se repose sur l'effet photovoltaïque, dans ce cadre des statistiques sur la production mondiale en été présenté au premier lieu. Puis le principe de la conversion, types des cellules, et les caractéristiques du module PV ainsi que les différents types du système photovoltaïque en été bien détaillé.

Le second chapitre sera consacré sur les défauts liés aux systèmes photovoltaïques et méthodes de diagnostic.

I.9. Références bibliographiques

- [1] N. Belkacem, « Contribution à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales d'un habitat individuel bioclimatique : cas de la maison pilote de Souidania –Alger- (Algérie) », Thèse de doctorat, université Hassiba Benbouali de Chlef,(2017).
- [2] Ministère de l'Energie Algérie, «Bilan énergétique national de l'année 2017», (2018).
- [3] Ministère de l'Energie Algérie, «Bilan énergétique national de l'année 2016», (2017).
- [4] Ministère de l'Energie Algérie, «Bilan énergétique national de l'année 2014», (2015).
- [5] International Energy Agency (IEA), «World energy outlook », (2018).
- [6] H. Mathieu, «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », Edition Masson, Paris, (1990)..
- [7] B.Louzanza,S .Madi,D.Rekioua, «Etude et caractérisation d'un panneau photovoltaïque type Condor», Thèse doctorat ,Université Abderrahmane Mira, Bejaia,(2015).
- [8] A. Mekemeche, «Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes», Thèse doctorat , Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem,(2017).
- [9] A.Fauveau, «Etude des mécanismes de conduction électrique à basse température pour la mesure des teneurs en dopants dans le silicium photovoltaïque», Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France,(2017).
- [10] R. Khenfer, « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques», Thèse Doctorat, Université Farhat Abbas Setif, (2008).
- [11] A. DJALAB, «Diagnosis of faults in a renewable energy system based on artificial intelligence techniques: Application on a photovoltaic system», Thèse de doctorat, Ziane Achour University of Djelfa,(2020).
- [12] K. Kato,H. Koizumi, « A study on effect of blocking and bypass diodes on partial shaded PV string with compensating circuit using voltage equalizer », IEEE international symposium on circuits and systems,(2015).
- [13] H. Bouzeria, «Modélisation et commande d'une chaine de conversion photovoltaïque», Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Alger,(2016).
- [14] 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, Alger,(2015).

Chapitre II :

***Défauts liés aux systèmes
photovoltaïques et méthodes de
diagnostic***

II.1. Introduction

Les défauts des cellules photovoltaïques peuvent être causés par des facteurs tels que des matériaux défectueux, des dommages mécaniques, des problèmes de fabrication ou des conditions environnementales défavorables. Il est donc essentiel de diagnostiquer les défauts des cellules photovoltaïques afin d'assurer le bon fonctionnement et la durabilité des systèmes photovoltaïques.

Parmi les méthodes de diagnostic possibles, on trouve l'inspection visuelle, la mesure de la tension et du courant, la thermographie infrarouge,....etc.

Dans ce chapitre, nous allons discuter des différents types de défauts des cellules photovoltaïques et des méthodes de diagnostic disponibles.

II.2. Défauts dans les systèmes photovoltaïques

Les défauts dans le système PV peuvent être définies comme temporaires ou permanentes. Les défauts temporaires sont souvent causés par des effets d'ombrage et l'encrassement des modules. Les défauts permanents des modules sont : le délaminage, les bulles, le jaunissement des cellules, les rayures et les cellules brûlées [1].

Les défauts d'un système photovoltaïque peuvent être catégorisés en tant que défauts au niveau des modules, des chaînes ou du réseau, en fonction des composants spécifiques du système photovoltaïque concernés [2].

II.2.1. La corrosion

La corrosion est un des modes de dégradation des modules photovoltaïques, il attaque les connexions métalliques des cellules du module photovoltaïque provoquant une augmentation des courants de fuite et ainsi une perte de performance. La cause principale de la corrosion est l'humidité, elle pénètre dans le module photovoltaïque à travers les bords stratifiés [3]. Ce mode de dégradation dégrade aussi l'adhérence entre les cellules et le cadre métallique, un exemple de la corrosion au niveau de la bordure et de la boîte de jonction est noté sur la figure II.1.

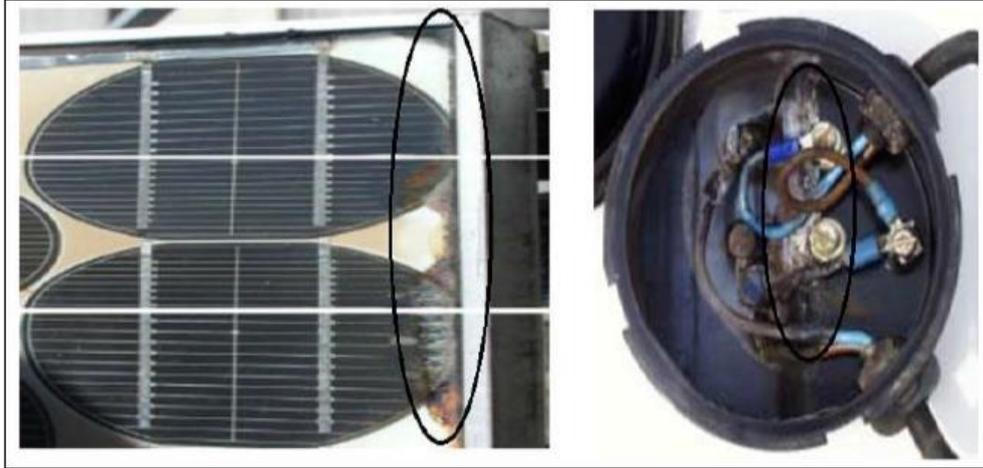


Figure. II.1. La dégradation du module par la corrosion[3].

II.2.2. La décoloration

Ce processus de dégradation des modules photovoltaïques se manifeste par un changement de couleur du matériau utilisé pour l'encapsulation, qui est généralement de l'éthylène-acétate de vinyle (EVA) ou un adhésif entre le verre et les cellules [4]. Ce changement de couleur peut se traduire par un jaunissement ou un brunissement du matériau d'encapsulation, comme illustré dans la figure II.2.

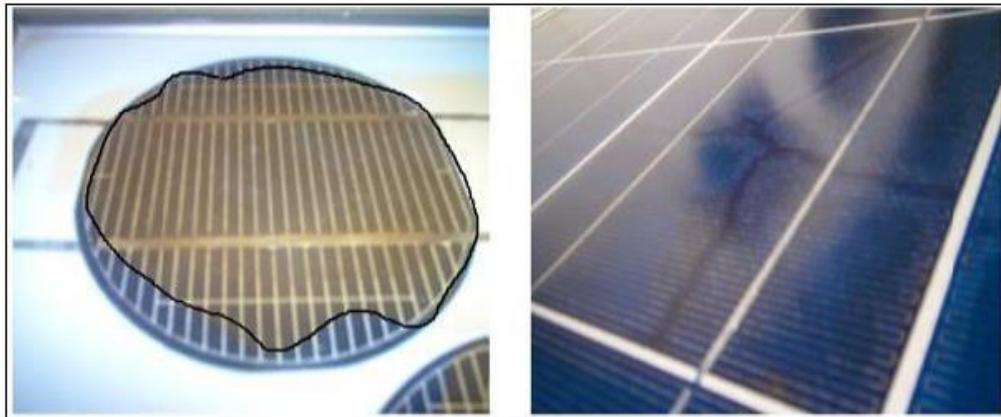


Figure. II.2. Dégradation du module photovoltaïque par décoloration [4].

II.2.3. La délamination

Il traduit la perte d'adhérence entre le polymère encapsulant et les cellules ou entre les cellules et le verre avant. Un exemple est illustré sur la figure II.3. Ce mode de dégradation est plus fréquent dans les climats chauds et humides, il favorise une pénétration de l'humidité dans le module et provoque, par la suite, différentes réactions chimiques à l'intérieur du module induisant des dégradations telles que la corrosion des métaux de la structure du module le plus souvent [5].

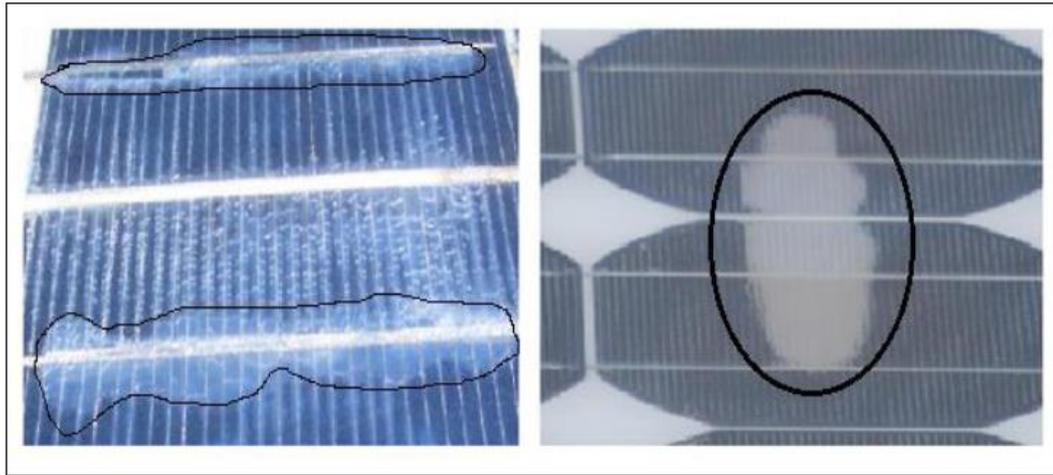


Figure. II.3. Dégradation du module photovoltaïque par délamination [5].

II.2.4. Les points chauds ou Hot-spots

Le défaut de point chaud dans les cellules photovoltaïques peut se produire lorsqu'une partie de la cellule devient plus chaude que les autres parties. Cela peut être causé par des variations dans la résistance de la cellule, des irrégularités dans la distribution de la lumière, des défauts de fabrication ou d'autres facteurs [6].

Lorsqu'un défaut de point chaud se produit dans une cellule photovoltaïque, cela peut causer des dommages à la cellule elle-même, réduire la puissance de sortie du panneau solaire et même causer des risques d'incendie. Les fabricants de panneaux solaires utilisent différentes techniques pour minimiser les risques de défauts de point chaud, notamment en concevant les cellules avec une distribution uniforme de la lumière, en utilisant des matériaux de qualité et en testant les cellules individuellement pour détecter les défauts [7].

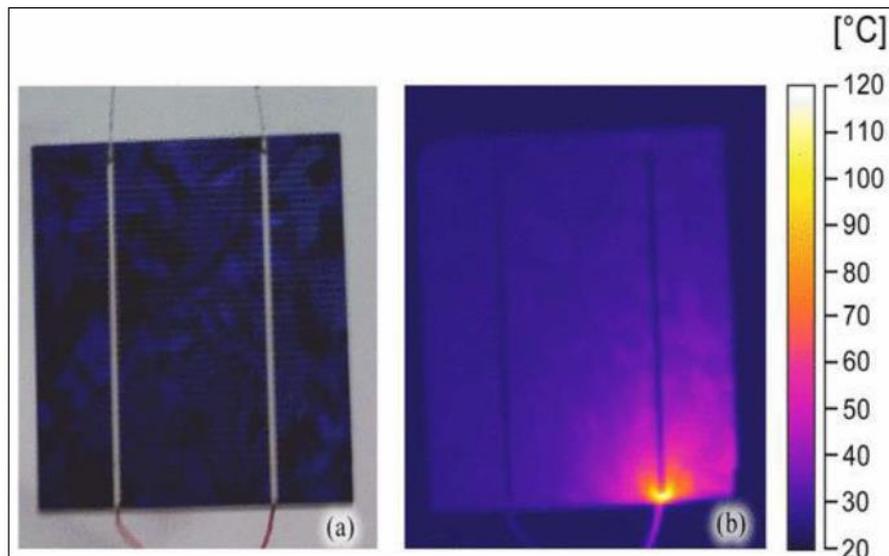


Figure.II.4. Exemple de la localisation de défauts des points chauds [7].

II.2.5. Ombrage partiel

L'ombrage partiel des panneaux solaires photovoltaïques est un phénomène dans lequel une partie du panneau est partiellement couverte ou ombragée par des objets tels que des arbres, des bâtiments ou des structures voisines. Cela peut entraîner une diminution significative de la production d'énergie solaire, car l'ombrage réduit l'intensité de la lumière solaire atteignant les cellules photovoltaïques [8].



Figure.I.5. Exemple d'ombrage partiel.

II.2.6. Défaut de circuit ouvert

Un défaut de circuit ouvert se produit lorsqu'il y a une interruption dans le circuit électrique d'un panneau solaire photovoltaïque. Cela signifie qu'il n'y a pas de flux de courant continu dans le circuit, ce qui entraîne une incapacité à générer de l'électricité. Les causes possibles d'un défaut de circuit ouvert peuvent inclure des connexions lâches, des câbles endommagés ou des cellules photovoltaïques défectueuses. Il est important de détecter et de résoudre rapidement les défauts de circuit ouvert afin de restaurer le bon fonctionnement du système photovoltaïque. [9,10].

II.2.7. Défaut de court-circuit

Un défaut de court-circuit se produit lorsqu'il y a un contact direct entre les parties conductrices d'un circuit électrique d'un panneau solaire photovoltaïque. Cela crée une boucle de courant continue sans résistance, ce qui entraîne une augmentation significative du courant électrique. Les défauts de court-circuit peuvent être causés par des connexions défectueuses, des câbles endommagés, des cellules photovoltaïques endommagées ou d'autres éléments défectueux du système. Ces défauts peuvent entraîner des risques de surchauffe, de dommages au matériel et même de sécurité. Ils doivent être identifiés et réparés rapidement pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité du système photovoltaïque [11].

II.3. Méthodes de détection et de diagnostic des défauts d'un système PV

Dans ce contexte, les chercheurs ont proposé plusieurs méthodes de diagnostic dédié aux systèmes photovoltaïques. Ils peuvent être classés globalement en deux catégories principales comme présenter dans le tableau II.1 [12] :

Tableau II.1. Méthodes de diagnostic de défauts [12]

Méthodes de diagnostic	
Méthodes non électriques	Méthodes électriques
<ul style="list-style-type: none"> - Méthode de l'imagerie numérique infrarouge thermique. - Méthode de réflectométrie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode d'analyse de la puissance produite. - Méthode d'analyse des caractéristiques I-V et P-V. - Méthode d'analyse du point de fonctionnement. - Méthodes basées sur des techniques d'intelligence artificielle IA.

II.3.1. 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 [12].

II.3.1.1. Méthode de l'imagerie numérique infrarouge thermique

La méthode d'imagerie thermique infrarouge numérique pour les modules photovoltaïques (PV) est une technique de diagnostic qui utilise des caméras thermiques pour détecter les variations de température sur la surface des panneaux solaires. Cette méthode permet de visualiser les points chauds, les zones d'ombrage, les cellules défectueuses ou endommagées, ainsi que les connexions électriques défectueuses. En capturant les images thermiques des modules PV, cette méthode offre une évaluation rapide et non destructive de l'état de fonctionnement des panneaux solaires. Elle est largement utilisée dans l'industrie photovoltaïque pour la détection précoce des problèmes et la maintenance proactive des installations solaires [13].

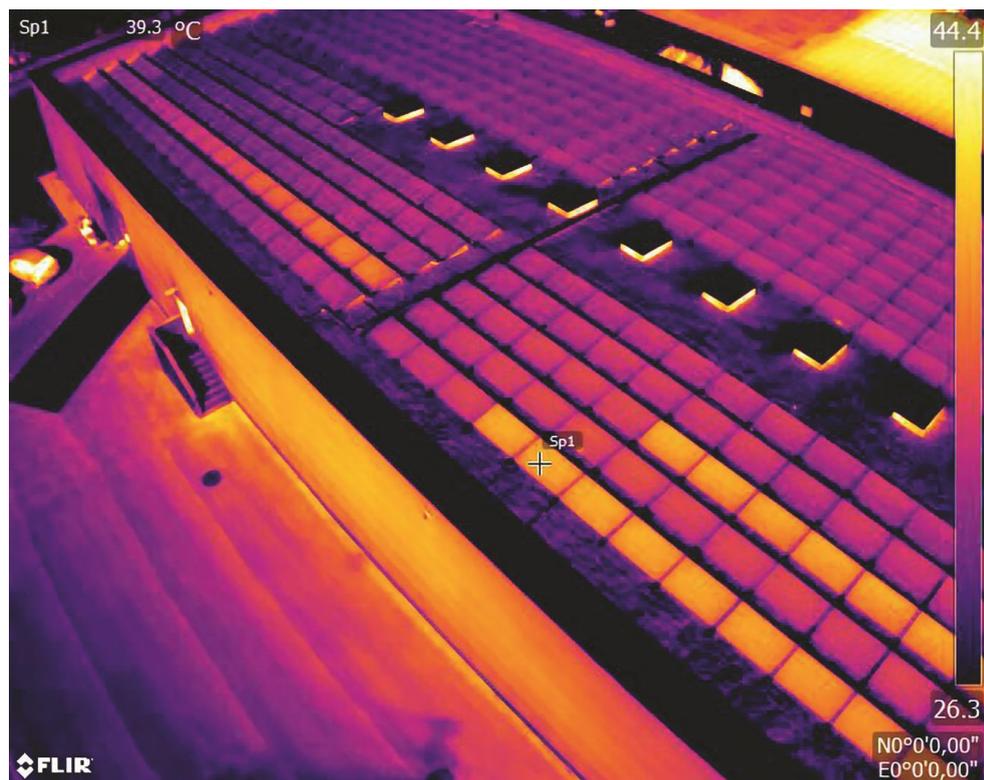


Figure.II.6. Exemple d'imagerie thermique infrarouge numérique pour un champ photovoltaïques

II.3.1.2. Méthode de réflectométrie

La réflectométrie fonctionne sur le même principe que celui d'un radar : une impulsion ou un signal est transmis dans le champ PV à diagnostiquer. N'importe quelle discontinuité (fissure, défaut, court-circuit, circuit ouvert) se comporte comme un obstacle à cette impulsion incidente et provoque une réflexion. Puis de mesurer les échos retournés. Le retard et l'amplitude des échos sont utilisés pour obtenir des informations sur la localisation, la caractérisation et éventuellement la prédiction du défaut.

Cependant, la détection précoce de défauts d'un champ PV nécessite un traitement de données puissant avec un échantillonnage très rapide, ce qui augmente la complexité et le coût du système de diagnostic [14-15].

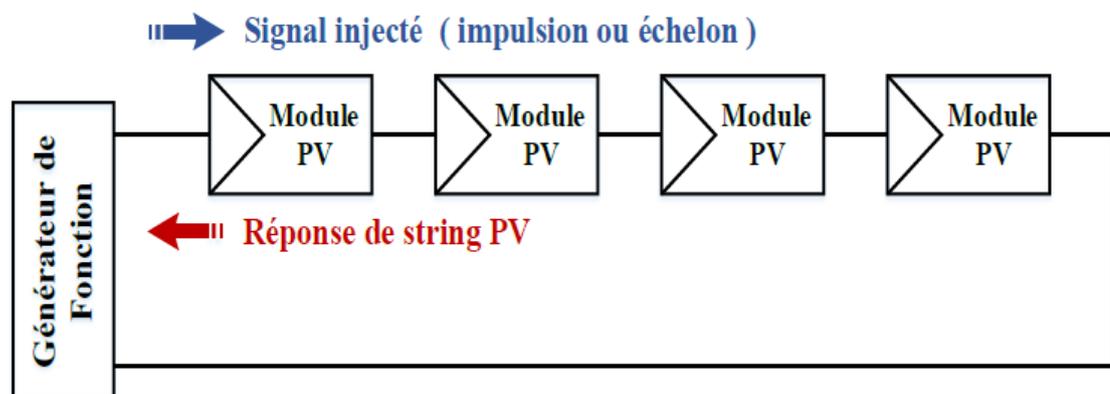


Figure.II.7. Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV [14].

II.3.2. Méthodes électriques

Les paramètres électriques tels que le courant, la tension et la puissance sont les données d'entrée de ces méthodes. Dans la littérature, on trouve quatre principaux types de méthodes.

II.3.2.1. Méthode d'analyse de la puissance produite

La méthode d'analyse de la puissance produite est une approche couramment utilisée pour évaluer les performances des systèmes photovoltaïques. Cette méthode implique la mesure et l'analyse de la puissance électrique réellement produite par les panneaux solaires.

Les données de courant et de tension sont collectées à intervalles réguliers, puis utilisées pour calculer la puissance instantanée. Ces mesures permettent de détecter les éventuels problèmes tels que des défauts de cellules, des ombrages partiels ou des pertes de performance [16].

II.3.2.2. Méthode d'analyse des caractéristiques I-V et P-V

Le recueil de grandeurs mesurées (courant et tension) à différents points du champ photovoltaïque permet de détecter et de localiser précisément l'emplacement du défaut à l'aide des capteurs placés dans le champ PV[16].

II.3.2.3. Méthode d'analyse du point de fonctionnement

Cette méthode repose sur l'analyse et la comparaison du point de puissance maximale actuel de l'installation PV et celui attendu. Cette méthode offre la possibilité de détecter automatiquement la présence d'un défaut sans interrompre le système [16].

II.4. Méthodes basées sur des techniques d'intelligence artificielle IA

Les méthodes de l'IA ont été développées pour imiter le raisonnement humain dans la prise de la décision. Elles ont pour objectif de simplifier et rendre la tâche du diagnostic plus simple et plus facile. Au cours de la dernière décennie, les techniques d'intelligence artificielle ont prouvé leur capacité de modélisation, de contrôle, de prédiction et de prévision dans le système PV [16].

II.4.1. Les algorithmes génétiques (AG)

Les AGs sont des techniques d'optimisation stochastiques. Ils ont été introduits par Hollande en 1970. Les algorithmes génétiques (AG) sont des techniques d'optimisation et de recherche inspirées par la théorie de l'évolution biologique. Ils sont utilisés pour résoudre des problèmes complexes et trouver des solutions efficaces dans divers domaines.

Les algorithmes génétiques (AG) peuvent également être utilisés dans le domaine du diagnostic des défauts des systèmes photovoltaïques (PV). Dans ce contexte, les AG peuvent être appliqués pour trouver des solutions efficaces et optimisées dans l'identification et la localisation des défauts potentiels des modules PV [17].

II.4.2. Réseaux de neurones artificiels (RNA)

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont inspirés de la méthode de travail du cerveau humain qui est totalement différente de celle d'un ordinateur. Le cerveau humain se base sur un système de traitement d'information parallèle et non linéaire, très compliqué, ce qui lui permet d'organiser ses composants pour traiter, d'une façon très performante et très rapide, des problèmes très compliqués tel que la reconnaissance des formes [18].

II.4.2.1. Physiologie du cerveau humain

La physiologie du cerveau montre que celui-ci est constitué de cellules (les neurones) interconnectées.

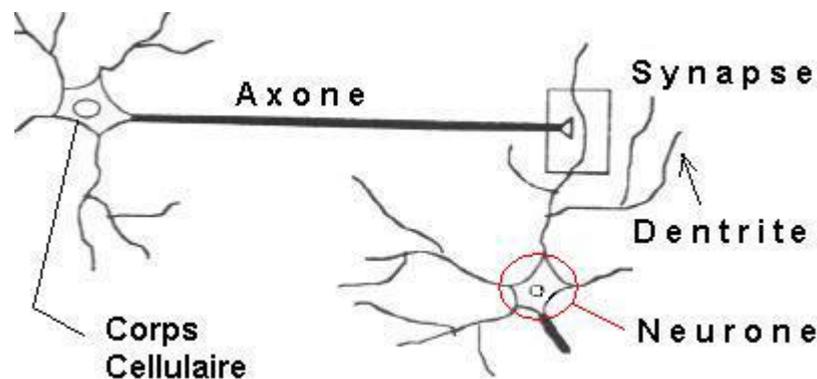


Figure.II.8. Modèle d'un neurone [18].

Les neurones reçoivent les signaux (impulsions électriques) par des extensions très ramifiées de leur corps cellulaire (les dendrites) et envoient l'information par de longs prolongements (les axones). Les impulsions électriques sont régénérées pendant le parcours le long de l'axone. La durée de chaque impulsion est de l'ordre d'1 ms et son amplitude d'environ 100 mV. Les contacts entre deux neurones, de l'axone à une dendrite, se font par l'intermédiaire des synapses.

- le cerveau contient environ 100 milliards de neurones.
- la vitesse de propagation des influx nerveux est de l'ordre de 100m/s, c'est à dire bien inférieure à la vitesse de transmission de l'information dans un circuit électronique.
- on compte de quelques centaines à plusieurs dizaines de milliers de contacts synaptiques par neurone. Le nombre total de connexions est estimé à environ 10^{15} .
- la connectique du cerveau ne peut pas être codée dans un "document biologique" tel l'ADN pour de simples raisons combinatoires. La structure du cerveau provient donc en partie des contacts avec l'environnement. L'apprentissage est donc indispensable à son développement [18].

II.4.2.2. Structure d'un réseau de neurones artificiels

Un neurone est l'unité élémentaire de traitement d'un réseau de neurones. Il est connecté à des sources d'information en entrée (d'autres neurones par exemple) et renvoie une information en sortie.

Un neurone artificiel reçoit en entrée des entrées numériques x_i valorisée chacune par un coefficient w_i . Le neurone artificiel effectue alors une somme pondérée de ses entrées et lui ajoute un coefficient w_0 dit de biais supposé lié à une donnée $x_0 = -1$.

$$S = w_1 \cdot x_1 + \dots + w_N x_N - w_0 = \sum_{i=1}^N w_i x_i - w_i. \quad (\text{II.1})$$

Cette donnée est passée à une fonction f dite d'activation qui représente un filtre permettant d'adapter la valeur de la somme précédente aux caractéristiques de la sortie désirée. C'est une fonction qui, généralement, doit renvoyer un réel proche de 1 quand les "bonnes" informations d'entrée sont données et un réel proche de 0 quand elles sont "mauvaises". La valeur de la fonction d'activation est la sortie y du neurone [19].

$$y = f(\sum_{i=1}^N w_i x_i - w_0) \quad (\text{II.2})$$

La figure suivante résume la composition d'un neurone artificiel:

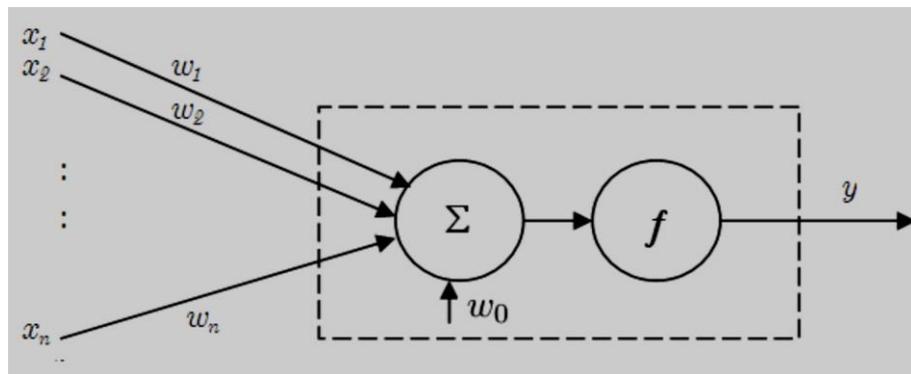


Figure.II.9. Composition d'un neurone artificiel [18].

L'architecture d'un réseau de neurones artificiel est définie par la structure de ses neurones et leur connectivité. Elle est spécifiée par le nombre d'entrées, de sorties, de nœuds et la façon selon laquelle sont interconnectés et organisés les nœuds.

❖ Réseau de neurone monocouche (Perceptron)

Le réseau le plus simple est celui monocouche appelé le perceptron et caractérisé de la manière suivante :

– Il possède N informations en entrée.

- Il est composé de p neurones, que l'on représente généralement alignés verticalement. Chacun peut en théorie avoir une fonction d'activation différente. En pratique, ce n'est généralement pas le cas.
- Chacun des p neurones est connecté aux N informations d'entrée.

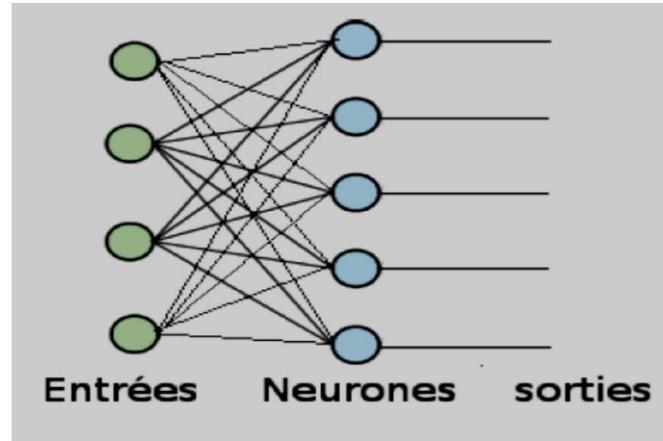


Figure II.10. Réseau de neurone monocouche [18].

Le réseau de neurones possède ainsi N informations en entrée et P sorties, chaque neurone renvoyant sa sortie. Une utilisation courante est que chaque neurone de la couche représente une classe. Pour un exemple X donné, on obtient la classe de cet exemple en prenant la plus grande des p sorties [19].

❖ Réseau de neurone multicouche

Dans ce réseau, les neurones de la première couche reçoivent toutes les informations entrées, ceux de la deuxième reçoivent toutes les sorties des neurones de la première couche, et ainsi de suite jusqu'au neurone de sortie qui reçoit celles de la dernière couche.

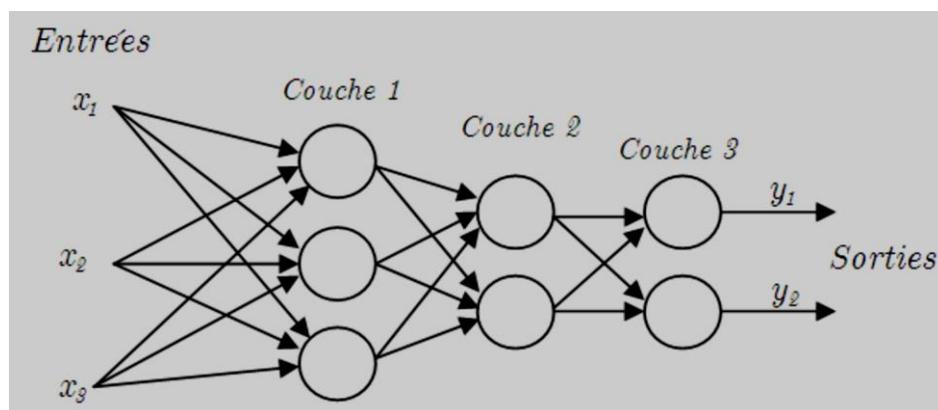


Figure II.11. Réseau de neurone multicouche [18].

Les couches 1 et 2 s'appellent des couches cachées tandis que la couche 3 est la couche de sortie.

La tâche principale des réseaux de neurones artificiels est l'apprentissage pour la classification, qui est réalisée par un processus itératif d'adaptation des poids w_i pour arriver à la meilleure fonction permettant d'avoir $f(x_i) = y_i$. Les valeurs des w_i sont initialisées aléatoirement, et corrigées selon les erreurs entre les y_i obtenus et attendus. Dans un réseau de neurones multicouches, la correction se fait dans le sens inverse du sens de propagation des données ce qui est appelé la "backpropagation"[20].

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la majorité des défauts et anomalies qui peuvent apparaître dans les systèmes PV. On a montré que ces défauts peuvent être divisés en général aux défauts de fabrication, et aux défauts dus aux conditions climatiques et aux conditions d'exploitation.

Nous avons présenté aussi un état de l'art des différentes méthodes de diagnostic des systèmes photovoltaïques. Où son rôle consiste à suivre le fonctionnement des PV dans le but de détecter, localiser et établir un diagnostic des défaillances qui affecte ces performances et sa sûreté de fonctionnement.

II.6. Références bibliographiques

- [1] 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).
- [2] G. Zwingelstein, « *Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels.* », Bejaia, Alger (1995).
- [3] Oreski G., Wallner G.M, «*Evaluation of the aging behavior of ethylene copolymer films for solar applications under accelerated weathering conditions*», *Solar Energy* 83, 1040–1047-(2009).
- [4] B. Fathi, « *Etude de la dégradation des panneaux photovoltaïque de l'université de Biskra*», Mémoire Master, Biskra,(2019).
- [5] Munoz M.A., Alonso-Garcia M.C., Nieves Vela, Chenlo F., " *Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions*", *Solar Energy* 85, 2264–2274, (2011).
- [6] L. Bun, « *Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque*», Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, (2011).
- [7] A. DJALAB, «*Diagnosis of faults in a renewable energy system based on artificial intelligence techniques: Application on a photovoltaic system*», Thèse de doctorat, Ziane Achour University of Djelfa,(2020).
- [8] L. Bun, «*Détection et localisation de défauts pour un système PV*», Thèse de doctorat, Université de Grenoble,(2011).
- [9] 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*», Vol 62, pp. 695-709, (2016).
- [10] T. Pei,X. Hao, « *A Fault Detection Method for Photovoltaic Systems Based on Voltage and Current Observation and Evaluation*», *Energies*. Vol 12, pp. 1712, (2019).
- [11] G. M. Tina, F. Cosentino,C. Ventura, «*Monitoring and diagnostics of photovoltaic power plants*», In *Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II*, Springer. p. 505-516. (2016).
- [12] D. Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez, "Photovoltaic module diagnostics by series resistance monitoring and temperature and rated power estimation " in *Industrial Electronics, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Orlando, FL 2008*, pp. 2195 – 2199, ,(2008).
- [13] M. Hassan Alia, A. Rabhi, A. El hajjajiand Giuseppe M. Tina, « *Time Fault Detection in Photovoltaic Systems*», 8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-16, 11-13 September 2016, Turin, ITALY. *Energy Procedia* 111 (2017).
- [14] K.-H. Chao, S.-H. Ho and M.-H. Wang , «*Modeling and fault diagnosis of a photo voltaic system*», *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 97-105, (2008).
- [15] F. Barruel, N. Chantreuil and A. Labrunie, « *Procédé de diagnostic de la défaillance d'un générateur photovoltaïque* », France Patent FR2944647, (2010).
- [16] S. Merouan, « *Détection des défauts dans les systèmes photovoltaïque basée sur les techniques d'intelligence artificielle*», Mémoire Master, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, (2020).
- [17] A.E. Toubal Maamar, S. Ladjouzi, R. Taleb and Y. Kacemi, « *Détection et classification de défauts pour un GPV: Etude comparative entre la méthode de seuillage et réseaux de neurones* », *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 21 N°1 45 – 53, (2018).

- [18] Xihe Ge, « Brève introduction aux réseaux de neurones artificiels », *Culture Sciences de l'Ingénieur*, (2022).
- [19] Machine learning course: <https://www.coursera.org/learn/machine-learning>
- [20] LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.

Chapitre III :

***Simulation de la détection et
classification de défauts***

III.1. Introduction

La simulation joue un rôle de plus en plus crucial dans la détection et la classification de défauts, offrant des avantages significatifs par rapport aux méthodes traditionnelles basées sur l'expérimentation physique. Les simulations permettent de modéliser et de reproduire virtuellement les conditions réelles, offrant ainsi une compréhension approfondie des mécanismes sous-jacents aux défauts et permettant de tester différentes stratégies de détection et de classification.

Ce chapitre se concentre sur l'utilisation de la simulation pour la détection et la classification de défauts. Nous explorerons les principes fondamentaux de la simulation, les techniques et les modèles utilisés dans ce contexte, ainsi que les avantages et les défis associés à cette approche. Nous présenterons également des études de cas illustrant l'application de la simulation de la détection de trois défauts (résistance en série, nombre des cellules et l'ombrage). Le logiciel utilisé est MATLAB, il permet la représentation facile, par des blocs accomplissant chacun une fonction prédéterminée les systèmes dynamiques.

III.2. Simulation du générateur photovoltaïque en fonctionnement sans défaut

Pour faire la simulation, et ensuite le diagnostic de certains défauts considérés comme fréquents et importants à détecter et à classifier, nous choisissons le module photovoltaïque **CONDOR CEM310M72**, les caractéristiques de ce module sont détaillées dans le Tableau III.1. Les figures III.1 et III.2 représentent les courbes des caractéristiques ($I-V$ et $P-V$) dans les conditions standards avec un éclairement $E = 1000W/m^2$, et une température de $T = 25\text{ °C}$ [1].

Tableau III.1. Caractéristiques d'un panneau condor CEM310M72

<i>Caractéristiques</i>	<i>Specification</i>
<i>Nombre de cellules, N_s</i>	72
<i>Puissance maximale, P_{max}</i>	310 W
<i>Tension à P_{max}, V_{mpp}</i>	36.2 V
<i>Courant à P_{max}, I_{mpp}</i>	8.56 A
<i>Courant de court-circuit, I_{cc}</i>	9.8 A
<i>Tension de circuit ouvert, V_{co}</i>	45.6 V
<i>Taille de cellule</i>	165X165 mm

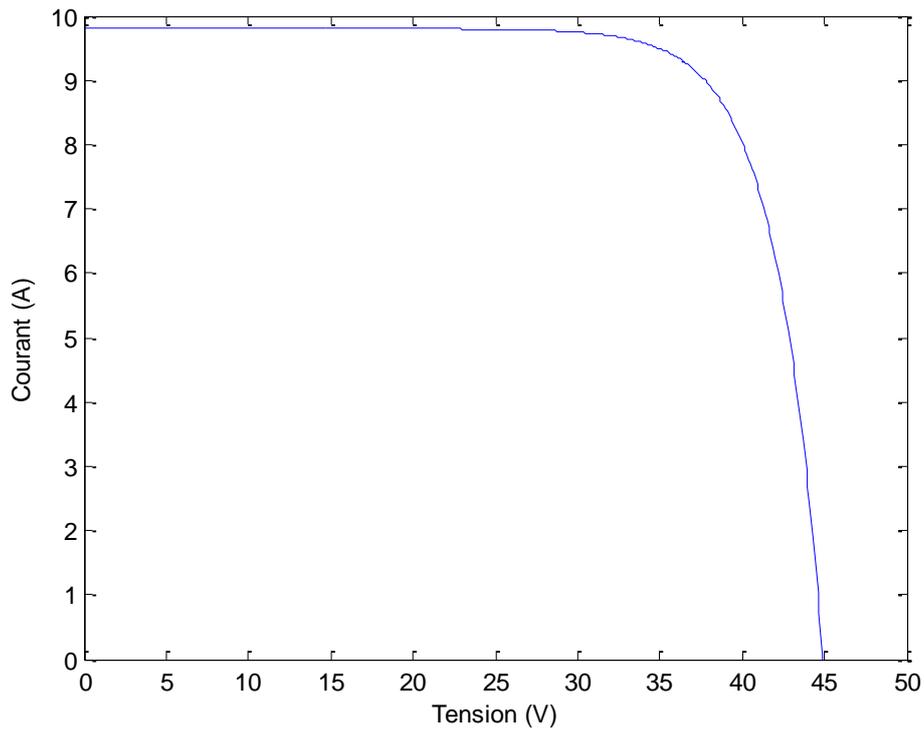


Figure.III.1. Caractéristique (I-V) du module (CONDOR CEM310M72) sans défaut.

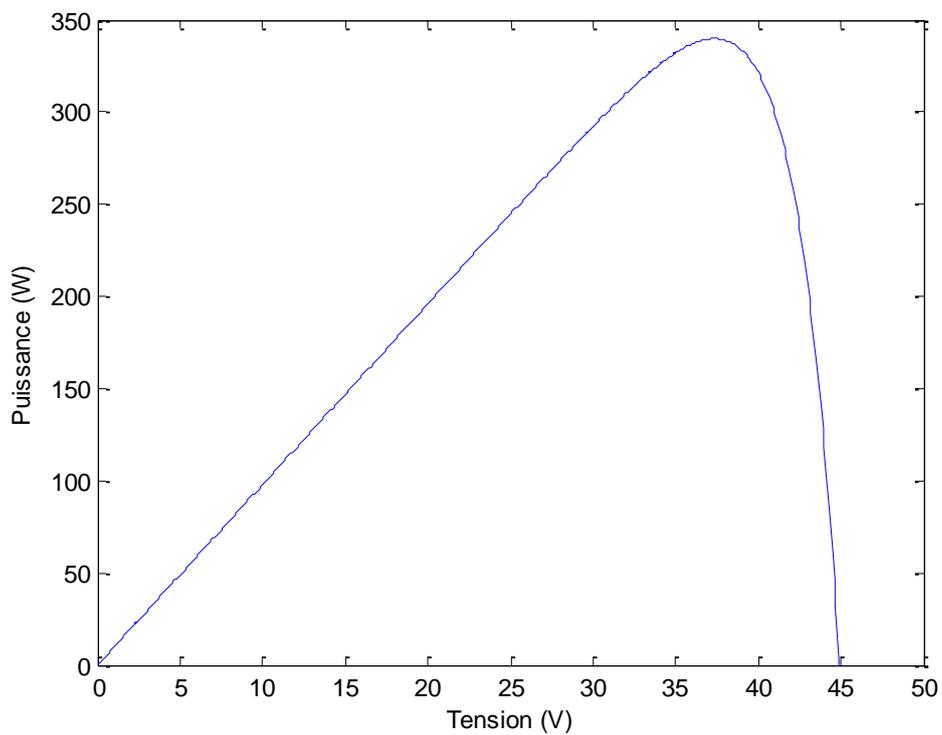


Figure.III.2. Caractéristique (P-V) du module (CONDOR CEM310M72) sans défaut.

III.3.Simulation du module PV en fonctionnement défaillant

III.3.1. Défauts dans un module PV

Le terme défaut désigne une modification physique d'une partie du système ou du système complet. Il implique par conséquent une déviation importante par rapport au comportement normal pour être acceptable. Nous effectuons une simulation de quelques défauts sur ce système [2]:

III.3.1.1. Défaut d'ombrage

Le défaut d'ombrage dans les modules solaires photovoltaïques se produisent lorsque des ombres partielles affectent la production d'électricité, entraînant une réduction de la puissance générée et des risques potentiels de dommages. La détection précoce et la gestion efficace de ces défauts sont essentielles pour optimiser les performances et la durabilité des systèmes solaires [3]. Le défaut d'ombrage peut être simulé par la variation des différents paramètres de la cellule mais nous choisissons de générer ce défaut par la variation du photo courant I_{ph} .

III.3.1.2. Défaut sur la résistance série

Une résistance série peut se référer à la résistance interne d'un module PV ou d'un ensemble de modules connectés en série. Cette résistance série représente la résistance au flux du courant électrique à l'intérieur du module PV ou du circuit. Un défaut sur la résistance série d'un système PV peut avoir différentes causes et conséquences [4,5]:

- ✓ Au fil du temps, les modules PV peuvent subir une dégradation de leurs performances, y compris une augmentation de la résistance série. Cela peut être dû à l'usure, aux conditions environnementales défavorables, à la corrosion des connexions ou à d'autres facteurs. Une résistance série plus élevée entraîne une perte de tension dans le circuit et une diminution de la production d'énergie.
- ✓ Une mauvaise connexion entre les modules PV connectés en série peut entraîner une augmentation de la résistance série. Cela peut se produire si les câbles solaires sont mal sertis, si les bornes de raccordement sont endommagées ou si les connecteurs sont mal fixés. Une connexion défectueuse peut augmenter la résistance et causer une perte de puissance.
- ✓ Un module PV individuel défectueux dans un ensemble connecté en série peut entraîner une augmentation de la résistance série. Cela peut se produire si le module est endommagé, s'il présente des points chauds ou s'il a des problèmes internes.

Il est important de diagnostiquer et de corriger les défauts sur la résistance série d'un système PV pour assurer un fonctionnement optimal. Cela peut nécessiter des inspections visuelles, des mesures de résistance, des tests de continuité et d'autres techniques de dépannage. L'assistance d'un professionnel qualifié en énergie solaire est souvent recommandée pour résoudre les problèmes de résistance série dans les systèmes PV. Le défaut de R_S qu'on peut le simuler à travers le changement de la valeur de la résistance série R_s de la cellule PV en augmentant sa valeur [6].

III.3.1.3. Défaut sur le nombre de cellules

Un défaut sur le nombre de cellules dans un système photovoltaïque (PV) peut avoir des conséquences importantes sur le fonctionnement et les performances du système. Le nombre de cellules dans un module PV est généralement spécifié par le fabricant et détermine la tension nominale du module. Voici quelques scénarios de défauts possibles liés au nombre de cellules [3]:

- ✓ Trop peu de cellules : Si un module PV est fabriqué ou assemblé avec moins de cellules que prévu, cela peut entraîner une tension de sortie inférieure à la normale. Cela peut se traduire par une réduction de la puissance de sortie du module et, par conséquent, du système PV dans son ensemble. Les modules avec un nombre insuffisant de cellules peuvent également présenter des incompatibilités avec les autres modules du système et créer des déséquilibres de puissance.
- ✓ Trop de cellules : Dans des cas plus rares, il est possible qu'un module PV soit assemblé avec un nombre excessif de cellules. Cela peut se produire en raison d'une erreur de fabrication ou d'assemblage. Un excès de cellules peut provoquer des problèmes de surtension dans le module et augmenter le risque de défaillance des composants électroniques. Cela peut également entraîner des incompatibilités avec les autres modules connectés dans le système PV.
- ✓ Cellules défectueuses : Même si le nombre de cellules est correct, il peut y avoir des cellules individuelles défectueuses dans un module PV. Cela peut se produire en raison de défauts de fabrication, de dommages mécaniques ou d'autres problèmes. Une cellule défectueuse peut entraîner une diminution de la puissance de sortie du module et, si elle est connectée en série avec d'autres cellules, réduire la performance globale du module et du système.

Nous allons effectuer ce défaut en changeant le nombre de cellules N_s .

III.3.2. Détection et classification des différents défauts

Après avoir identifié quelques défauts, on a relevé les erreurs entre les signaux de sortie : le courant, la tension et la puissance du système sain et celle du système avec défaut pour les utiliser dans la classification de ces défauts par la méthode des réseaux de neurones.

III.3.2.1. Détection et classification du défaut de la résistance série

Le défaut R_s est réellement causé par les males connexions et les fissures au niveau des cellules photovoltaïques, pour cela on va changer la valeur de la résistance série de la cellule PV comme exemple on prend $R_s = 0.001$. Les caractéristiques ($I-V$) et ($P-V$) du système en fonctionnement normal et celle en défaut sont représentées respectivement dans les figures III.3 et III.4.

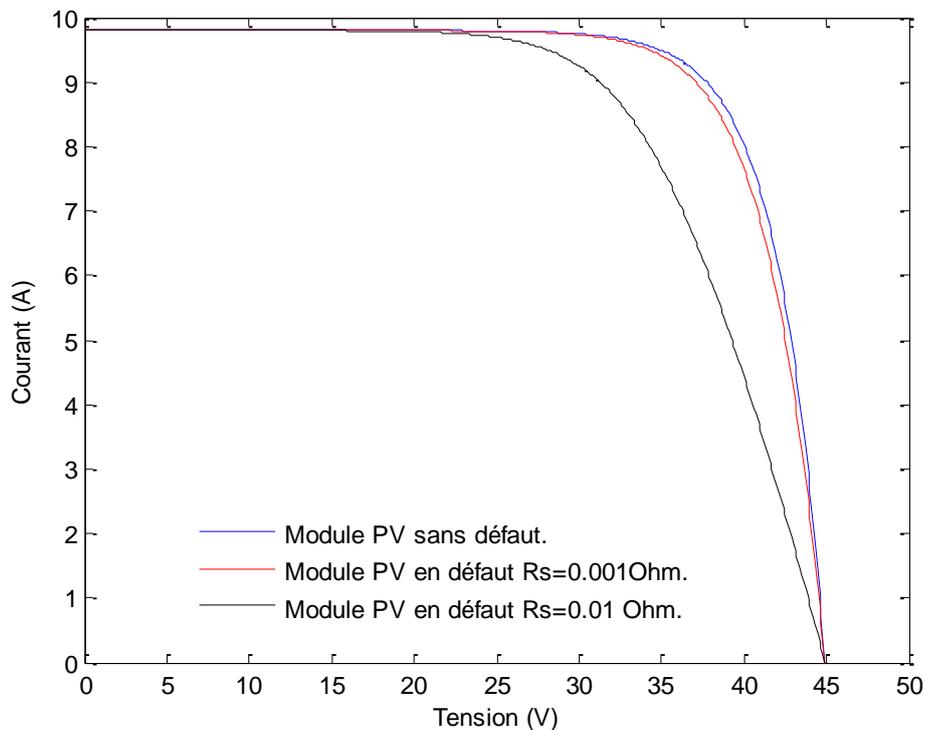


Figure.III.3. Caractéristique ($I-V$) du module PV (Condor CEM310M-72) sain et avec défaut.

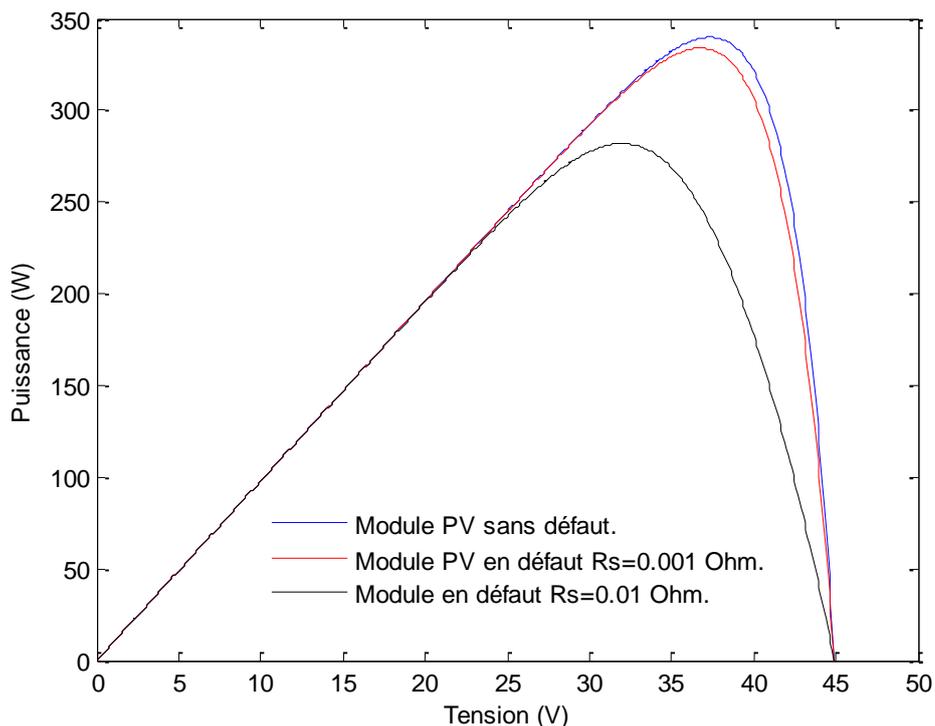


Figure.III.4. Caractéristique (P-V) du module PV (Condor CEM310M-72) sain et avec défaut.

En analysant les courbes ($I-V$) et ($P-V$), nous observons que lorsque nous modifions la valeur de la résistance série R_s de 0,001 Ohm (qui est utilisée dans un système normal) à 0.01 Ohm dans un système présentant un défaut, nous constatons une diminution de I_{mpp} , V_{mpp} et P_{mpp} par rapport au système normal. Seuls I_{cc} et V_{co} demeurent inchangés, ce qui confirme le défaut de la résistance R_s .

III.3.2.2. Détection et classification d'un défaut N_s

Afin de simuler ce défaut, nous réduisons le nombre de cellules dans le module PV en prenant comme exemples $N_s = 54$ et 36. Les caractéristiques ($I-V$) et ($P-V$) du système en bon état de fonctionnement ainsi que celles en présence du défaut sont illustrées respectivement dans les figures III.5 et III.6.

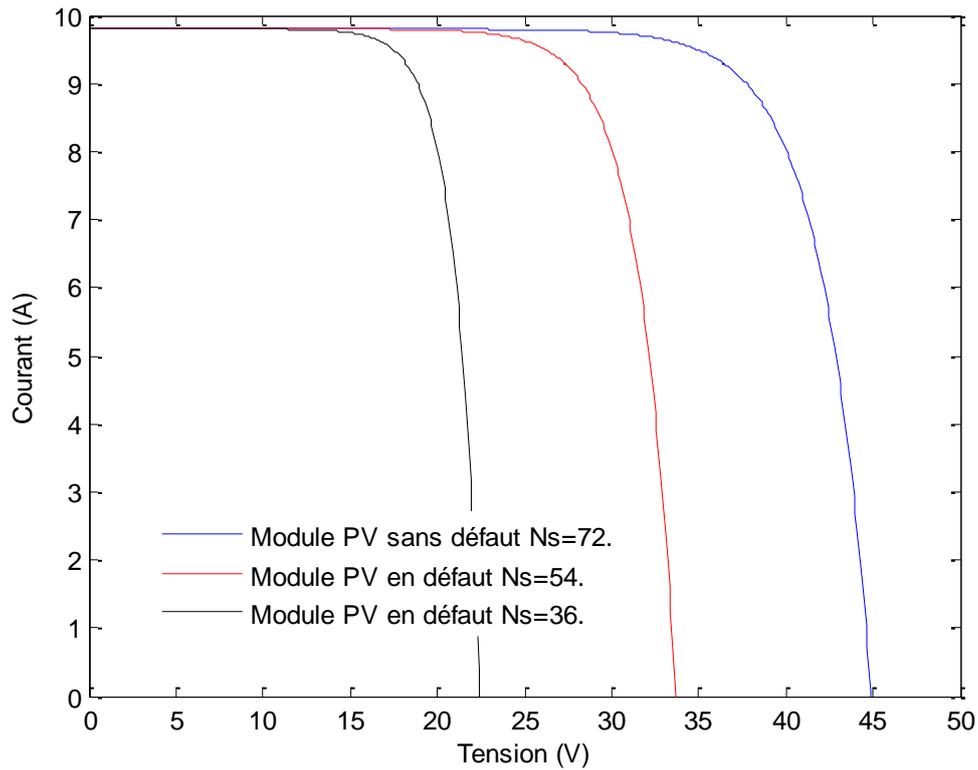


Figure.III.5. Caractéristique (I-V) du module PV (Condor CEM310M-72) sain et avec défaut Ns.

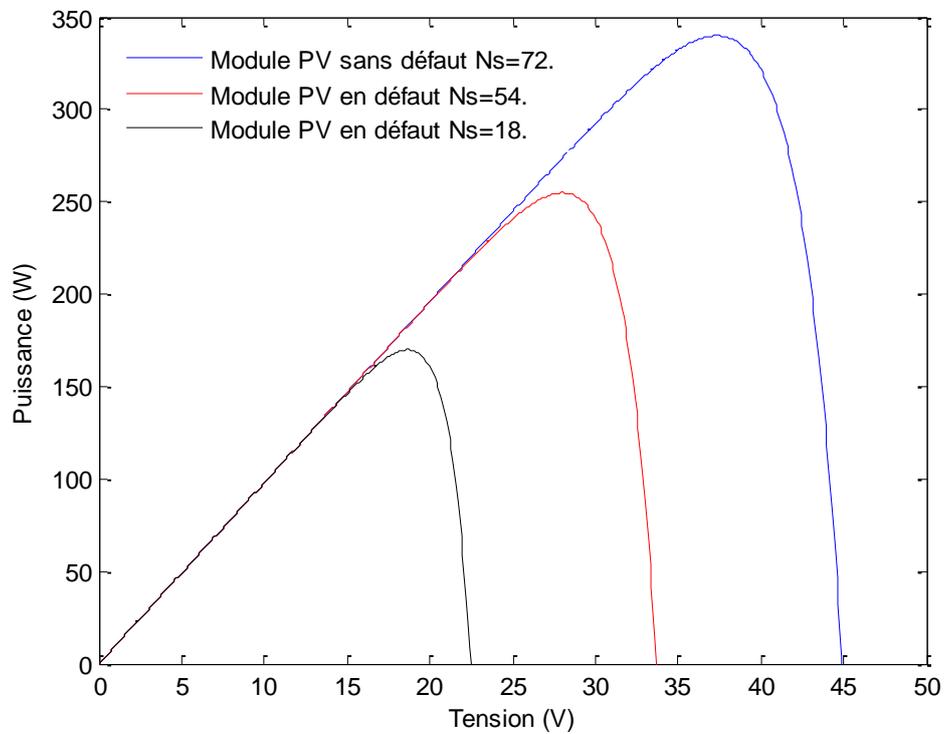


Figure .III.6. Caractéristique (P-V) du module PV (Condor CEM310M-72) sain et avec défaut Ns.

En réduisant le nombre de cellules de 72 à 36 dans le panneau solaire, nous avons observé, à partir de la figure III.5 et la figure III.6, que I_{cc} reste constant tandis que V_{co} , V_{mpp} et I_{mpp} changent. Selon les courbes, la tension V et la puissance P diminuent également. Ainsi, la diminution du nombre de cellules affecte ces paramètres du panneau solaire, c'est l'impact principal de cette modification.

III.3.2.3. Détection et classification d'un défaut d'ombrage

Le défaut d'ombrage est considéré comme un cas spécifique de défaut de déséquilibre. Pour simuler ce défaut, il est nécessaire de modifier la valeur du courant photovoltaïque (I_{ph}) à une valeur spécifique, par exemple $I_{ph} = 2,85A$. Les caractéristiques ($I-V$) et ($P-V$) du système en bon état de fonctionnement ainsi que celles en présence du défaut sont illustrées respectivement dans la figure III.7 et la figure III.8.

Lors de cette étape, nous réduisons la valeur du courant photovoltaïque I_{ph} de 9,8 A à 4,9 A en raison du défaut d'ombrage. En examinant la figure III.7, nous avons observé que les valeurs de I_{cc} , I_{mpp} et V_{mpp} diminuent, ainsi que V_{co} , bien que légèrement par rapport à la courbe normale. La figure III.8, qui représente la courbe ($P-V$), confirme que la valeur de P_{mpp} diminue par rapport à la valeur normale, de même que la tension V , bien que légèrement.

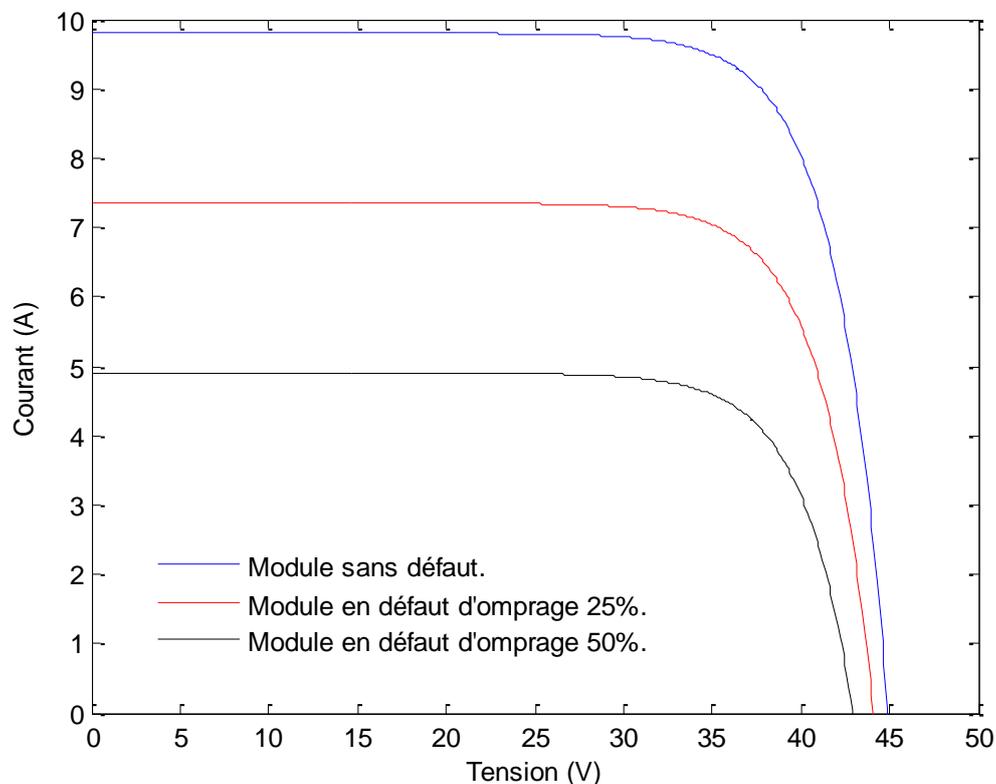


Figure.III.7. Caractéristique ($I-V$) du module PV (Condor CEM310M-72) sain et avec défaut d'ombrage.

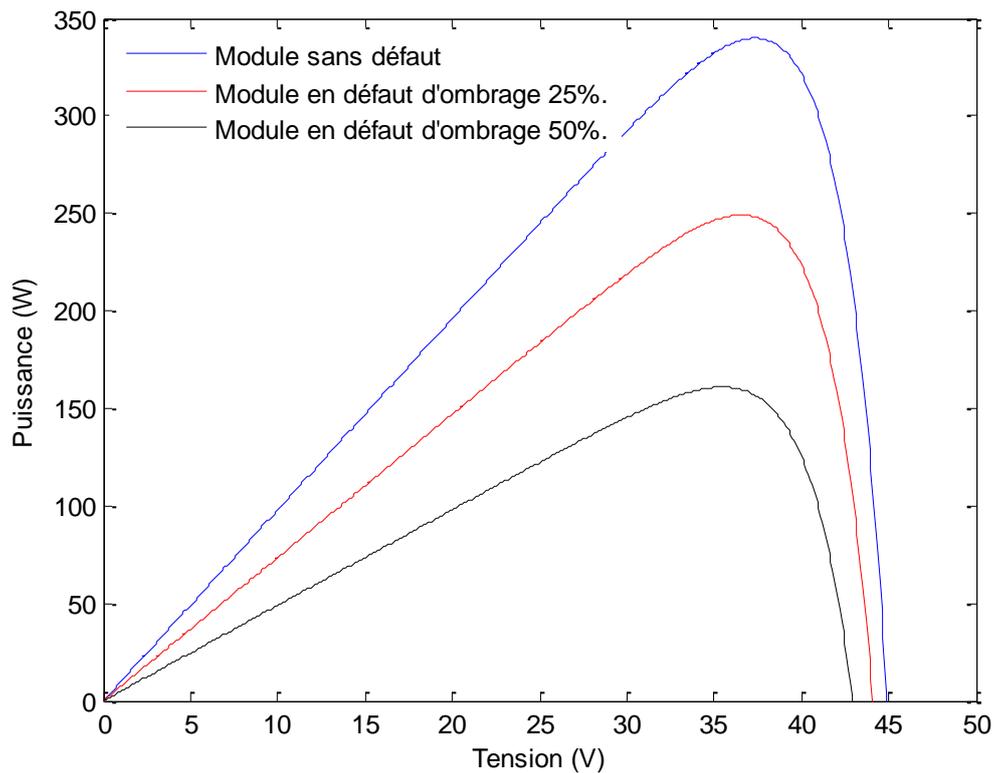


Figure III.8. Caractéristique (P-V) du module PV (Condor CEM310M-72) sain et avec défaut d'ombrage.

III.4. Application de la méthode des réseaux de neurones (ANN)

Le processus de mise au point du réseau comprend quatre étapes:

La première étape consiste à générer les résidus en calculant les valeurs maximales et moyennes des erreurs de courant, de tension et de puissance. Pour cela, nous avons pris en compte cent vingt (120) échantillons, avec trente (30) mesures pour chaque type de défaut.

La deuxième étape consiste à collecter les mesures précédentes à partir d'un fichier afin de créer une base de données contenant les informations nécessaires pour chaque défaut. Cette base de données permettra de classifier ces défauts selon les tableaux III.2, III.3 et III.4.

Tableau III.2. Base des données du défauts de résistance série.

$R_s(\text{Ohm})$	$I_{cc}(\text{A})$	$V_{oc}(\text{V})$	$V_{MPP}(\text{V})$	$P_{MPP}(\text{W})$
0.005	9.8	45.6	36.2	310
0.006	9.8	45.6	34	304.6
0.007	9.8	45.6	33	298.5
0.008	9.8	45.6	33	293.2
0.009	9.8	45.6	32	287.2
0.01	9.8	45.6	32	281.9
0.012	9.8	45.6	31	270.8
0.014	9.8	45.6	30	259.9
0.016	9.8	45.6	29	249.3
0.018	9.8	45.6	28	238.8
0.02	9.8	45.6	28	228.8
0.022	9.8	45.6	27	219.2
0.024	9.8	45.6	26	209.8
0.026	9.8	45.6	26	200.9
0.028	9.8	45.6	25	192.3
0.03	9.8	45.6	25	184.2
0.032	9.8	45.6	25	176.5
0.034	9.8	45.6	24	169.3
0.036	9.8	45.6	24	162.5
0.038	9.8	45.6	24	156.1
0.04	9.8	45.6	23	150
0.05	9.8	45.6	23	125.2
0.06	9.8	45.6	23	106.9
0.07	9.8	45.6	23	93.06
0.08	9.8	45.6	23	82.33
0.09	9.8	45.6	23	73.76
0.1	9.8	45.6	23	66.8
0.2	9.8	45.6	23	34.26
0.3	9.8	45.6	23	23.01
0.4	9.8	45.6	23	17.32

Tableau III.3. Base des données du défauts N_s .

N_s	$I_{cc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$V_{MPP}(V)$	$P_{MPP}(W)$
72	9.8	45.6	36.2	310
70	9.8	43	34	301.5
68	9.8	42	33	293
66	9.8	41	32	284.4
64	9.8	39	31	275.8
62	9.8	38	30	267.2
60	9.8	37	29	258.6
58	9.8	36	28	250
56	9.8	34	27	241.4
54	9.8	33	26	232.8
52	9.8	32	25	224.2
50	9.8	31	24	215.6
48	9.8	29	23	206.9
46	9.8	28	22	198.3
44	9.8	27	21	189.7
42	9.8	26	20	181
40	9.8	24	19	172.3
38	9.8	23	18	163.7
36	9.8	22	17	155
34	9.8	21	16	146.3
32	9.8	19	15	137.5
30	9.8	18	14	128.8
28	9.8	17	13	120
26	9.8	16	12	111.2
24	9.8	14	11	102.4
22	9.8	13	11	93.76
20	9.8	12	10	85.24
18	9.8	11	9	76.71
16	9.8	9	8	68.19
14	9.8	8	7	59.67

Tableau III.4. Base des données du défauts d'ombrage.

<i>I_{ph}</i>	<i>I_{cc}</i>	<i>V_{oc}</i>	<i>V_{MPP}</i>	<i>P_{MPP}</i>
9.8	9.8	44	35	310.1
9.48	9,48	44	35	300.1
9.16	9,16	44	35	290
8.84	8,84	44	35	279.9
8.52	8,52	44	35	269.7
8.2	8,2	44	35	256.6
7.88	7,88	44	35	249.3
7.56	7,56	44	35	239.1
7.24	7,24	44	35	235.3
6.92	6,92	43	34	218.7
6.6	6,6	43	34	208.4
6.28	6,28	43	34	198.1
5.96	5,96	43	34	187.8
5.64	5,64	43	34	177.5
5.32	5,32	43	34	167.1
5	5	42	34	156.8
4.68	4,68	42	34	146.4
4.36	4,36	42	34	136
4.04	4,04	42	34	125.6
3.72	3,72	42	34	115.1
3.4	3,4	41	34	104.7
3.08	3,08	41	33	94.36
2.76	2,76	41	33	84.08
2.44	2,44	40	33	73.79
2.12	2,12	40	33	63.49
1.8	1,8	40	32	53.31
1.48	1,48	39	32	43.24
1.16	1,16	38	31	33.24
0.84	0,84	37	31	23.42
0.52	0,52	35	29	13.9

La troisième étape consiste à construire un réseau de neurones multicouche (6-20-4) comprenant six (06) entrées dans la couche d'entrée, vingt (20) neurones dans la couche cachée et quatre (04) neurones dans la couche de sortie.

La dernière étape consiste à entraîner le réseau de neurones en utilisant la base de données composée de 120 échantillons.

III.5. Formation du réseau

Il existe un outil dans MATLAB appelé *nftool*. Il s'active en tapant *nftool* dans la ligne de commande. Des données d'entrée, cible souhaitée données (identiques aux données d'entrée), et le réseau créé avec la fonction doit être importée dans le *nftool* [7].

Lorsque cela est fait, ouvrir le réseau importé à l'intérieur *nftool*, et réinitialiser les poids. Cela donne à chacun poids synaptique une valeur de départ aléatoire avant l'entraînement, ce qui permet d'éviter que la formation ne reste bloquée dans un minimum local [7]. Définir le nombre maximum d'itérations souhaitées, et le nombre d'erreurs de validation croisée autorisé. Dans la figure III.9, on peut observer le bloc d'apprentissage du réseau réalisé.

Pendant la formation d'un réseau, MATLAB génère automatiquement une courbe de performance, courbe de régression, courbe de gradient, et une erreur de validation croisée diagramme. Ceux-ci peuvent être utiles à examiner afin de déterminer si le réseau a été correctement formé.

Si ces parcelles sont acceptables, le réseau peut être exporté vers le répertoire de travail dans MATLAB pour simulation. Nouvellement le réseau formé sera exposé à de nouvelles données, et les extrants produits sont les données simulées.

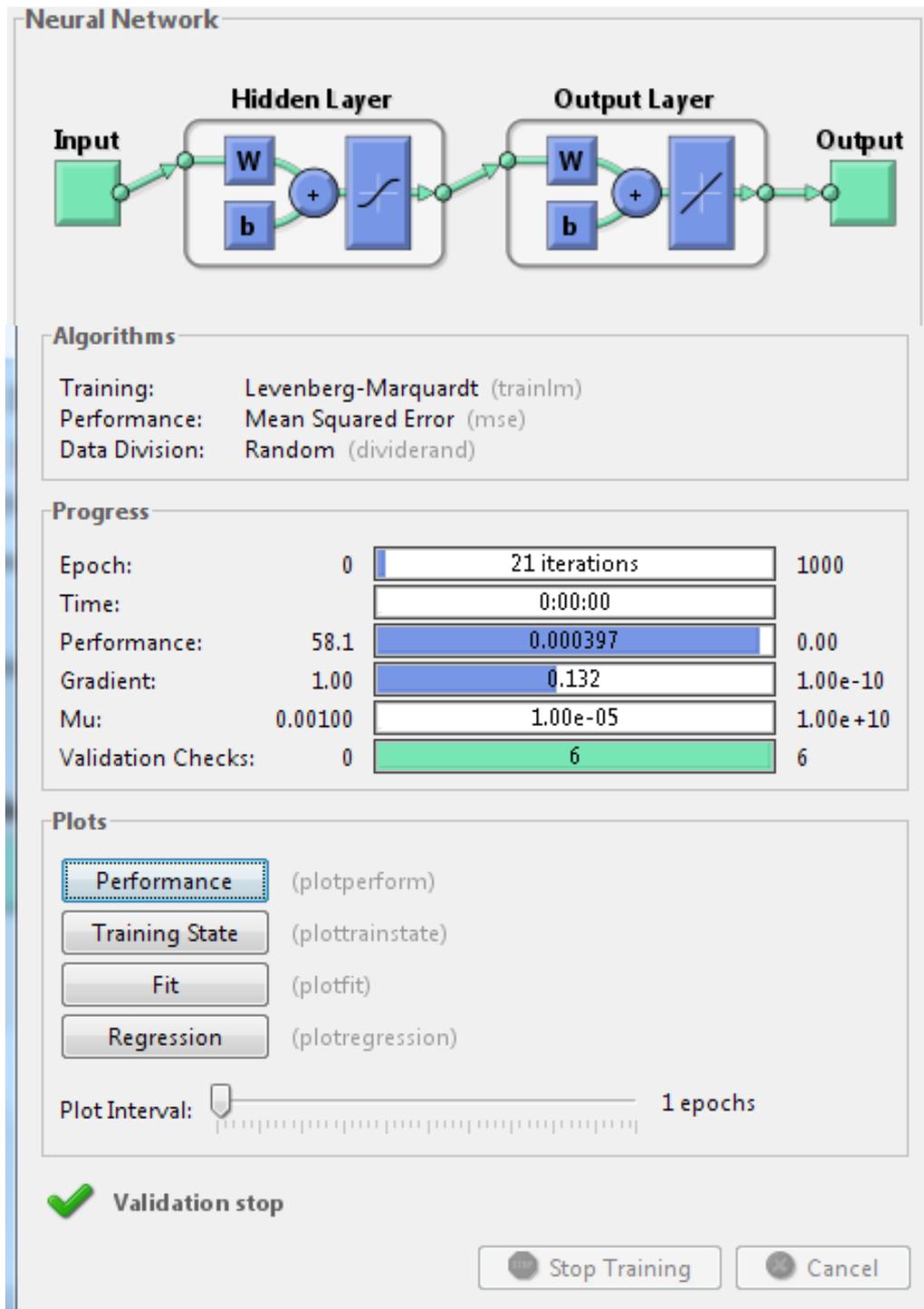


Figure III.9. Le bloc d'apprentissage de l'algorithme.

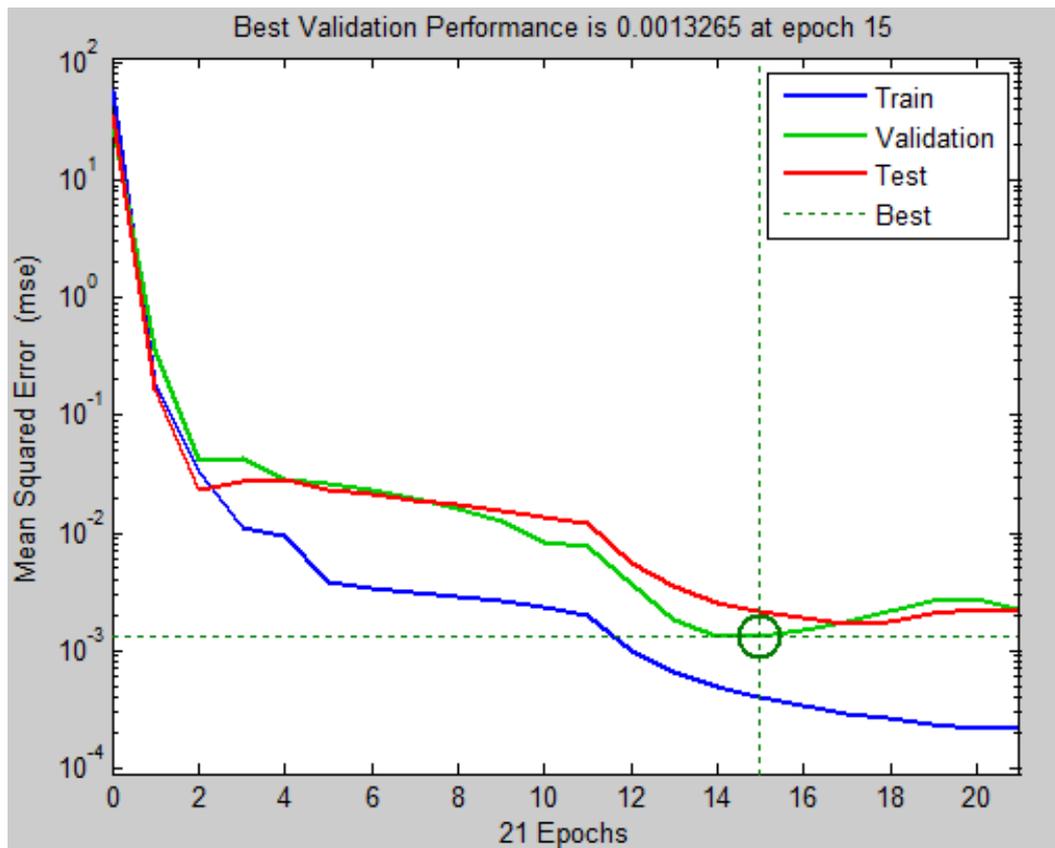


Figure III.10. Courbe de performance produite lors de l'entraînement du réseau.

Les graphiques de régression de la figure III.10 et III.11. Il semble également bien dans une certaine mesure. Les trois ensembles tombent presque complètement parallèle à la cible, mais la validation croisée et les ensembles de tests semblent avoir des données quelque peu groupées au lieu de l'étaler uniformément [7].

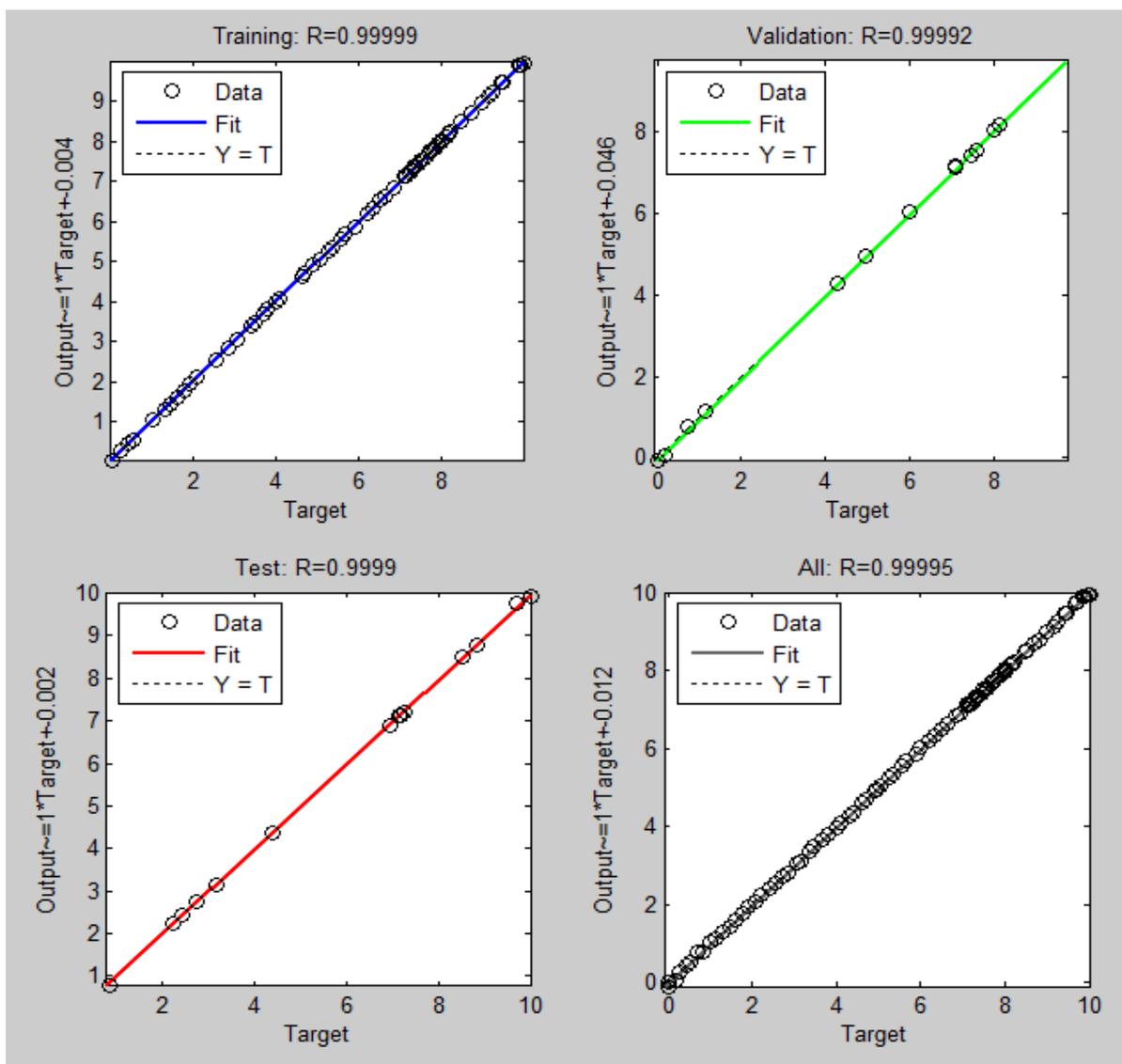


Figure III.11. Diagramme de régression produit lors de l'apprentissage du réseau.

III.6. Conclusion

A partir des résultats de simulation obtenus, il peut être conclu que les défauts dans les systèmes PV peuvent être clairement identifiés par un développement approprié du modèle de détection des défauts. Une collecte de données appropriée est nécessaire pour détecter les défauts avec précision.

Le système de détection de défaut développé ci-dessus peut être mis en œuvre en ligne, en développant d'abord le modèle de détection des défauts en collectant des données pour différentes valeurs, puis connectez le système PV au système d'acquisition de données (DAQ).

Le DAQ récupère les données du système PV et les transmet au modèle de détection de défaut. Ainsi, la puissance de sortie du système PV est surveillée en permanence et détecte le type de défaut, si seulement plus de données collectées pour former le modèle de détection des défauts, elle sera une détection des défauts plus précise.

III.7. Références bibliographiques

- [1] <http://www.condor.dz>
- [2] F. Barruel, N. Chantreuil and A. Labrunie, « Procédé de diagnostic de la défaillance d'un générateur photovoltaïque », France Patent FR2944647, (2010).
- [3] K.-H. Chao, S.-H. Ho and M.-H. Wang , « Modeling and fault diagnosis of a photovoltaic system », *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 97-105, (2008).
- [4] A. DJALAB, « Diagnosis of faults in a renewable energy system based on artificial intelligence techniques: Application on a photovoltaic system », Thèse de doctorat, Ziane Achour University of Djelfa, (2020).
- [5] L. Bun, « Détection et localisation de défauts pour un système PV », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, (2011).
- [6] D. Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez, "Photovoltaic module diagnostics by series resistance monitoring and temperature and rated power estimation " in *Industrial Electronics, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Orlando, FL 2008*, pp. 2195 – 2199, ,(2008).
- [7] M. Hassan Alia, A. Rabhi, A. El hajjaji and Giuseppe M. Tina, « Time Fault Detection in Photovoltaic Systems », 8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-16, 11-13 September 2016, Turin, ITALY. *Energy Procedia* 111 (2017).

CONCLUSION

Cette étude se concentre principalement sur le diagnostic des défauts dans les systèmes photovoltaïques. L'objectif est de développer un algorithme basé sur les réseaux de neurones qui permettra de détecter et d'analyser l'ensemble des défauts présents dans le système.

Pour parvenir au diagnostic dans le cadre photovoltaïque, une impérative étude recherché sur les différentes approches théorique de diagnostic a été abouti.

La toute première étape consiste à établir une base de compétence sur le comportement défaillant d'un système photovoltaïque. Le modèle a deux diodes a été choisi pour le reste de notre étude sur l'utilisation de la simulation MATLAB .

En assimilant des valeurs bonne et stable d'un modèle photovoltaïque en fonctionnement sain et celle en fonctionnement défaillant pour les divers défauts considérés, trois indication été retenus tout le long de cette étude : la diminution du courant de court-circuit ,la diminution de la tension de circuit ouvert et la diminution de la puissance maximale.

Plusieurs différents incertitudes ont été causé par chaque indication afin de contourner chaque problème non repérable nous avons consacré un point.

Pour un diagnostic de défaut dans le système photovoltaïque ont a classifié grâce à un technique de l'intelligence artificiel est entamé la méthode basée sur les réseaux de neurone.

Dans l'ensemble de cette étude la méthode de réseau de neurone a été appliqué dans le cas de trois défaut. Cette méthode nous a également permis déterminer les défauts en temps réel. Egalement le réseaux de neurone artificiel exige une grande base de données pour estimer les paramètres de sortie avec une excellente précision

Enfin le diagnostic est fait en admettent le technique de l'intelligence artificiel pour mieux reconnaitre les défauts.

تشخيص الأعطال في النظام الكهروضوئي باستخدام الذكاء الاصطناعي

ملخص:

تلعب اليوم الطاقات المتجددة دورًا أساسيًا في جميع الأنشطة البشرية. تتعرض أنظمة هذه الطاقة للتدهور أثناء حدوث أعطال وفشل في تركيباتها. من الضروري تطوير نظام تشخيص يهدف في المقام الأول إلى مزامنة المؤشرات لاكتشاف الأعطال والحفاظ على إنتاجية ممتازة للطاقة في نظام الطاقة الكهروضوئية.

هدف هذا العمل هو تشخيص الأعطال في نظام الطاقة الكهروضوئية باستخدام تقنية الذكاء الاصطناعي. تتضمن هذه الدراسة تطوير خوارزمية مستندة إلى طريقة الشبكات العصبية الاصطناعية لاكتشاف الأعطال في نظام الطاقة الشمسية.

الكلمات المفتاحية: النظام الشمسي الكهروضوئي، الذكاء الاصطناعي، العيوب، التشخيص، الشبكات العصبية.

Diagnosis of faults in a photovoltaic system using artificial intelligence

Abstract:

Renewable energies play a crucial role in all human activities today. The systems of this energy are exposed to deterioration during malfunctions and failures in their installations. It is necessary to develop a diagnostic system whose main objective is to align indicators in order to detect faults and preserve excellent energy production in the photovoltaic system.

The objective of this work is to diagnose faults in the photovoltaic system using artificial intelligence techniques. This study involves the development of an algorithm based on artificial neural network methodology to detect faults in the photovoltaic system.

Keywords: *Photovoltaic system, artificial intelligence, fault, diagnostic, neural networks.*

Les énergies renouvelables jouent un rôle essentiel dans toutes les activités humaines d'aujourd'hui. Les systèmes de cette énergie sont exposés à des détériorations pendant dysfonctionnements et des défaillances dans leurs installations. Il est nécessaire de développer un système de diagnostic dont l'objectif principal est d'aligner les indicateurs afin de détecter les défauts et de préserver une excellente production d'énergie dans le système photovoltaïque.

Ce travail a pour objectif de diagnostiquer les défauts dans le système photovoltaïque en utilisant la technique de l'intelligence artificielle. Cette étude comprend le développement d'un algorithme fondé sur la méthode des réseaux de neurones artificiels afin de détecter les défauts dans le système photovoltaïque.

***Mots clés :** système photovoltaïque, intelligence artificielle, défaut, diagnostic, réseaux de neurones.*