

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département de **Electrotechnique**

N° :2021/2022

## **MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE: Scienceset Technologies**

**FILIERE: Electromécanique**

**SPECIALITE: Electromécanique**

### **Thème**

**Diagnostic des défauts d'un système Photovoltaïque**

**Présenté Par : Oussama BOUNEFOR**

**Encadré Par : Dr M. HADEF**

**Soufian BOUKENDIR**

**Date de soutenance : 12/7/2022**

#### **Jury de Soutenance**

**Président : M. BOUKHENEFF**

**Grade MCB**

**UnivMSB jijel**

**Encadreur : M. HADEF**

**Grade MCA**

**Univ MSB jijel**

**Examineur 1 : N. HACIB**

**Grade MCB**

**Univ MSB jijel**

**Promotion :2021 /2022**

# Remerciements

Avant tous, nous remercions **ALLAH** tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage, la patience pour accomplir ce travail

Nous remercions notre encadreur **DR Mounir HADEF** pour son aide, son encouragement et sa patience

Nous tenons à remercier sincèrement les membres du jury qui nous font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Nos vifs remerciements vont également aux enseignants et au personnel du département d'électrotechnique.

# Table des matières

I. Introduction générale .....	1
CHAPITRE I. Généralité sur les systèmes photovoltaïques	
I- Introduction : .....	3
I.1 Histoire du photovoltaïque : .....	3
I.2 Energie solaire photovoltaïque : .....	4
I.3 Spectre du rayonnement : .....	4
I.4 Effet photovoltaïque : .....	5
I.5 Différents types de cellules photovoltaïques : .....	7
a- cellules au silicium monocristallin : .....	7
b- cellules au silicium polycristallin : .....	8
c- cellules amorphes : .....	9
d- cellules multi-jonctions : .....	9
e- cellules organiques : .....	9
f- cellules HIT : .....	10
I.6 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque : .....	10
I.7 Module photovoltaïque : .....	12
I.8 Association des modules : .....	13
a- Association série : .....	13
b- Association parallèle : .....	13
I.9 String PV : .....	14
I.10 Champ PV : .....	14
I.11 Système de protection : .....	15
I.12 Conclusion : .....	16
CHAPITRE II. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque	
II. Introduction : .....	17
II.1 Système Photovoltaïque : .....	17
II.1.1 Modèle simplifié : .....	17
II.1.2 Modèle à une diode : .....	18
II.2 Convertisseur DC/DC : .....	21
II.3 Principe de fonctionnement d'un convertisseur Boost : .....	22
II.4 Commandes de poursuite du point de puissance maximale MPPT : .....	24
II.4.1 Principe de la commande MPPT : .....	25
II.4.2 Méthodes de recherche des points du maximum de puissance (MPPT) : .....	27
II.5 Simulation du Système PV : .....	31
II.5.1 Caractéristiques d'un générateur PV : .....	33

II.5.2	Effet de l'éclairement sur les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ : .....	34
II.5.3	Effet de la température sur les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ : .....	35
II.5.4	Performance du système PV avec un profil variable d'ensoleillement et de température : .....	36
II.6	Conclusion : .....	39
CHAPITRE III. Simulation des défauts des systèmes photovoltaïques		
III.	Introduction : .....	40
III.1	Simulation des différents défauts d'un système PV : .....	40
III.1.1	Défaut d'ombrage : .....	42
III.1.2	Défauts de diode by-pass : .....	45
III.1.3	Défaut de dégradation : .....	51
III.1.4	Courbes de différents types de défauts d'un système PV : .....	53
III.1.5	Performances du système PV lors des défauts de court-circuit et circuit ouvert sous un profil variable d'ensoleillement et de température : .....	54
III.2	Conclusion : .....	57
CHAPITRE IV. Diagnostic des défauts d'un système PV par les réseaux de neurones		
IV.	Introduction : .....	58
IV.1	Diagnostic : .....	58
IV.1.1	Etapas de diagnostic : .....	58
IV.1.2	Méthodes de diagnostic : .....	59
IV.2	Méthodes de diagnostic des défauts d'un système PV : .....	60
IV.2.1	Méthodes d'intelligence artificielle : .....	60
IV.2.2	Réseau de neurones : .....	61
IV.2.3	Les différents modèles de réseaux de neurones : .....	64
IV.2.4	Fonction d'activation : .....	65
IV.2.5	L'apprentissage : .....	67
IV.3	Diagnostic des défauts du système PV .....	68
IV.3.1	Représentation du réseau de neurones avec trois entrées et une sortie : .....	68
IV.3.2	Représentation du réseau de neurones avec trois entrées et quatre sorties : .....	72
IV.4	Conclusion : .....	77
	Conclusion générale .....	78

## Liste des figures :

### Chapitre 1 :

<b>Figure I.1</b> : Rayonnement solaire dans le monde en KWh/m <sup>2</sup>	4
<b>Figure I.2</b> : Spectre solaire hors atmosphère	5
<b>Figure I.3</b> : Schéma de l'effet photovoltaïque	6
<b>Figure I.4</b> : Structure en bande d'un semi-conducteur en génération-recombinaison et le dopage du silicium	7
<b>Figure I.5</b> : Cellule au Silicium monocristallin	8
<b>Figure I.6</b> : Cellule au Silicium polycristallin	8
<b>Figure I.7</b> : Cellule au Silicium amorphe	9
<b>Figure I.8</b> : Caractéristique électrique d'une cellule PV	11
<b>Figure I.9</b> : Module PV	12
<b>Figure I.10</b> : Association des cellules dans un module PV	12
<b>Figure I.11</b> : Caractéristique I-V de l'association série des cellules	13
<b>Figure I.12</b> : Caractéristique de l'association parallèle des cellules	14
<b>Figure I.13</b> : string PV	14
<b>Figure I.14</b> : Champ PV	15
<b>Figure I.15</b> : Système de protection d'un système PV	15

### Chapitre 2 :

<b>Figure II.1</b> : Système photovoltaïque	17
<b>Figure II.2</b> : Modèle simplifié d'une cellule PV	18
<b>Figure II.3</b> : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	19
<b>Figure II.4</b> : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge	21
<b>Figure II.5</b> : Schéma d'un Boost	22
<b>Figure II.6</b> : Boost avec interrupteur fermé et diode ouverte	23
<b>Figure II.7</b> : Boost avec diode passante et interrupteur ouvert	23
<b>Figure II.8</b> : Caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement normal	25
<b>Figure II.9</b> : Recherche de PPM ; suite d'une variation d'ensoleillement	25
<b>Figure II.10</b> : Recherche de PPM ; suite d'une variation de charge	26
<b>Figure II.11</b> : Recherche de PPM ; suite d'une variation de température	26
<b>Figure II.12</b> : Principe de fonctionnement de la méthode P&O	27
<b>Figure II.13</b> : Organigramme de l'algorithme P&O	28
<b>Figure II.14</b> : Position du point de fonctionnement suivant $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$	30

<b>Figure II.15</b> : Position du point de fonctionnement suivant $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}$	30
<b>Figure II.16</b> : Organigramme de l'algorithme d'incrément de conductance	31
<b>Figure II.17</b> : Schéma bloc d'un système PV	32
<b>Figure II.18</b> : Caractéristique $I = f(V)$ d'un générateur <b>BP Solar SX3190</b>	33
<b>Figure II.19</b> : Caractéristique $P = f(V)$ d'un générateur <b>BP Solar SX3190</b>	33
<b>Figure II.20</b> : Caractéristique $I = f(V)$ d'un générateur <b>BP Solar SX3190</b> à T=25°C et éclairement variable	34
<b>Figure II.21</b> : Caractéristique $P = f(V)$ d'un générateur <b>BP Solar SX3190</b> à T=25°C et éclairement variable	34
<b>Figure II.22</b> : Caractéristique $I = f(V)$ d'un générateur <b>BP Solar SX3190</b> à G=1000 W/m <sup>2</sup> et température variable	35
<b>Figure II.23</b> : Caractéristique $P = f(V)$ d'un générateur <b>BP Solar SX3190</b> à G=1000 W/m <sup>2</sup> et température variable	35
<b>Figure II.24</b> : Profil d'éclairement et de température utilisé	36
<b>Figure II.25</b> : Performances de l'algorithme INC, (a) : Puissance de sortie du hacheur, (b) Tension de sortie du hacheur, (c) Courant de sortie du hacheur.	37
 <b>Chapitre 3 :</b>	
<b>Figure III.1</b> : Différents types des défauts d'un système PV	40
<b>Figure III.2</b> : Schéma de simulation des défauts du générateur PV sous Matlab/simulink, (a) : défauts temporaires et permanents, (b) : défauts d'ombrage et de diode by-pass	42
<b>Figure III.3</b> : Caractéristique P-V pour différents % d'ombrage	44
<b>Figure III.4</b> : Caractéristique I-V pour différents % d'ombrage	45
<b>Figure III.5</b> : Diode by-pass dans un générateur PV	45
<b>Figure III.6</b> : Groupe des cellules PV avec diode by-pass court-circuitée	46
<b>Figure III.7</b> : Schéma de simulation d'un défaut de court-circuit L-L	46
<b>Figure III.8</b> : Caractéristique I-V avec défauts de court-circuit	47
<b>Figure III.9</b> : Caractéristique P-V avec défauts de court-circuit	47
<b>Figure III.10</b> : groupe des cellules PV avec diode by-pass en circuit ouvert	48
<b>Figure III.11</b> : Caractéristique I-V avec diode by-pass en circuit ouvert	48
<b>Figure III.12</b> : Caractéristique P-V avec de diode by-pass en circuit ouvert	49
<b>Figure III.13</b> : groupe des cellules avec diode bypass inversée	49
<b>Figure III.14</b> : Caractéristique I-V avec diode bypass inversée	50

<b>Figure III.15</b> : Caractéristique P-V avec diode bypass inversée	50
<b>Figure III.16</b> : Caractéristique I-V avec augmentation de la résistance série $R_s$	51
<b>Figure III.17</b> : Caractéristique P-V avec augmentation de la résistance série $R_s$	51
<b>Figure III.18</b> : Caractéristique I-V avec diminution de résistance shunt $R_{sh}$	52
<b>Figure III.19</b> : Caractéristique P-V avec diminution de résistance shunt $R_{sh}$	52
<b>Figure III.20</b> : Caractéristique I-V des différents défauts d'un système PV.	53
<b>Figure III.21</b> : Caractéristique P-V des différents défauts d'un système PV.	53
<b>Figure III.22</b> : Profil d'éclairement et de température utilisé	54
<b>Figure III.23</b> : Puissance de sortie du hacheur	55
<b>Figure III.24</b> : Tension de sortie du hacheur	55
<b>Figure III.25</b> : Courant de sortie du hacheur	56

#### **Chapitre 4 :**

<b>Figure IV.1</b> : Organigramme de diagnostic des défauts	59
<b>Figure IV.2</b> : Méthodes de diagnostic des défauts d'un système PV	60
<b>Figure IV.3</b> : Neurone biologique	62
<b>Figure IV.4</b> : Neurone artificiel (formel).	63
<b>Figure IV.5</b> : Comportement d'un neurone artificiel (formel).	64
<b>Figure IV.6</b> : Modèle de perceptron monocouche	65
<b>Figure IV.7</b> : Modèle de perceptron multicouche	65
<b>Figure IV.8</b> : Schéma d'apprentissage supervisé	67
<b>Figure IV.9</b> : schéma d'apprentissage non-supervisé	67
<b>Figure IV.10</b> : Représentation du réseau avec une seule sortie	68
<b>Figure IV.11</b> : Fenêtre d'entraînement du RNA	69
<b>Figure IV.12</b> : Courbes de gradient, $\mu$ et la valeur d'échec	70
<b>Figure IV.13</b> : Graphe de l'erreur d'apprentissage, de test et de validation	70
<b>Figure IV.14</b> : Histogramme d'erreur	71
<b>Figure IV.15</b> : Courbes de régression	72
<b>Figure IV.16</b> : Sortie du RNA	72
<b>Figure IV.17</b> : Représentation du réseau avec quatre sorties	73
<b>Figure IV.18</b> : Graphe de l'erreur d'apprentissage, de test et de validation	74
<b>Figure IV.19</b> : Histogramme d'erreur	74
<b>Figure IV.20</b> : Courbe de régression	75
<b>Figure IV.21</b> : Matrice de confusion	76
<b>Figure IV.22</b> : Courbe ROC	76





## *Liste des tableaux*

### *Chapitre 2 :*

<b>Tableau II.1</b> : Caractéristiques du module PV <b>BP Solar SX3190</b>	32
<b>Tableau II.2</b> : Suivi des performances de l'algorithme INC	38

### *Chapitre 3 :*

<b>Tableau III.1</b> : Défauts du générateur photovoltaïque	41
<b>Tableau III.2</b> : Exemples de défauts d'ombrage	43
<b>Tableau III.3</b> : Cas de défauts d'ombrage simulés	44
<b>Tableau III.4</b> : Suivi des performances de l'algorithme INC	56

### *Chapitre 4 :*

<b>Tableau IV.1</b> : Neurone artificiel et neurone biologique	63
<b>Tableau IV.2</b> : Fonctions d'activation	66

## Nomenclature :

a	Facteur d'idéalité de la diode
b	biais
C	Capacité ( $\mu\text{F}$ )
C	coefficient de température
D	Diamètre (m)
D,d	Diode
E	Tension continu (V)
G	Irradiation ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
G	Conductance ( $\Omega^{-1}$ )
I	Courant (A)
K	Constante de Boltzmann ( $J.K^{-1}$ )
L	Inductance (Henry)
P	Puissance (W)
q	Charge d'électron (Coulomb)
R	Résistance ( $\Omega$ )
S	Surface de la cellule ( $\text{m}^2$ )
T	Température ( $^{\circ}\text{C}$ )
T	Période (s)
t	Temps (s)
V	Tension (V)
v	Potentiel
w	Poids synaptique
x	Entrée
y	Valeur de l'état interne

## Symboles grecs :

$\alpha$	Rapport cyclique
$\alpha_i$	Coefficient de température du courant
$\eta$	Rendement
$\lambda$	Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )

## Indices :

max	maximal
min	minimal
oc, co	Open circuit (circuit ouvert)
ph	photo
s	Soleil
s	Série
s	Saturation
sh	Shunt, parallèle
sc, cc	Short circuit (court-circuit)
t	Terre
th	Thermique
ts	Soleil, Terre

## **Abréviations :**

BC	Bande de conduction
BV	Bande de valence
DC	Courant continu
DP	Diode by-pass
EVA	Ethylène -Vinyl-Acétate
FF	Facteur de forme
GPV	Générateur photovoltaïque
HIT	Hétérojonction avec couche mince intrinsèque
IR	Infrarouge
LG	Ligne à terre
LL	Ligne à ligne
MPPT	Suiveur de point de puissance maximal (Maximum Power Point Tracking)
Ns	Nombre des cellules en série.
PPM	Point de Puissance Maximal
P&O	Perturbation et Observation
PV	Photovoltaïque
RNA	Réseau de neurones artificiel
STC	Condition de test standard
TC	Thyristor commandé
UV	Ultra-Violet

La demande énergétique croissante et les graves préoccupations environnementales obligent les chercheurs en systèmes électriques et en électronique de puissance à découvrir des solutions énergétiques alternatives. La production d'énergie conventionnelle à partir de combustibles fossiles (charbon, gaz naturel, etc.) entraîne de graves préoccupations environnementales. Par conséquent, les énergies renouvelables (ER) étant propres, sans carbone et inépuisables, servent de solution énergétique alternative. De plus, les sources d'énergies renouvelables conviennent pratiquement aux zones éloignées qui restent inaccessibles depuis le réseau central. Parmi les différentes sources d'énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, etc., l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est largement utilisée en raison de sa facilité de disponibilité, quelle que soit la situation géographique.

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque (PV) fonctionnent de manière chronique dans diverses conditions climatiques extérieures, par conséquent, des défauts peuvent survenir dans les panneaux des systèmes photovoltaïques. Cependant, les défauts du côté courant continu (CC) d'un système PV, tels que les défauts de circuit ouvert, de court-circuit, de dégradation et d'ombrage, sont souvent difficiles à éviter et peuvent entraîner une perte d'énergie du système, une réduction de la durée de vie du module PV ou même de graves problèmes de sécurité. Par conséquent, le développement d'une méthode de détection de défauts pour les défauts du générateur PV est particulièrement important pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie du système PV, augmenter la durée de vie des modules PV et réduire les coûts de maintenance.

Les méthodes de détection de défaut existantes comprennent celles basées sur la détection infrarouge thermique, la réflectométrie dans le domaine temporel, l'algorithme d'intelligence artificielle, les méthodes d'analyse de modèles mathématiques, etc.

L'objectif principal de ce travail est d'explorer la détection des défauts des systèmes photovoltaïques, grâce à l'application des réseaux de neurones artificiels (RNA). Bien qu'il existe de nombreuses façons possibles de déterminer et de diagnostiquer les défauts des installations PV, le détecteur de défauts RNA constitue une méthode d'application, commune à l'industrie de l'énergie. Ses méthodes et techniques sont évaluées, avec des recommandations faites quant aux succès futurs. Ce travail s'articule autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes photovoltaïques, l'énergie solaire, les types et caractéristiques des cellules photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre nous présentons dans un premier temps, les modèles de la cellule photovoltaïque et du convertisseur DC-DC Boost. Dans un deuxième temps, nous mettons l'accent sur l'effet des conditions météorologiques (variation de l'éclairement et de la température) sur les caractéristiques I-V et P-V d'un système photovoltaïque simulé sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Le troisième chapitre se concentre sur les défauts des systèmes photovoltaïques. Il vise à présenter d'une manière succincte les différents types de défauts que l'on trouve dans les installations PV, les défauts de court-circuit, défauts d'ombrage, défauts de dégradation et défauts de circuit ouvert. Nous nous concentrons spécialement sur la simulation de ces différents défauts.

Le dernier chapitre est consacré au diagnostic des défauts des systèmes photovoltaïques par la technique des réseaux de neurones. Après un bref aperçu sur la théorie des réseaux de neurones, nous présentons les résultats de classification des défauts de court-circuit, circuit ouvert, ombrage en se basant sur des RNA multicouches avec une seule entrée et quatre entrées.

Enfin, nous dressons à la fin du manuscrit une conclusion et des perspectives.

## **I. Introduction :**

Le monde est confronté à un défi majeur sous la pression de la croissance rapide de la demande énergétique et de la diminution des ressources en combustibles fossiles. Pour résoudre ce problème, l'énergie mondiale se transforme en une source d'énergie efficace et durable. Les énergies renouvelables sont des solutions alternatives de bon augure et des technologies alternatives pour la production d'électricité. La production à partir d'un panneau solaire est respectueuse de l'environnement et moins coûteuse que les sources d'énergie conventionnelles. De plus, les ajouts comme la combinaison de la baisse des prix des panneaux, les améliorations rapides de l'efficacité et les effets de l'augmentation de la facture d'électricité ont contribué à une augmentation de la demande d'investissement dans le générateur solaire photovoltaïque pour générer leurs propres besoins en électricité. Dans ce premier chapitre nous aborderons le domaine photovoltaïque dans sa généralité.

### **I-1. Histoire du photovoltaïque :**

1839 : L'effet photovoltaïque fut découvert par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel. Ce phénomène consiste à convertir l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique optique en électricité. En effet, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron c'est-à-dire, l'exposition de certains matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium à la lumière les mène à produire un courant électrique.

1875 : Warner Von Siemens présente un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs devant l'académie des Sciences de Berlin.

1877 : Publication du premier rapport sur l'effet photovoltaïque par les deux scientifiques de Cambridge Adams et Day [1]

1883 : Une cellule solaire fut construite par Charles Fritts en sélénium, avec un rendement inférieur à 1%, mais ce n'est qu'en 1916 que Robert Millikan est arrivé à produire un courant continu.

1945 : Chapin et al ont annoncé la première fabrication d'un élément solaire avec une jonction p-n et un rendement de 6%. [1]

1954 : Mise au point d'une cellule photovoltaïque à haut rendement par Chapin, Pearson et Prince au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Envoi des cellules solaires avec un rendement de 9% dans l'espace pour alimenter des premiers satellites.

1973 : L'université de Delaware a construit une première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.

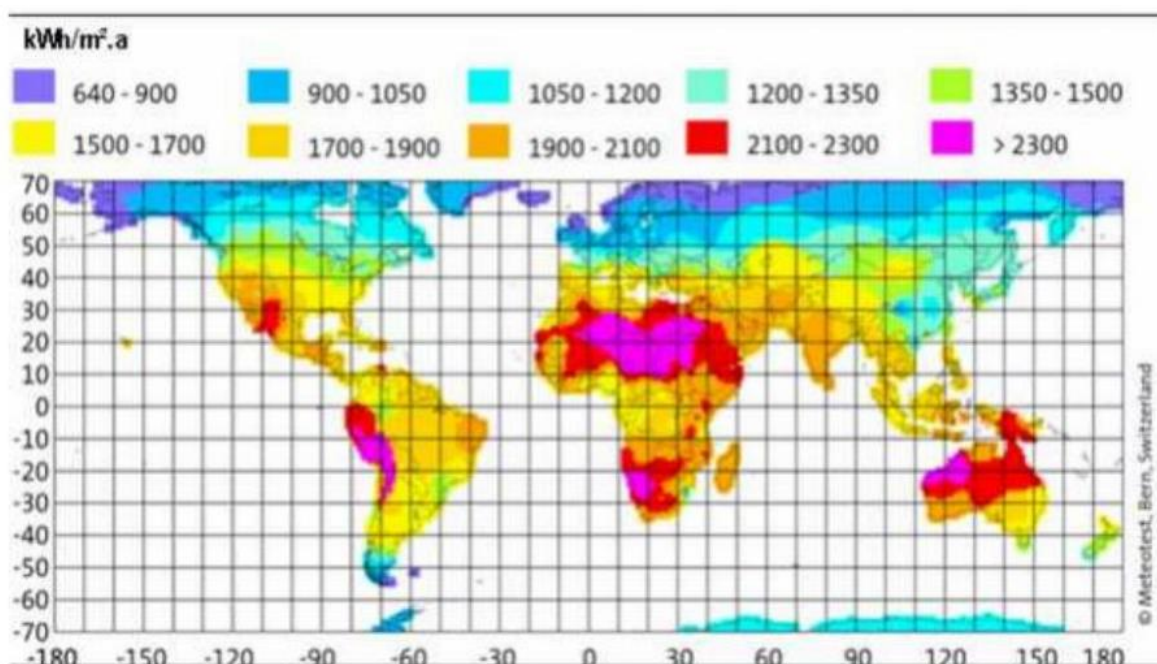
1983 : Alimentation de la première voiture par énergie photovoltaïque en Australie.

## I-2. Energie solaire photovoltaïque :

A chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [2] Sa lumière prend 8 minutes environ pour parvenir à la terre, à une vitesse qui aboutit à 300 000 km /s. Le soleil est une étoile dont la température du noyau atteint 25 millions de degrés Celsius et qui émet continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire. La terre n'en reçoit qu'une toute petite partie, soit une moyenne de 1367 watts. [3]. Ces dernières décennies, l'énergie solaire photovoltaïque est d'une grande importance parce que d'une part, elle est basée sur l'effet photoélectrique, ce qui permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique prêt à l'utilisation directe. D'autre part, elle est renouvelable donc à la fois inépuisable et économique.

- Diamètre de soleil  $D_s = 1.39.10^9\text{m}$ .
- Diamètre de la terre  $D_t = 1.27.10^7\text{m}$ .
- Distance moyenne soleil terre  $D_{ts} = 1.5.10^{11}\text{m}$ .

La figure I.1 illustre le rayonnement solaire dans le monde :



**Figure I.1** : Rayonnement solaire dans le monde en KWh/m<sup>2</sup> [4]

### I-3. Spectre du rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique est constitué d'un ensemble de photons. Il est contenu dans une bande de longueur d'onde variant de 0.20 à 10  $\mu\text{m}$ . L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde. Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en: [5]

- Ultraviolet UV  $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$  6.4%
- Visible  $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$  48.0%
- Infrarouge IR  $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$  45.6%

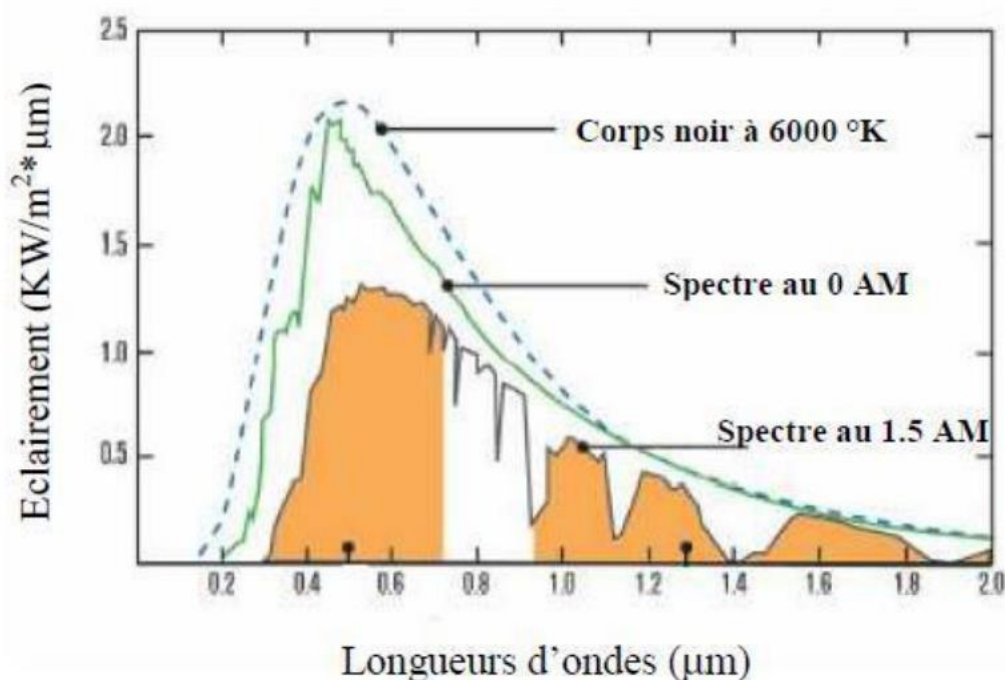


Figure I.2 : Spectre solaire hors atmosphère

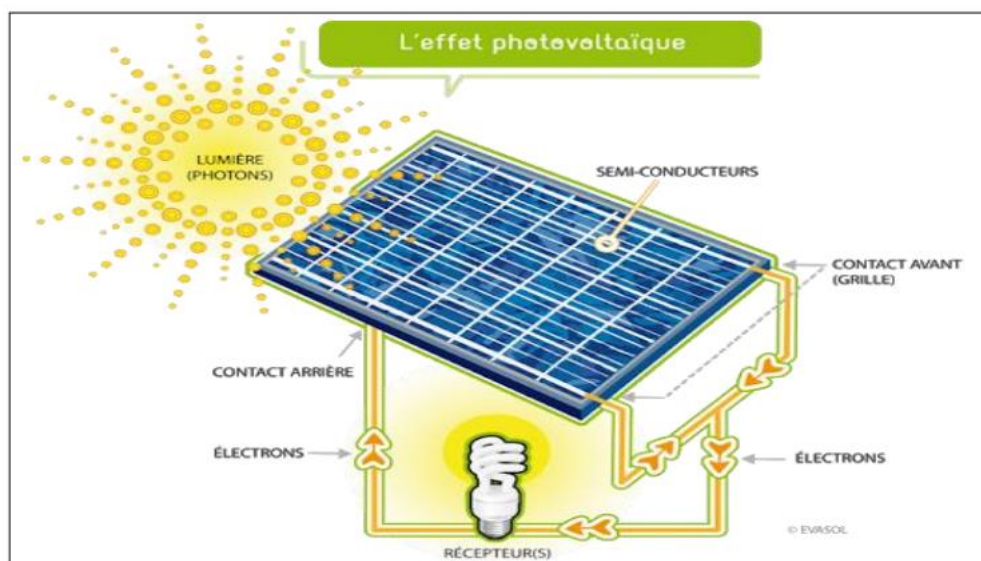
### I-4. Effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » provient de l'étymon grec *photo* qui signifie « lumière » associé à *Volta*, le nom du physicien italien qui a inventé la pile électrochimique en 1800. Ce terme est souvent abrégé par le sigle PV. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le français Edmond Becquerel en observant une différence de potentiel dans une solution électrolytique sous éclairement. [6]. Ce phénomène physique se traduit par la conversion directe de

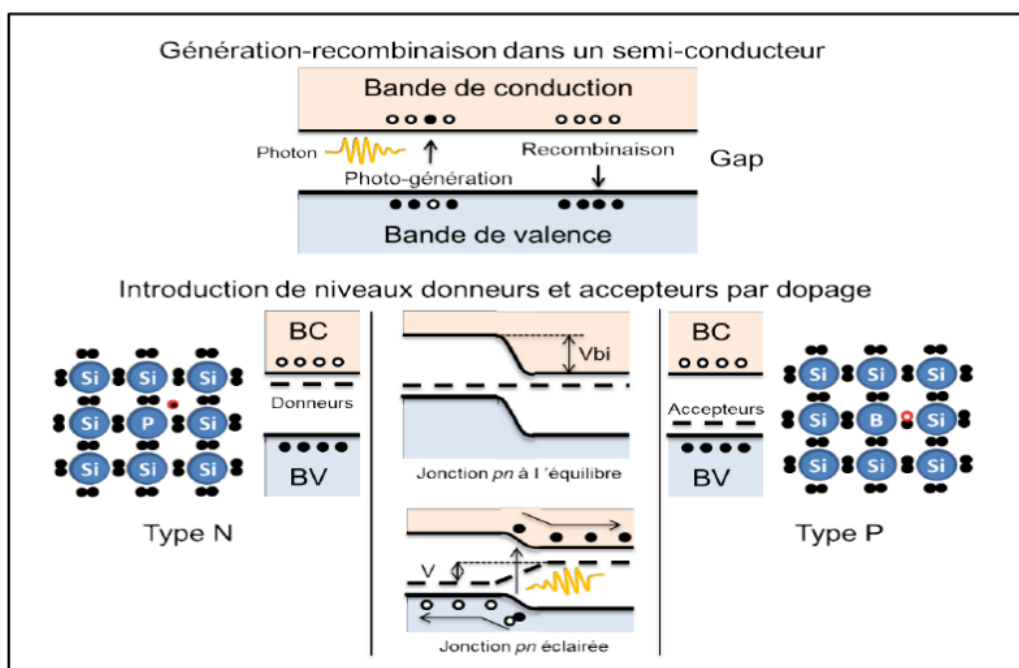


l'énergie lumineuse des rayons solaires sous forme de photons en énergie électrique par le biais de la production et du transport des charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière (génération de paires électron-trou). Pour que l'effet photovoltaïque soit établi, le photon porté par les rayons solaires doit posséder une énergie égale ou supérieure au gap du semi-conducteur (figure I.3). D'ailleurs, il se manifeste quand un matériau semi-conducteur comporte deux charges électriques différentes, l'une présente un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Entre ces deux zones n et p se crée un champ électrique lorsque la première est mise en contact avec la deuxième. Une jonction (dite p-n) a donc été établie. En effet, Une jonction (P-N) est la juxtaposition de deux semi-conducteurs dopés différemment. Dans le cas du silicium, un dopage par des atomes de phosphore apportera un excès d'électrons et le silicium sera dit de type N. Si le dopage se fait par des atomes de bore, déficitaires en électrons, (apport de trous), le silicium sera dit de type P. C'est l'assemblage de ces deux semi-conducteurs de type P et N qui forme la jonction (P-N) (figure I.4).

L'application de la notion de bandes d'énergie montre qu'un semi-conducteur non dopé contient une bande de valence (BV) et une bande de conduction (BC). À l'équilibre thermique, sans excitation externe, la bande de valence et la bande de conduction sont occupées, respectivement, par les électrons ( $e^-$ ) et les trous ( $t^+$ ). Le domaine séparant ces deux bandes est nommée bande interdite ou gap [7].



**Figure I.3** : Schéma de l'effet photovoltaïque



**Figure I.4 :** Structure en bande d'un semi-conducteur en génération-recombinaison et le dopage du silicium

### I-5. Différents types de cellules photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque est le plus petit élément constitutif dans un système photovoltaïque réalisée à base d'un matériau semi-conducteur dopé pour créer une jonction. Aujourd'hui, 90% des cellules solaires sont fabriquées en silicium cristallin. Elles ont deux faces dont l'une est dopée n et l'autre p. Celles-ci sont équipées d'électrodes permettant l'absorption de la lumière et la collection des électrons en surface afin de réaliser un circuit électrique. Il existe différents types de cellules photovoltaïques réparties selon leurs technologies de fabrication. Cependant, les cellules les plus répandues sont à base de silicium (Si) car ce dernier est très abondant dans la nature. On en distingue :

#### a- Cellules au silicium monocristallin :

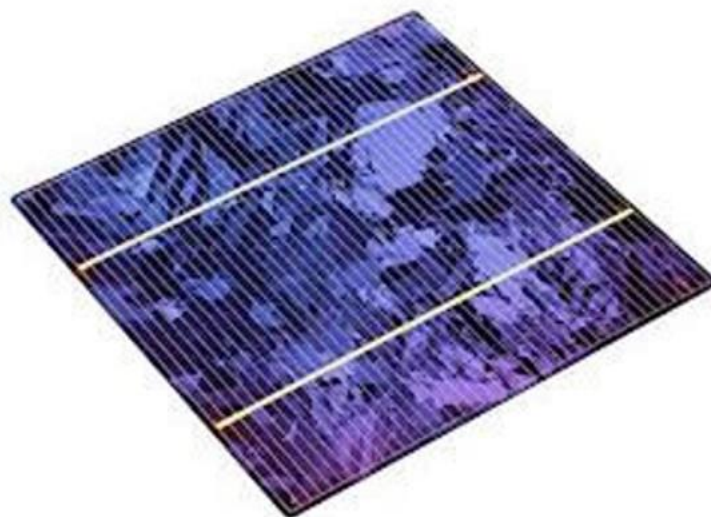
Comme leur nom l'indique, elles sont formées d'un seul cristal scindé en deux couches. Elles sont de couleur bleu foncé. Elles sont identifiées par leur forme carrée avec 4 côtés coupés. Leur avantage est d'avoir un très bon rendement s'étendant entre 12 % et 16%. L'inconvénient est le prix du fait que leur procédé de fabrication est long et énergivore. Aussi, leur rendement s'affaiblit sous un faible éclaircissement (figure I.5).



**Figure I.5 :** Cellule au Silicium monocristallin

**b- Cellules au silicium polycristallin :**

Elles sont constituées de plusieurs cristaux. Leur rendement est moins bon du fait qu'il s'étend entre 11 % et 14 %. L'avantage de ces cellules par rapport à celles en silicium monocristallin réside dans leur prix car leur fabrication nécessite moins d'énergie et moins du temps. Leur inconvénient est dans la faiblesse du rendement quand l'éclairement est faible.



**Figure I.6 :** Cellule au Silicium polycristallin

**c- Cellules amorphes :**

Le silicium, dans ce cas, est utilisé dans son état gazeux par un procédé de vaporisation sous vide par conséquent, les atomes sont disposés de façon désordonnée du fait que les cellules sont fabriquées par projection de silicium sur un autre matériau comme du verre ou du plastique. Il est utilisé en couche mince répondant à de nombreux besoins liés à l'éclairage dans les petits produits comme les montres et les calculatrices. Son rendement est de 5 % à 7 %. Ces cellules sont moins chères et fonctionnent avec un faible éclairement mais leur rendement est très faible et leur durée de vie est courte.



**Figure I.7 :** Cellule au Silicium amorphe

**d- Cellules multi-jonctions :**

Une cellule multi-jonctions dite de « troisième génération » est formée d'une infinité de cellules mono-jonction de gaps différents, ce qui permet d'absorber une partie plus importante du spectre solaire grâce à l'utilisation de différents matériaux semi-conducteurs de gaps différents, permettant ainsi la conversion optimale du spectre. Leur rendement atteint 72% avec 36 jonctions de gaps différents et 56% avec 3 jonctions. Mais ces dernières ne sont pas commercialisées.

**e- Cellules organiques :**

Elles prennent cette appellation parce que la couche active de chacune est constituée de molécules organiques. Cette nouvelle technologie permet de produire des cellules solaires organiques légères, flexibles sur une grande surface et moins chères mais qui ne peuvent atteindre qu'un rendement de 5%.

**f- Cellules HIT :**

Le fait d'entourer une tranche de silicium cristallin mono-mince par d'autres amorphes ultra-minces donne naissance à une cellule solaire HIT. Cet acronyme signifie « hétérojonction avec couche mince intrinsèque ». Celles-ci sont conçues par la multinationale japonaise d'électronique PANASONIC. Leur rendement peut atteindre 19%. Elles sont résistantes aux hautes températures.

**I-6. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque :**

Une cellule PV peut être considérée comme un générateur du fait qu'elle fournit une tension de 0.6 V. De point de vue électrique, une cellule photovoltaïque a différents régimes de fonctionnement dépendant des conditions d'ensoleillement à la surface de celle-ci et de température. Son fonctionnement repose sur deux points importants : le courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ) et la tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ). Le premier dépend de l'intensité de lumière absorbée par la cellule et le second dépend de la tension aux bornes de la cellule quand le courant est nul. Dans ce contexte, le courant produit par une cellule PV varie en fonction de la tension à ses bornes depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule). Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre. [8]

La puissance fournie par une cellule PV est le produit de la tension par le courant, donc dans le cas de court-circuit ( $P = V \times I_{SC}$ ) le  $I_{CC}$  est nul donc la puissance est nulle quel que soit la valeur de  $V$ . De plus, dans le cas de circuit ouvert, la puissance ( $P = V_{OC} \times I$ ) Comme la tension en circuit ouvert est nulle, la puissance est nulle quel que soit la valeur de  $I$ .

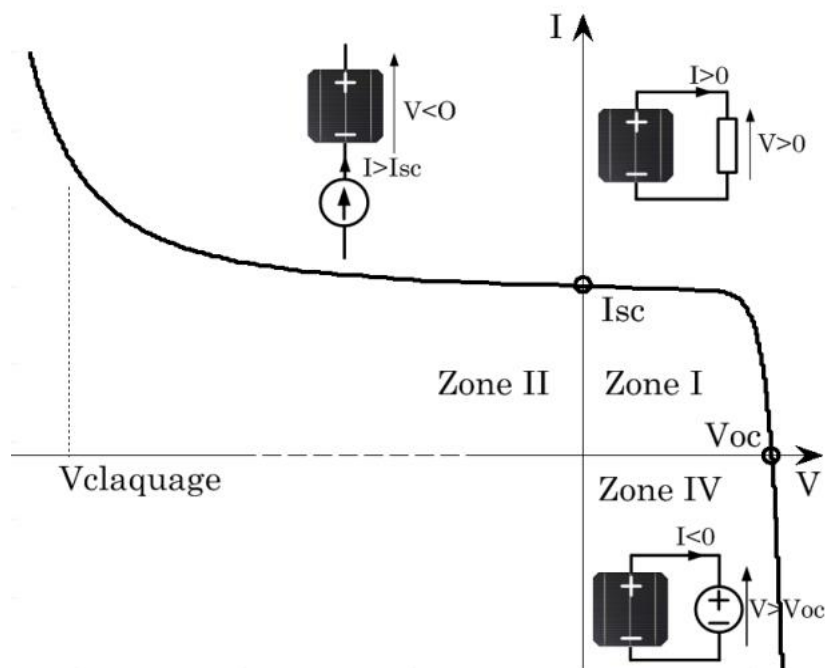
La courbe ci-dessous  $f(V) = I$  détermine le fonctionnement d'une cellule PV dans trois zones différentes.

La zone I représente le fonctionnement en générateur (normal) d'une cellule PV avec :

➤  $0 \leq I \leq I_{SC}$

➤  $0 \leq V \leq V_{OC}$

La puissance délivrée par la cellule PV est de  $P = V \times I$



**Figure I.8** : Caractéristique électrique d'une cellule PV

La zone II représente le fonctionnement en récepteur d'une cellule PV avec :

- $I > I_{sc}$
- $V < 0$

Quand le courant traversant la cellule est forcé par un circuit extérieur à dépasser son courant de court-circuit, la cellule produit une tension négative à ses bornes. La croissance en courant provoquera l'endommagement de la cellule si la tension à ses bornes atteint une limite : la tension de claquage ( $V_{\text{claquage}}$ ). L'étude expérimentale sur différentes cellules de type cristallin a montré que la valeur de la tension de claquage varie entre  $-10\text{ V}$  et  $-30\text{ V}$  [9].

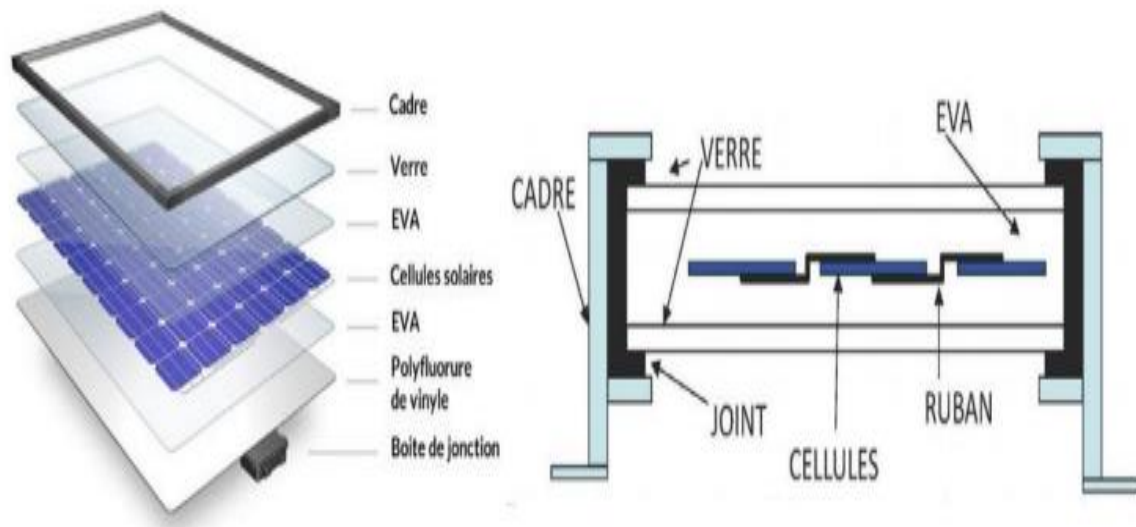
Au niveau de la zone IV, la cellule PV fonctionne en récepteur avec :

- $I < 0$
- $V > V_{oc}$

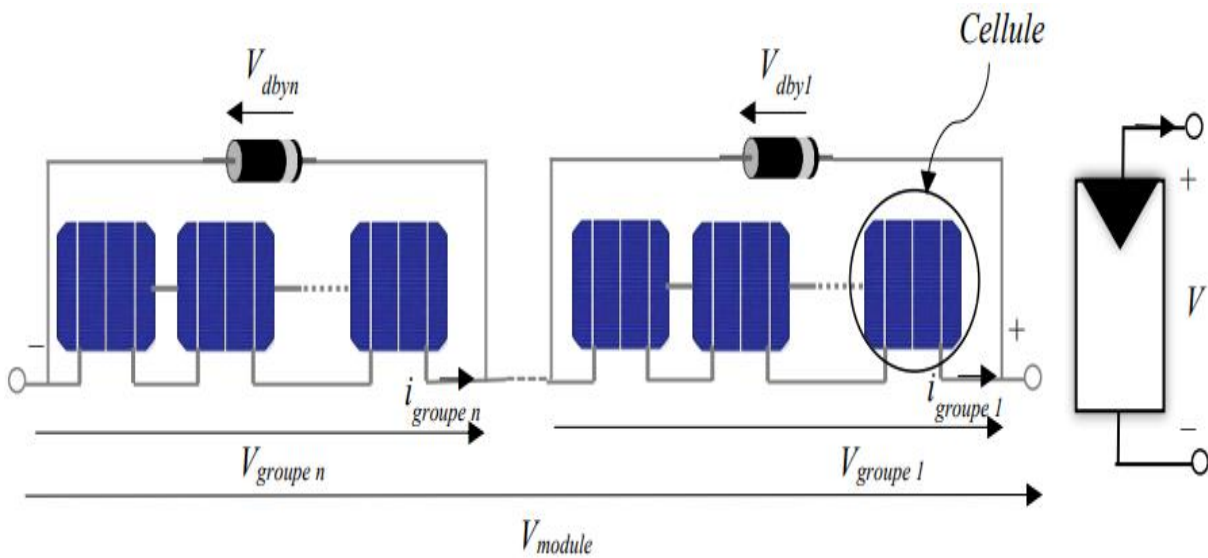
Cela veut dire que la tension de la cellule dépasse sa tension en circuit ouvert donc il y a un courant inverse qui y circule. La cellule sera endommagée si le courant inverse atteint certaine valeur difficile à définir à cause de plusieurs facteurs internes.

**I-7. Module photovoltaïque :**

Le module photovoltaïque est un ensemble des cellules PV regroupé en série, cet ensemble peut contenir 36, 40, 54, 60, 72 et même 92 cellules, ce nombre est proportionnel avec la puissance demandée. Les cellules PV sont très fragiles et sensibles, c'est pour ça il faut les mettre en module pour garantir une protection mécanique par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène -Vinyl-Acétate), par verre dans la surface avant, et par polyfluorure de vinyl dans la surface arrière. [10]



**Figure I.9 :** Module PV



**Figure I.10 :** Association des cellules dans un module PV

## I-8. Association des modules :

### a- Association série :

Le courant parcouru est le même car les cellules sont associées en série, mais la tension est la somme des tensions des cellules, donc la tension est proportionnelle aux nombres des cellules série, on explique par les équations suivantes :

$$V_{co\text{ série}} = V_{co} \times Ns \quad (\text{I-1})$$

$$I_{cc\text{ série}} = I_{cc} \quad (\text{I-2})$$

Ns : nombre des cellules en série.

Vco : tension de circuit ouvert.

Icc : courant de court-circuit.

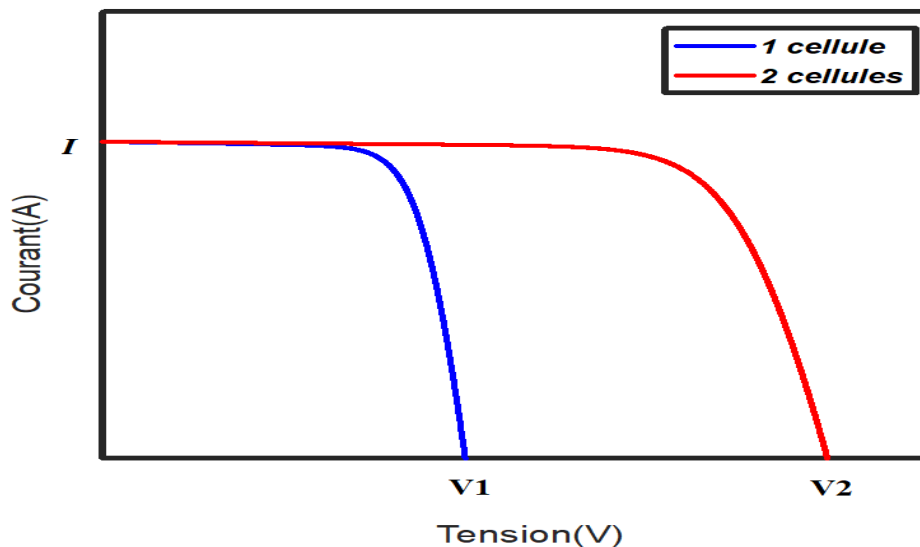


Figure I.11 : Caractéristique I-V de l'association série des cellules

### b- Association parallèle :

La tension des branches est identique car les branches sont associées en parallèle, mais le courant de sortie est la somme des courants des branches (la première loi de Kirchhoff), on explique par les équations suivantes :

$$V_{co\text{ parallèle}} = V_{co\text{ branche}} \quad (\text{I-3})$$

$$I_{cc\text{ parallèle}} = \sum I_{cc\text{ branche}} \quad (\text{I-4})$$

Vco : tension de circuit ouvert.

Icc : courant de court-circuit.



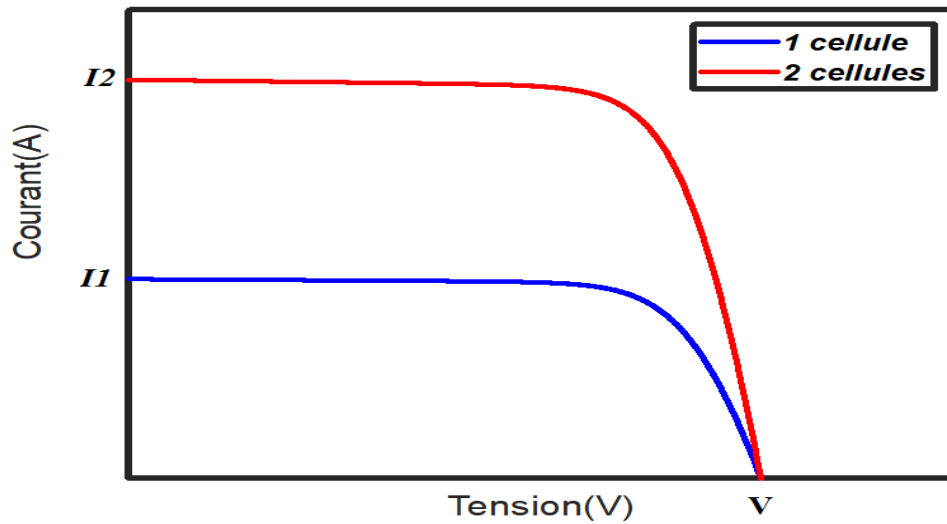


Figure I.12 : Caractéristique de l'association parallèle des cellules

### I-9. String PV :

Le string est un regroupement d'un ensemble des modules en série, il contient une diode anti-retour en série avec les modules, et une diode bypass en parallèle avec chaque module pour la protection de ces derniers, la tension de string est proportionnelle avec le nombre des modules.

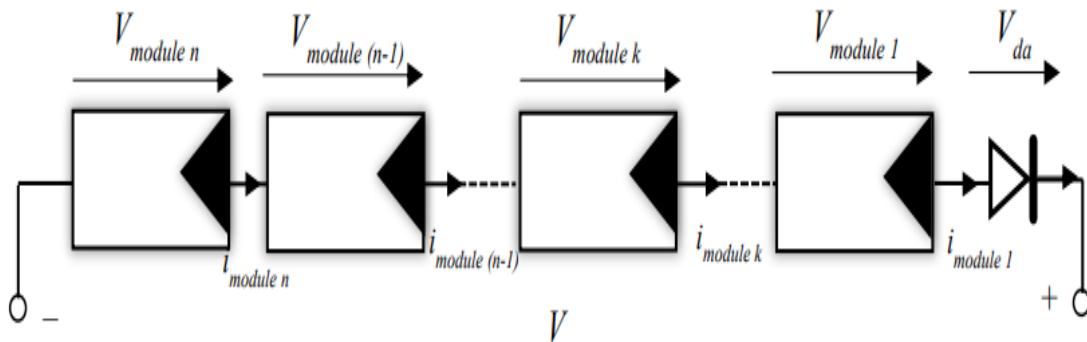


Figure I.13 : string PV

### I-10. Champ PV :

Un champ PV est un ensemble de plusieurs string PV montés en parallèle, la tension de ce champ PV est la même tension de string et le courant de champ est la somme des courants de chaque string, donc pour augmenter la puissance il faut augmenter le nombre des string parallèle (augmentation de courant, la tension est constante).

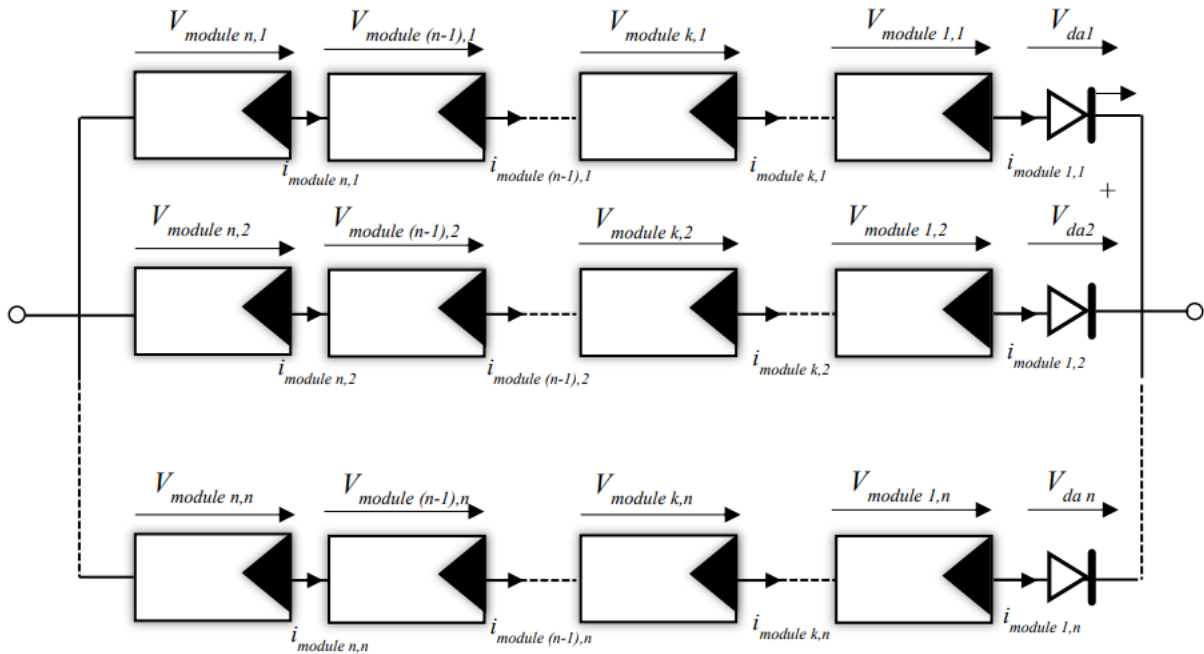


Figure I.14 : Champ PV

**I-11. Système de protection :**

Afin de réaliser un système PV, il faut mettre des moyens de protection pour augmenter la durée de vie de ce système, et pour optimiser le fonctionnement de système (mettre le système au bon fonctionnement et éviter les pannes), on met deux moyens :

- **Diode anti-retour** : met en série avec le GPV pour la protection en cas d’une décharge vers le GPV.
- **Diode bypass** : met en parallèle avec les modules pour la protection de celle-ci en cas d’un court-circuit.

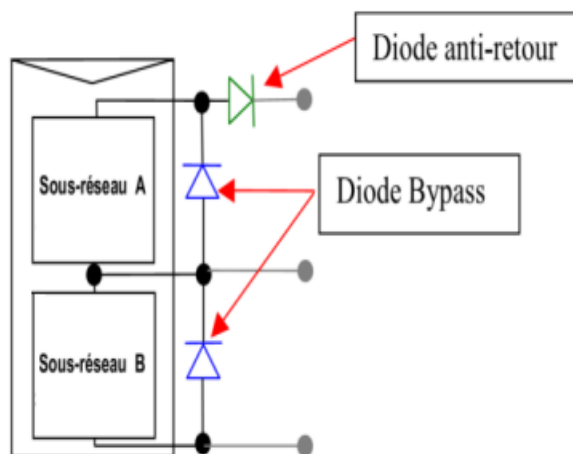


Figure I.15 : Système de protection d’un système PV

**I-12. Conclusion :**

Dans ce premier chapitre nous avons donné un bref aperçu sur le domaine du photovoltaïque. Dans un premier temps on a commencé par un petit historique sur le photovoltaïque, l'énergie et le rayonnement solaires. Par la suite on a pu montrer les éléments essentiels qui constituent le panneau solaire : la cellule photovoltaïque et leurs différents types aux siliciums utilisés dans l'industrie. Le modèle par circuit électrique de la cellule photovoltaïque sera donné au chapitre suivant.

## II. Introduction :

Toute opération d'étude de fonctionnement d'un système photovoltaïque requiert la modélisation mathématique des cellules solaires. Cette étude se base principalement sur les équations électriques et les circuits équivalents. L'objectif préalable de ce chapitre est celui qui s'occupe des moyens de procéder pour garantir l'optimisation de rendement d'un système PV. Pour cela nous nous intéressons au principe de fonctionnement de chaque élément constitutif de ce système : cellule PV, convertisseur DC/DC (Boost ou élévateur) et de contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking).

### II-1. Système Photovoltaïque :

Un générateur Photovoltaïque est l'ensemble de plusieurs modules assemblés soit en série ou bien en parallèle pour atteindre l'objectif de production de l'énergie électrique à partir d'une source solaire (énergie solaire), ces derniers sont composés par des cellules PV qui jouent le rôle d'une source de courant  $I_{ph}$  sous éclairage grâce à l'effet photovoltaïque.

Le système se compose d'un générateur PV, d'un convertisseur DC/DC, d'une Commande MPPT et d'une charge.

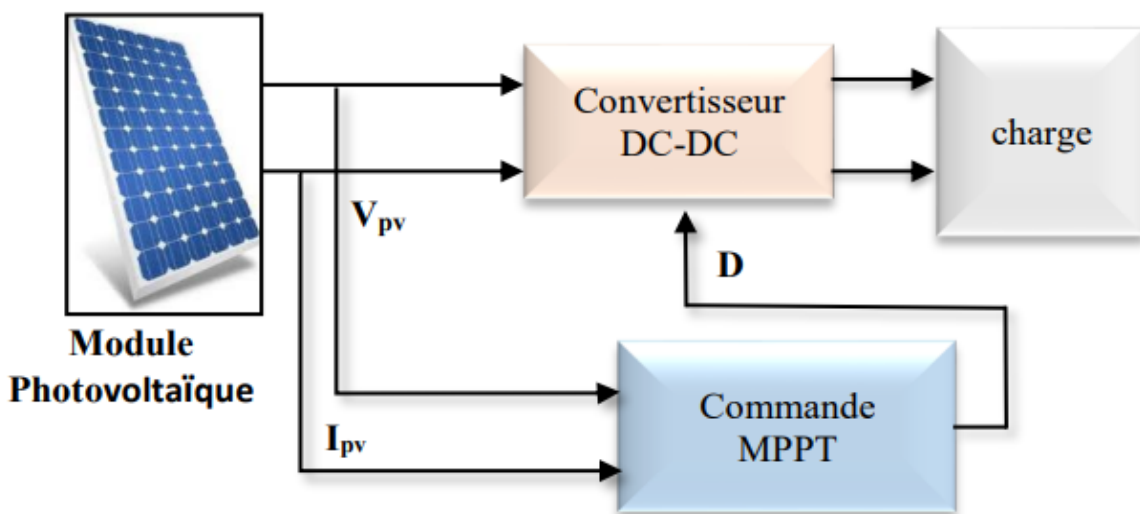
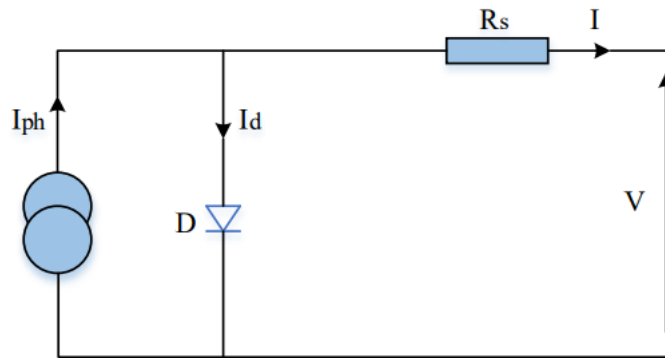


Figure II.1 : Système photovoltaïque

#### II-1-1. Modèle simplifié :

Le modèle simplifié de la cellule représenté dans le schéma de la figure II.1 est construit par une source du courant  $I_{ph}$  mise en parallèle avec une diode D. La résistance série  $R_s$  est introduite sous forme des pertes joule.



**Figure II.2** : Modèle simplifié d'une cellule PV

D'après la loi des nœuds (deuxième loi de Kirchhoff)

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

$I_{ph}$  : est un photo-courant généré par le générateur solaire sous éclairement  $E$ .

$D$  : diode.

$I_d$  : le courant traversant la diode :

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{a V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-2})$$

$R_s$  : résistance série.

$a$  : Facteur d'idéalité de la diode.

$V_{th}$  : Tension thermique.

Le courant de sortie  $I$  est donné par la compensation du courant  $I_d$  par sa valeur, donc  $I$  égale à :

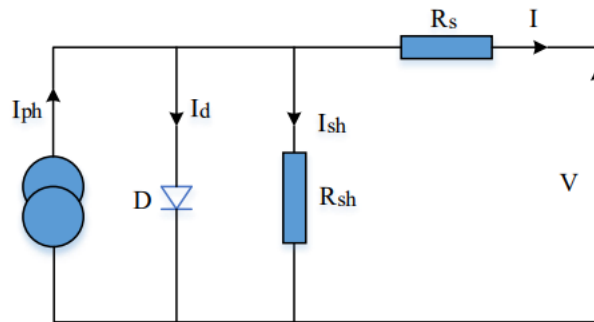
$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{a V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-3})$$

### II-1-2. Modèle à une diode :

Une cellule photovoltaïque est représentée par un model réel qui se compose de :

- Une diode  $D$
- Une résistance série du générateur solaire  $R_s$
- Une résistance parallèle du générateur solaire  $R_{sh}$

- Un générateur de courant  $I_{ph}$  ( $I_{ph}$  est un photo-courant généré par le générateur solaire sous éclairement)



**Figure II.3** : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

On applique la deuxième loi de Kirchhoff (loi des nœuds), on trouve l'expression du courant de sortie  $I$  comme suit :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II-4})$$

$I$  : courant de sortie.

$I_{ph}$  : le photo-courant généré par le générateur solaire sous éclairement.

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} [I_{sc} + \alpha_i (T - T_{STC})] \quad (\text{II-5})$$

Avec :

$I_{sc}$  : courant du court-circuit

$\alpha_i$ : coefficient de température du courant en ( $A/^\circ C$ ).

$$\alpha_i = \left. \frac{dI}{dT} \right| \quad (\text{II-6})$$

$T$  : la température.

$G$  : l'irradiation.

STC : condition de test standard

$I_d$  : le courant traversant la diode.

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{a V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-7})$$

$I_{sh}$  : le courant qui traverse la résistance shunt (parallèle)  $R_{sh}$ .

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II-8})$$

Substituons (II-7) et (II-8) dans (II-4) l'équation du courant de sortie I sera donc :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{a V_{th}}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V+R_s I}{R_{sh}}\right) \quad (\text{II-9})$$

Où :

$$V_{th} = \frac{N_s K T}{q} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

$N_s$  : nombre des cellules en série d'un module.

$K$  : constante de Boltzmann =  $1,3854 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

$T$  : la température.

$q$  : la charge d'électron =  $1,6 \times 10^{-19}$  Coulomb.

$a$  : Facteur d'idéalité de la diode.

### II-1-2-1. Courant de saturation de la diode $I_s$ :

on écrit le courant de saturation sous la forme suivante :

$$I_s = C \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap}}{K T}\right) \quad (\text{II-11})$$

Avec :

$C$  : le coefficient de température de  $I_s$

$E_{gap}$  : la bande interdite de semi-conducteur

### II-1-2-2. Tension de circuit ouvert $V_{co}$ :

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul ( $I=0$ ). Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. On obtient la tension de circuit ouvert en branchant un voltmètre aux bornes de la cellule.

### II-1-2-3. Courant de court-circuit $I_{cc}$ :

Il s'agit d'un courant maximal généré lorsque la cellule est soumise à un court-circuit ( $V=0$ ) pour un rayonnement incident normal sur la cellule PV de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température à  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  [11], le courant  $I_{CC}$  est de l'ordre de  $12 \text{ mA/cm}^2$  pour des conditions de test standard (STC) en laboratoire.

**II-1-2-4. Puissance maximale (idéale) :**

Dans le cas d'une cellule PV idéale, la puissance maximale est le produit de tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) par le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

$$P_{max-idéale} = V_{co} \times I_{cc} \quad (\text{II-12})$$

**II-1-2-5. Puissance maximale (réelle) :**

Dans ce cas, la cellule PV fournit de différentes puissances selon le point de fonctionnement, on obtient la puissance par le produit de la tension  $V$  par le courant  $I$ . Donc on obtient la puissance maximale au PPM (point de puissance maximale). Celle-ci sera donnée par le produit de tension par courant au PPM ( $V_{pmax}$ ,  $I_{pmax}$ )

$$P_{PPM} = V_{pmax} \times I_{pmax} \quad (\text{II-13})$$

**II-1-2-6. Facteur de forme FF:**

Le facteur de forme est donné par :  $FF = (\text{puissance maximale}) / (V_{co} \cdot I_{cc})$

$$FF = \frac{P_{PPM}}{(V_{co} \times I_{cc})} = \frac{V_{pmax} \times I_{pmax}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (\text{II-14})$$

**II-1-2-7. Le rendement  $\eta$  :**

Le rendement d'une cellule solaire est donné par :

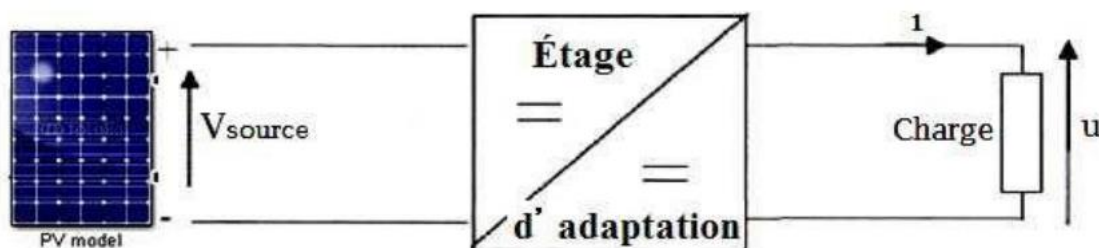
$$\eta = \frac{P_{PPM}}{E \times S} \quad (\text{II-15})$$

$E$  : rayonnement solaire.

$S$  : surface de la cellule.

**II-2. Convertisseur DC/DC :**

L'hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance ou c'est un convertisseur statique (continu/continu) linéaire qui permet de convertir une tension continue fixe (ou courant) à une autre tension (ou courant) continu mais à valeur moyenne réglable.



**Figure II.4 :** Étage d'adaptation entre un GPV et une charge



Il existe deux types des convertisseurs DC/DC :

- Convertisseur série dit Buck (abaisseur) qui donne une tension continue à la sortie plus faible que la tension d'entrée
- Convertisseur parallèle dit Boost (élévateur) qui donne une tension continue à la sortie plus importante que la tension d'entrée

Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [12]

### II-3. Principe de fonctionnement d'un convertisseur Boost :

Le convertisseur Boost est un convertisseur survolteur constitué de :

- Un interrupteur TC à fermeture et ouverture commandé
- Une diode D empêche la décharge de la capacité C à travers l'interrupteur TC
- Une inductance L qui permet de lisser le courant appelé sur la source
- Une capacité C supposée assez grande pour que  $V \approx cste$

L'interrupteur TC et la diode D sont complémentaires

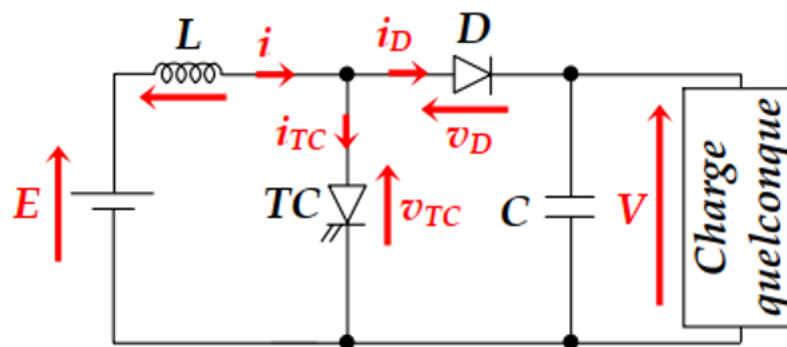


Figure II.5 : Schéma d'un Boost

Manipulé a deux périodes  $0 \leq t \leq \alpha T$  et  $\alpha T \leq t \leq T$  comme suit :

#### a- Période $0 \leq t \leq \alpha T$ :

TC fermé ( $V_{TC} = 0$ ), diode ouvert (bloqué)

Le circuit ci-dessous est un schéma représentatif qui explique le processus de la première tranche de conversation

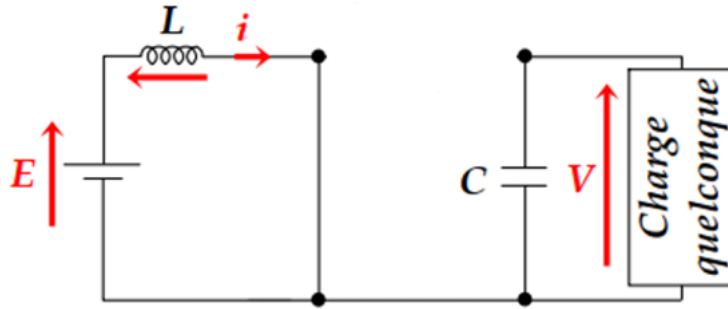


Figure II.6 : Boost avec interrupteur fermé et diode ouverte

$$E - L \frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow E = L \frac{di}{dt} \tag{II-15}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{E}{L}$$

$$\int \frac{di}{dt} = \int \frac{E}{L}$$

$$i(t) = \frac{E}{L}t + A$$

$$i(0) = i_{min} = A$$

$$i(t) = \frac{E}{L}t + i_{min} \tag{II-16}$$

Avec :  $i_d = 0$  ,  $V_{TC} = 0$  ,  $V_d = -V$

**b- Période  $\alpha T \leq t \leq T$  :**

TC ouvert, diode fermée (passante  $V_d = 0$ )

Le circuit ci-dessous est un schéma représentatif qui explique le processus de la deuxième tranche de conversation

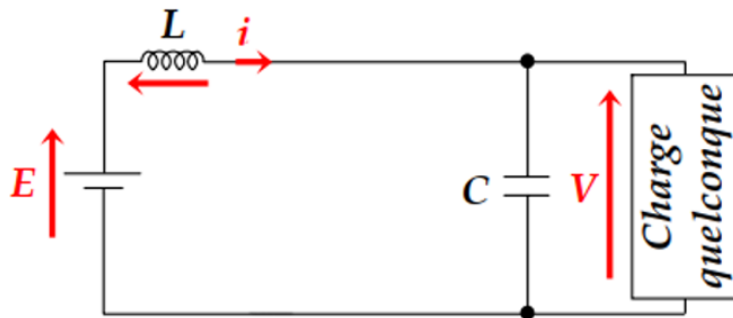


Figure II.7 : Boost avec diode passante et interrupteur ouvert

$$E - L \frac{di}{dt} = V \quad (\text{II-17})$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{E - V}{L}$$

$$\int \frac{di}{dt} = \int \frac{E - V}{L}$$

$$i(t) = \frac{E - V}{L}(t - \alpha T) + B$$

$$i(\alpha T) = i_{max} = B$$

$$i(t) = \frac{E - V}{L}(t - \alpha T) + i_{max} \quad (\text{II-18})$$

Avec :  $i_{TC} = 0$  ,  $V_d = 0$  ,  $V_{TC} = V$

La relation entre E et V :

$$i(0) = i_{min} = i(T) = \frac{E - V}{L}(T - \alpha T) + i_{max} \quad (\text{II-19})$$

$$i(\alpha T) = i_{max} = \frac{E}{L}\alpha T + i_{min} \quad (\text{II-20})$$

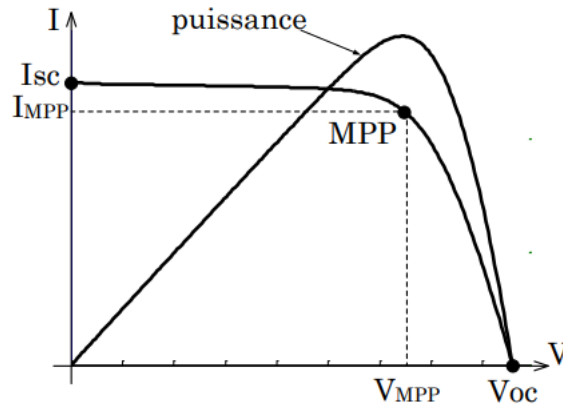
On obtient

$$\frac{E - V}{L}(T - \alpha T) = -\frac{E}{L}\alpha T$$

$$E = (1 - \alpha)V \quad (\text{II-21})$$

#### II-4. Commandes de poursuite du point de puissance maximale MPPT :

Le terme MPPT désigne en anglais, (Maximum Power Point Tracking). Un régulateur qui scanne la tension produite par les panneaux PV. Les cellules de cette dernière sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, le suiveur du point de puissance maximale est utilisé pour la commande du convertisseur [13]. Cette commande a été inventé pour optimiser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques par la variation automatique de rapport cyclique  $\alpha$  (pour obtenir le point de puissance maximal MPP).

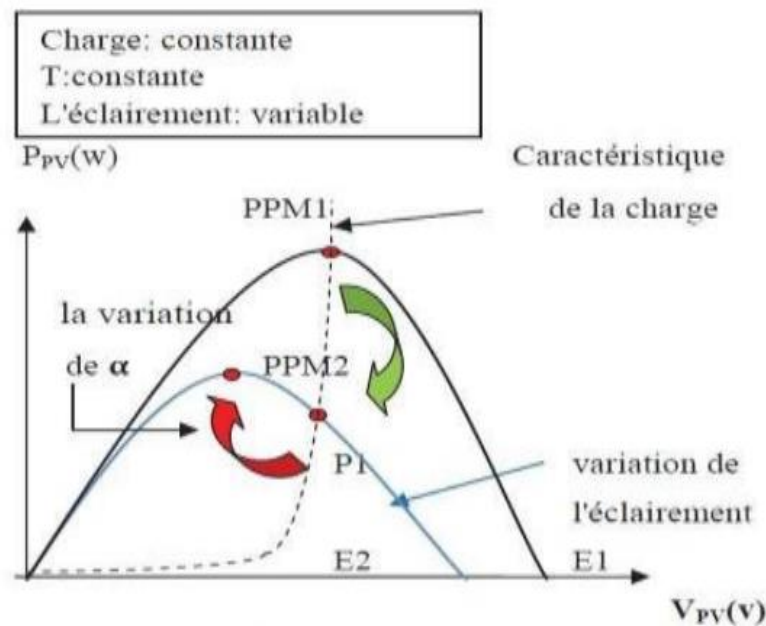


**Figure II.8 :** Caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement normal

#### II-4-1. Principe de la commande MPPT :

La fonction principale de la commande MPPT est de détecter le courant de sortie du circuit principale et la tension continue, de calculer par la suite, la puissance de sortie des panneaux photovoltaïques et de suivre le point de puissance maximale. Il a été constaté que trois types de perturbation (variation d'ensoleillement, de charge et de température) affectent le PPM par le déplacement du point de puissance maximal PPM1 vers un autre point P1.

- Pour le premier cas qui représente la variation d'ensoleillement, la valeur du rapport cyclique  $\alpha$  doit être réajusté pour converger au point de puissance maximale PPM2, comme l'illustre la figure II.9.



**Figure II.9 :** Recherche de PPM ; suite d'une variation d'ensoleillement

- Au cas de la variation de la charge il faut retrouver une nouvelle position optimale par la modification du point de fonctionnement à l'action de la MPPT comme le montre la figure II.10.

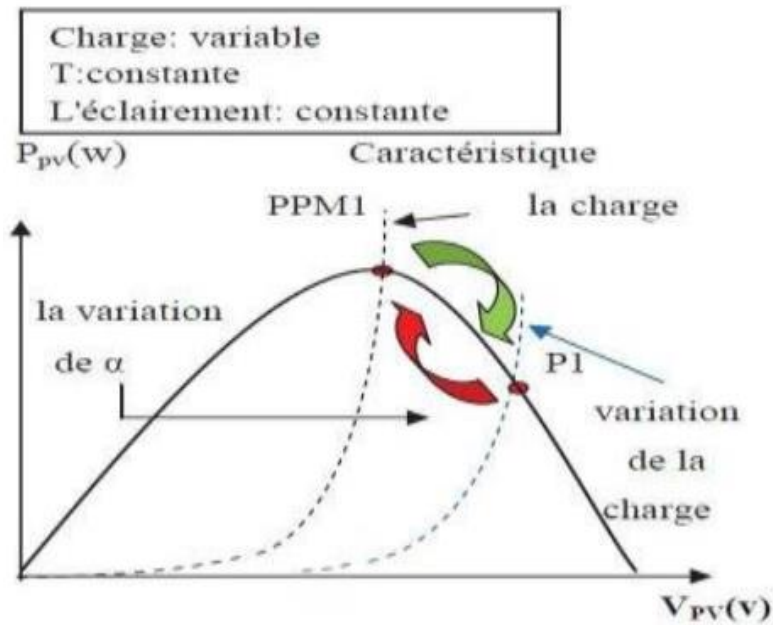


Figure II.10 : Recherche de PPM ; suite d'une variation de charge

- La figure II.11 présente le cas de la variation de température de fonctionnement de GPV liée à la variation de point de fonctionnement.

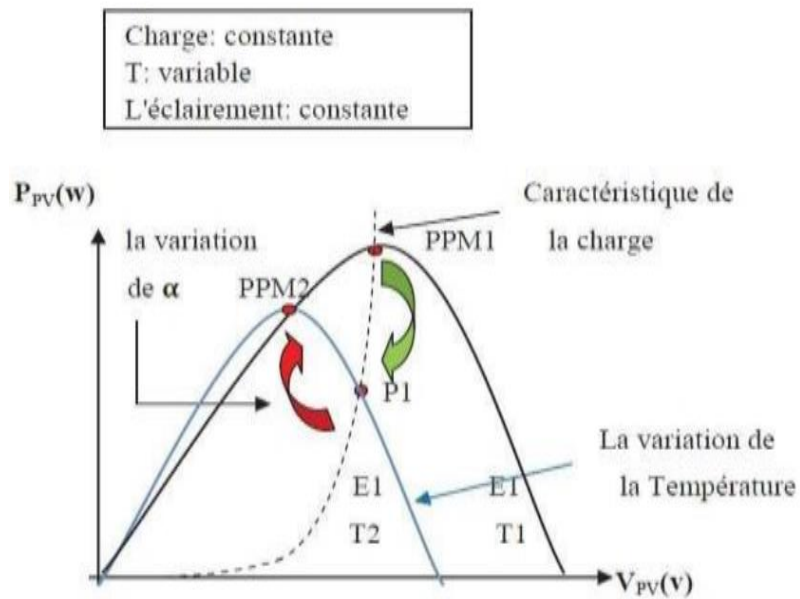


Figure II.11 : Recherche de PPM ; suite d'une variation de température

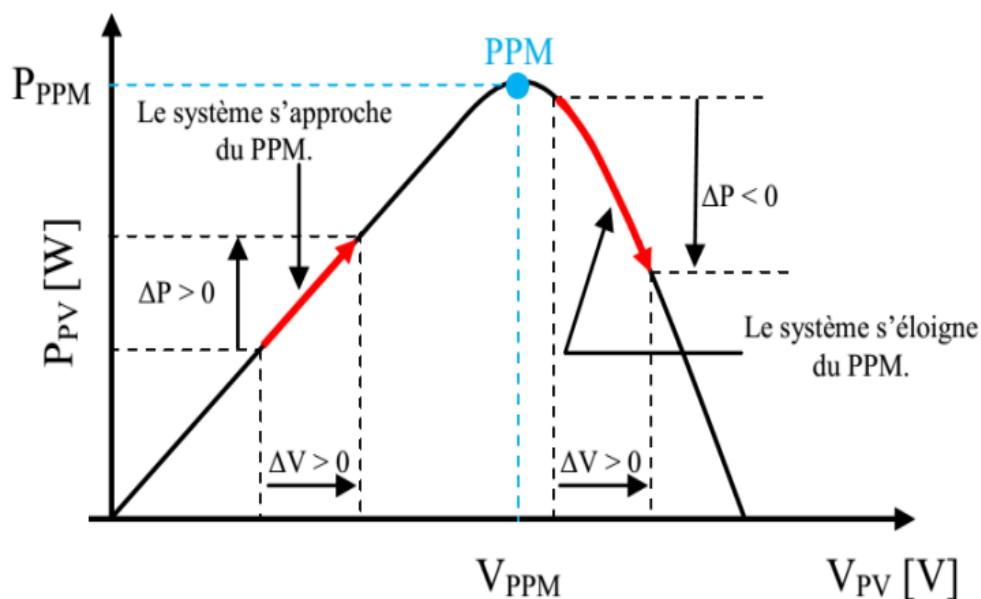
## II-4-2. Méthodes de recherche des points du maximum de puissance (MPPT) :

Diverses méthodes existent dans la littérature pour extraire le PPM : méthode de perturbation et observation P&O, méthode d'incrémentation de la conductance, méthodes à contre réaction de tension, Hill-Climbing, méthodes basées sur l'intelligence artificiel et autre. Dans cette étude, deux techniques seront abordées.

- Méthode de perturbation et observation P&O
- Méthode d'incrémentation de la conductance

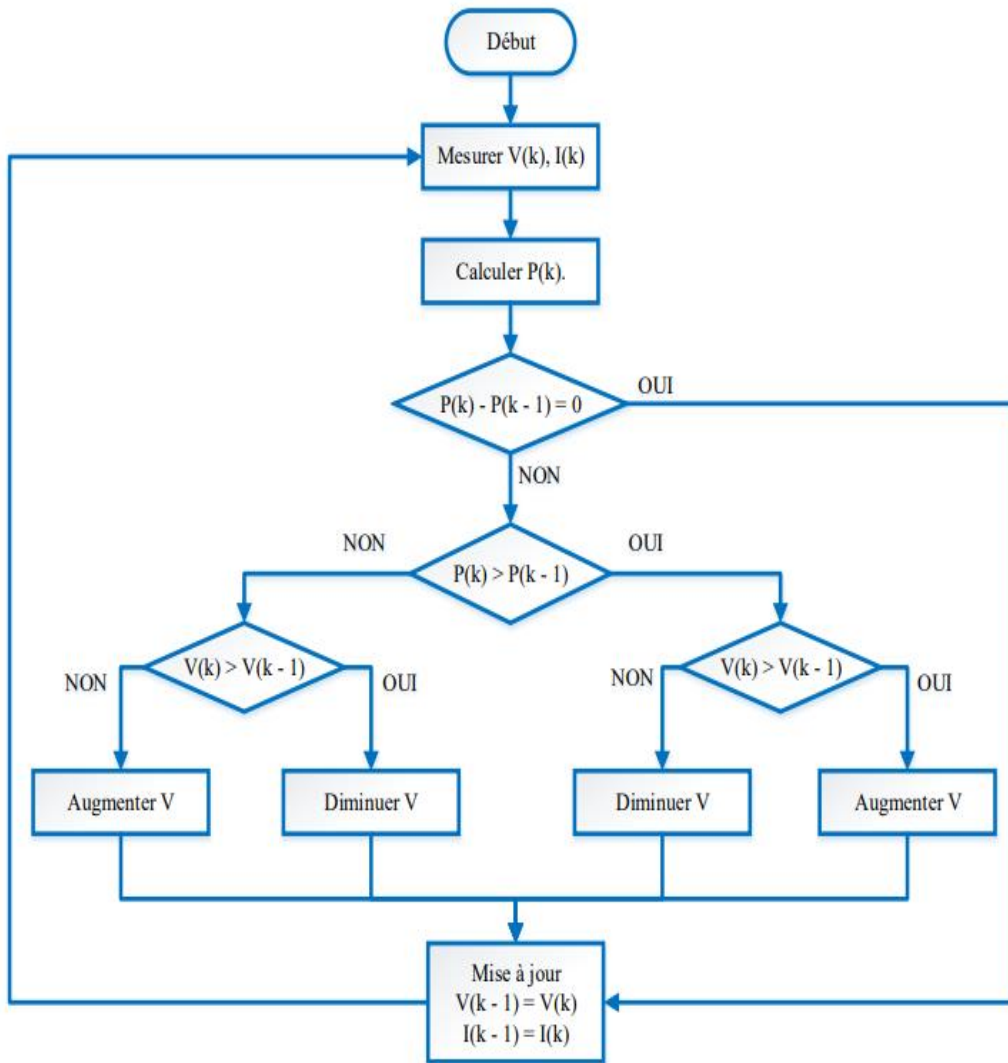
### II-4-2-1. Méthode de perturbation et observation (P&O) :

La commande perturbation et observation simple et très utilisée, consiste à perturber la tension en observant l'impact sur la puissance à la sortie de GPV afin de déplacer le point de fonctionnement vers le PPM. Le principe de cette méthode est qu'à partir d'un rapport cyclique initialement petit, résumé dans la figure II.12, on mesure  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  et on calcule  $P(k)$ . La valeur obtenue est comparée avec la valeur  $P(k-1)$  calculée au cycle précédent, et selon le résultat de comparaison,  $V_{pv}$  est ajustée soit dans le même sens que dans le cycle précédent soit dans une direction opposée. Ainsi, la puissance va augmenter, repasser par le maximum, puis diminuer et dès la détection d'une diminution de la puissance, le sens de la commande est à nouveau inversé, ...etc. Cependant, l'oscillation du système autour du maximum permet de suivre le maximum de puissance [14].



**Figure II.12** : Principe de fonctionnement de la méthode P&O

L'organigramme de l'algorithme P&O est comme suit :



**Figure II.13** : Organigramme de l'algorithme P&O

#### II-4-2-2. Méthode incrémentation de la conductance (INC-CONDUCTANCE) :

Le principe de cette technique est basé sur la connaissance de la valeur de rapport de conductance  $G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}}$  et sa dérivé  $dG$  pour savoir la position de point de fonctionnement par rapport au PPM

Si l'incrément de conductance ( $dG$ ) est supérieur à l'opposé de la conductance ( $-G$ ), on diminue le rapport cyclique.

Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, (MPP) [15]

On a la conductance :

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (\text{II-22})$$

Donc la variation de la conductance et comme suit :

$$dG = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (\text{II-23})$$

Du point PPM On a le dérivé de la puissance de sortie Ppv par rapport a la tension de sortie du panneau Vpv :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV} \times I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \times V_{PV} \quad (\text{II-24})$$

Si  $I_{PV} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \times V_{PV} = 0$  le point de fonctionnement est sur le PPM.

Si  $I_{PV} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \times V_{PV} > 0$  le point de fonctionnement est à gauche de PPM.

Si  $I_{PV} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \times V_{PV} < 0$  le point de fonctionnement est à droite de PPM.

On trouve la variation du courant par rapport à la tension comme suit :

De l'équation (II-24)

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \times V_{PV} \quad (\text{II-25})$$

On déduit :

$$\text{Si } I_{PV} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \times V_{PV} = 0 \Rightarrow \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$$

le point de fonctionnement est sur le PPM.

$$\text{Si } I_{PV} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \times V_{PV} > 0 \Rightarrow \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$$

Le point de fonctionnement est à gauche de PPM.



Si  $I_{PV} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \times V_{PV} < 0 \Rightarrow \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$

Le point de fonctionnement est à droite du PPM.

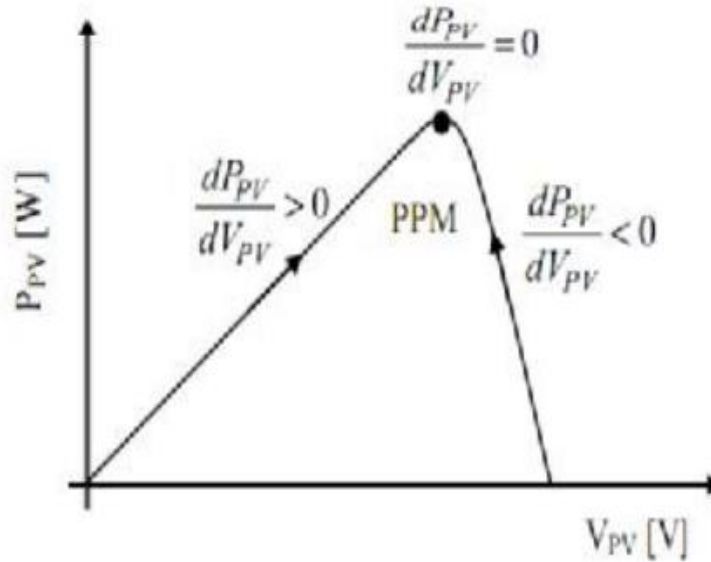


Figure II.14 : Position du point de fonctionnement suivant  $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$

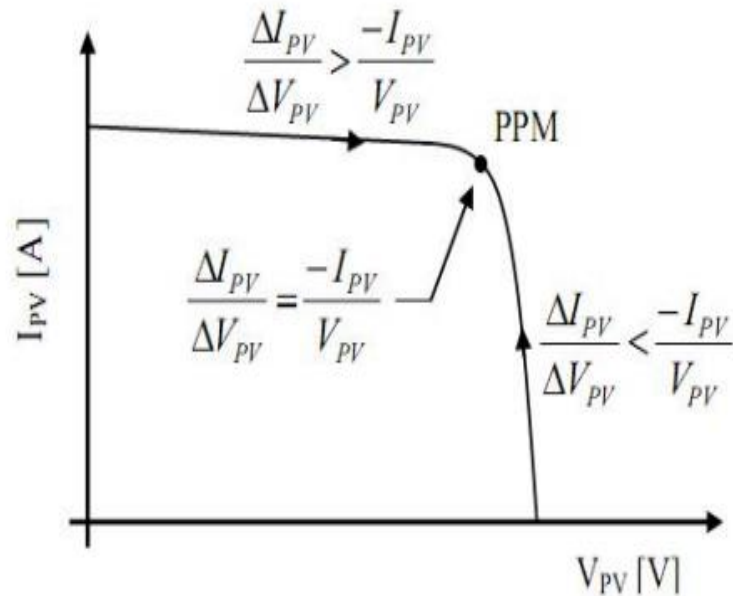


Figure II.15 : Position du point de fonctionnement suivant  $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}$

La figure II.16 illustre l'organigramme de la commande incrémentation de conductance.

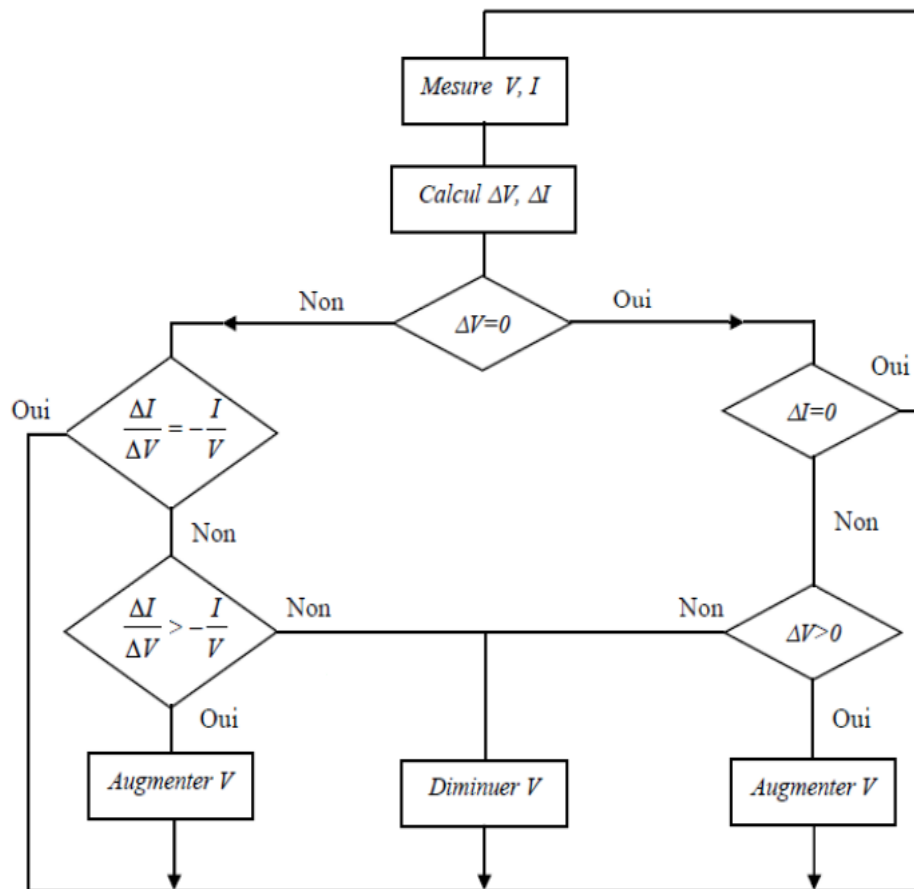


Figure II.16 : Organigramme de l'algorithme d'incrément de conductance

## II-5. Simulation du Système PV :

Une simulation d'un système PV connecté à une charge  $R$  est construite sur l'environnement MATLAB/Simulink. Les caractéristiques du module solaire photovoltaïque **BP Solar SX3190** qui comporte 50 cellules sont présentées dans le tableau I.1, où la puissance maximale générée est d'environ 190W à une tension maximale de 24.30 Volt, dans des conditions standards ( $1000 \text{ W/m}^2$  et  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). La Figure II.17 représente le schéma bloc du système PV étudié. La bibliothèque Simpower-system est utilisée pour construire la partie puissance qui se compose du panneau photovoltaïque, du hacheur Boost ainsi que la charge. La partie contrôle est constituée d'un algorithme MPPT basé sur la commande incrémentation de conductance (INC).

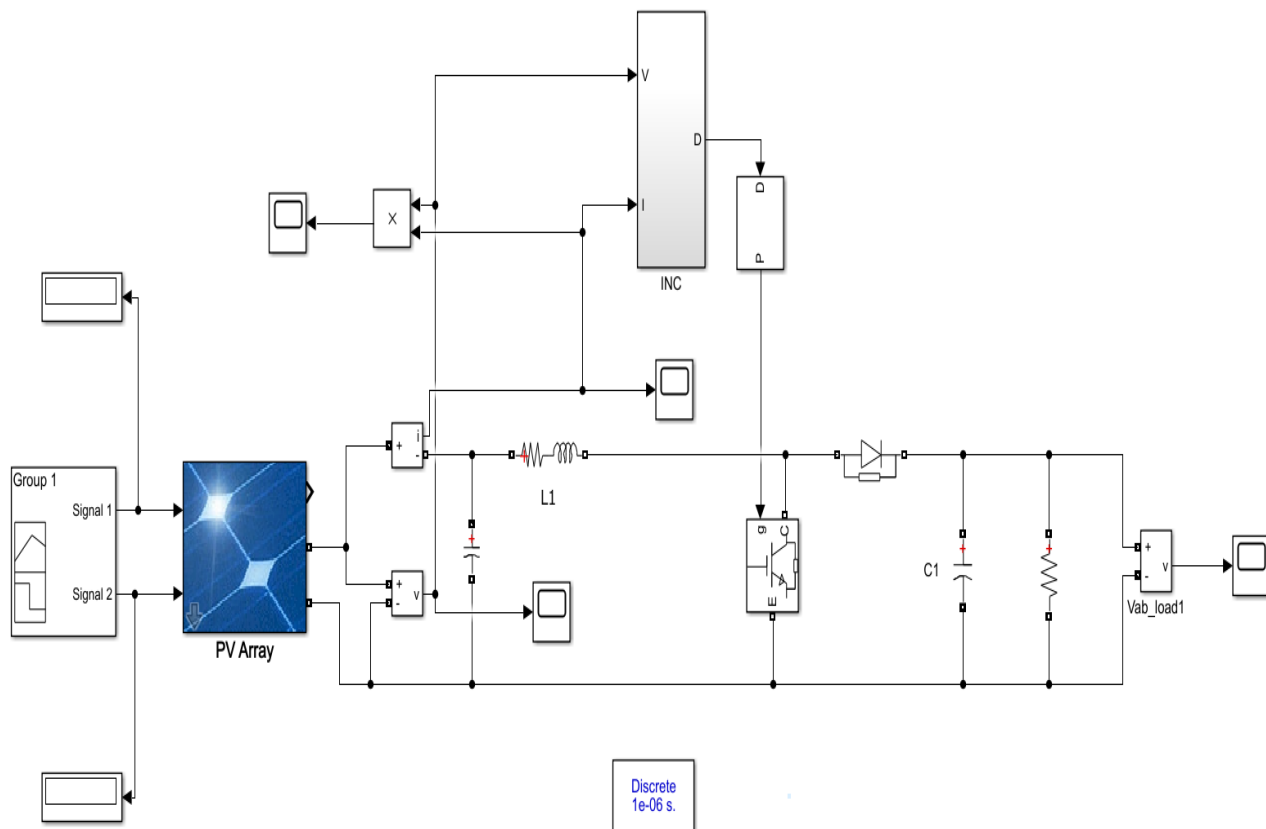


Figure II.17 : Schéma bloc d'un système PV

Le tableau suivant représente les caractéristiques du module photovoltaïque étudié :

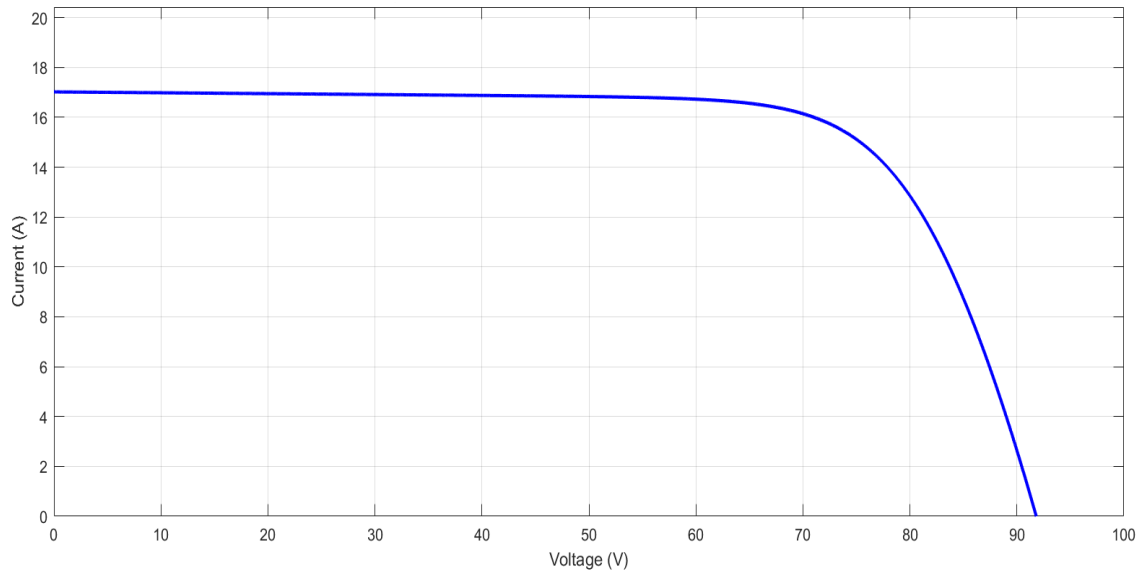
Paramètres	Valeur
<b>Puissance maximale (Pmax)</b>	<b>190 W</b>
<b>Tension de circuit ouvert (Vco)</b>	<b>30.6021 V</b>
<b>Courant de court-circuit (Icc)</b>	<b>8.5103 A</b>
<b>Tension maximale (Vppm)</b>	<b>24.3003 V</b>
<b>Courant maximal (Ippm)</b>	<b>7.8294 A</b>
<b>Coefficient de température au Vco</b>	<b>-0.111 V/deg.C</b>
<b>Coefficient de température au Icc</b>	<b>0.005532 A/deg.C</b>
<b>Coefficient de température au Vppm</b>	<b>-0.114 V/deg.C</b>
<b>Coefficient de température au Ippm</b>	<b>-0.001566 A/deg.C</b>

Tableau II.1 : Caractéristiques du module PV BP Solar SX3190

### II-5-1. Caractéristiques d'un générateur PV :

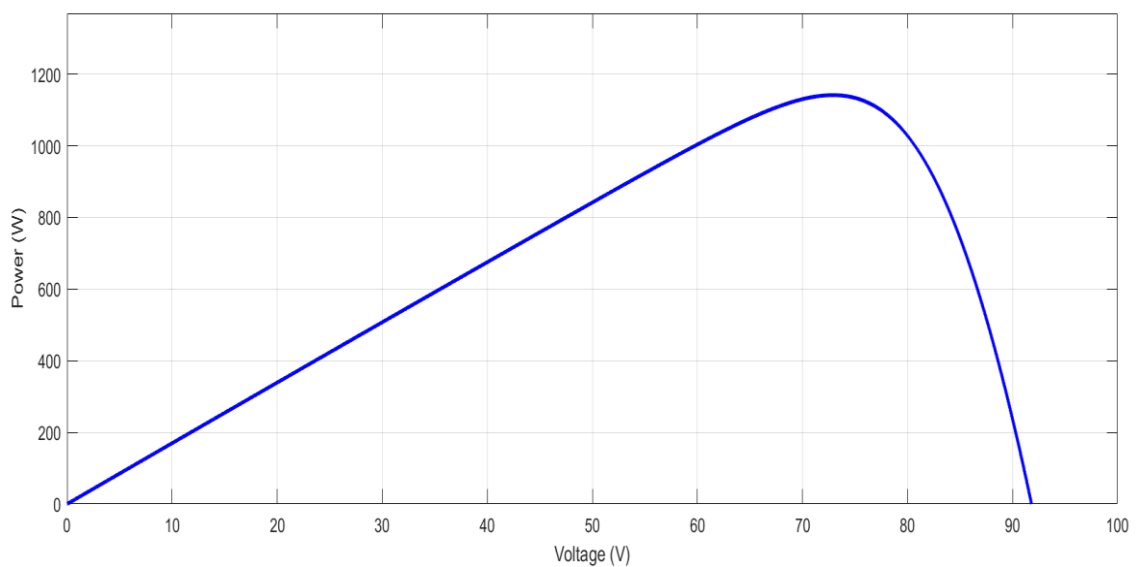
Les courbes caractéristiques I-V et P-V du générateur **BP Solar SX3190** qui contient 3 modules série et 2 strings, simulées dans des conditions standards (1000 W/m<sup>2</sup> et 25 °C) sont représentés dans les figures suivantes :

- La caractéristique  $I = f(V)$  pour T=25°C et G=1000 W/m<sup>2</sup>



**Figure II.18** : Caractéristique  $I = f(V)$  d'un générateur **BP Solar SX3190**

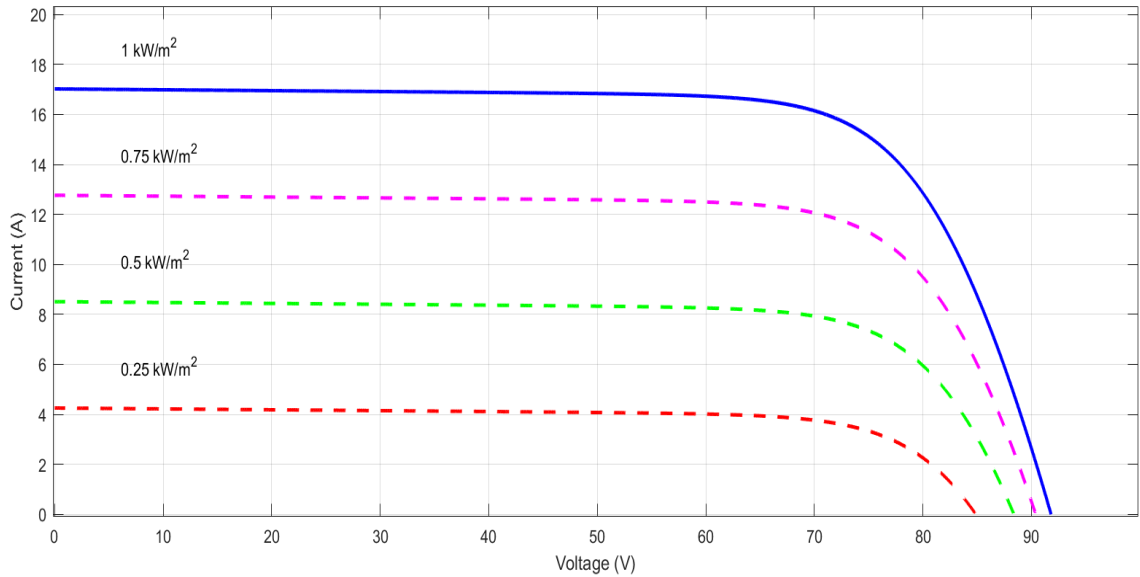
- La caractéristique  $P = f(V)$  pour T=25°C et G=1000 W/m<sup>2</sup>.



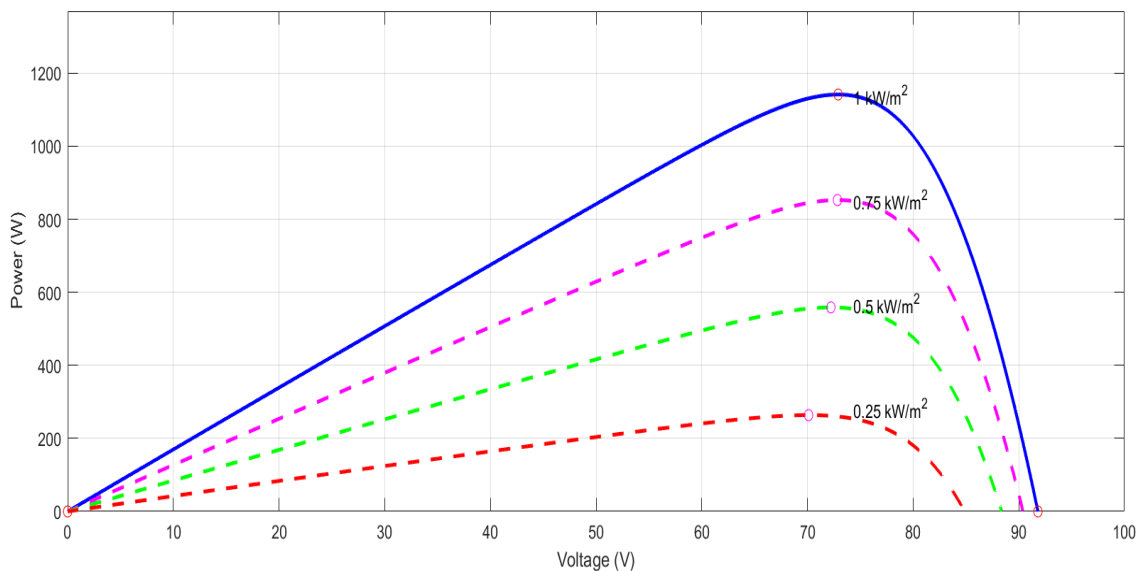
**Figure II.19** : Caractéristique  $P = f(V)$  d'un générateur **BP Solar SX3190**

### II-5-2. Effet de l'éclairement sur les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ :

En fixant la température à  $T=25^{\circ}\text{C}$  et en variant l'éclairement de  $250 \text{ W/m}^2$  à  $1000 \text{ W/m}^2$  avec un pas de  $250 \text{ W/m}^2$ . Les figures (II.20) et (II.21) représentent respectivement les caractéristiques I-V et P-V du générateur PV étudié.



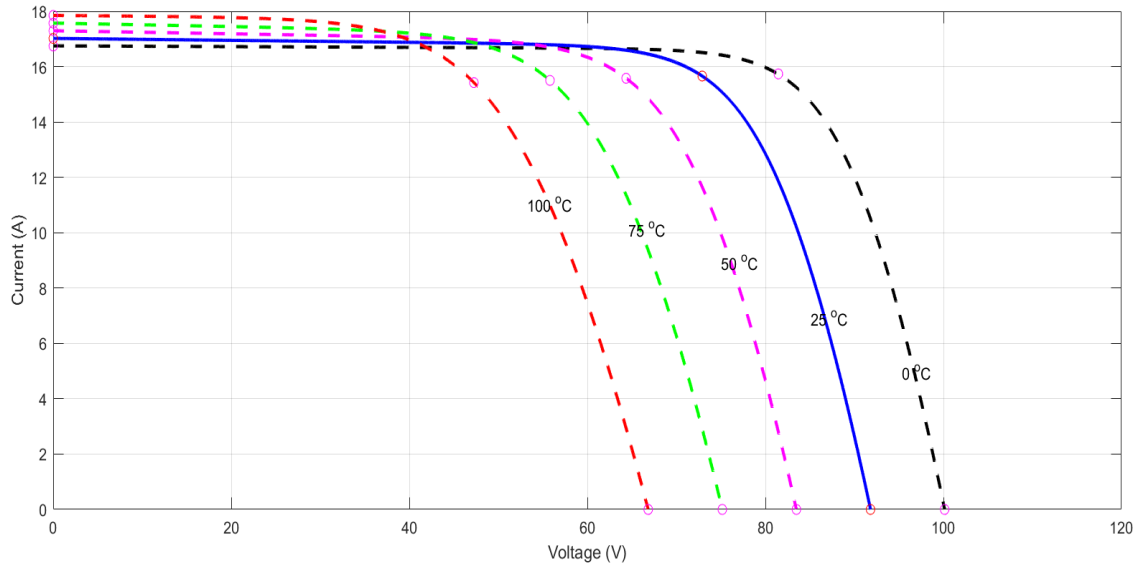
**Figure II.20** : Caractéristique  $I = f(V)$  d'un générateur **BP Solar SX3190** à  $T=25^{\circ}\text{C}$  et éclairement variable



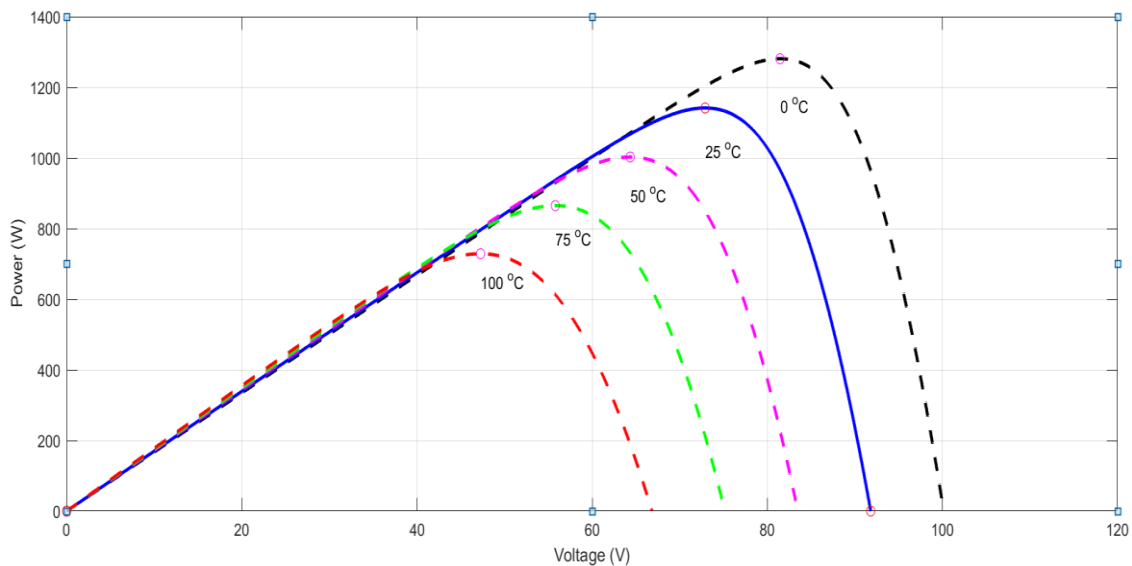
**Figure II.21** : Caractéristique  $P = f(V)$  d'un générateur **BP Solar SX3190** à  $T=25^{\circ}\text{C}$  et éclairement variable

**II-5-3. Effet de la température sur les caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  :**

En fixant l'éclairement à  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et en variant la température de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  avec un pas de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les figures (II.22) et (II.23) représentent respectivement les caractéristiques I-V et P-V du générateur PV étudié.



**Figure II.22 :** Caractéristique  $I = f(V)$  d'un générateur **BP Solar SX3190** à  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et température variable



**Figure II.23 :** Caractéristique  $P = f(V)$  d'un générateur **BP Solar SX3190** à  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et température variable

Sur la figure (II.20) On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. On peut constater que le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. Sur la figure (II.22) On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue (figure (II.23)).

#### II-5.4. Performance du système PV avec un profil variable d'ensoleillement et de température :

En faisant varier l'éclairement et la température suivant le profil ci-dessous :

- [0s, 0.4s] →  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- [0.4s, 0.8s] →  $G=800 \text{ W/m}^2$  et  $T=35 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- [0.8s, 1.2s] →  $G=500 \text{ W/m}^2$  et  $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

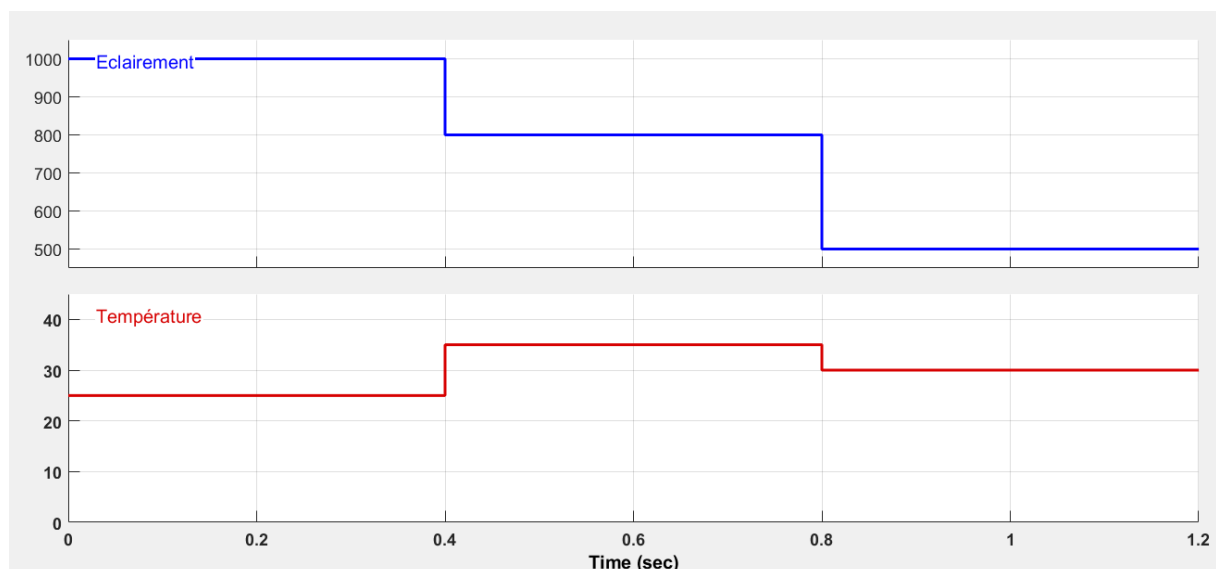
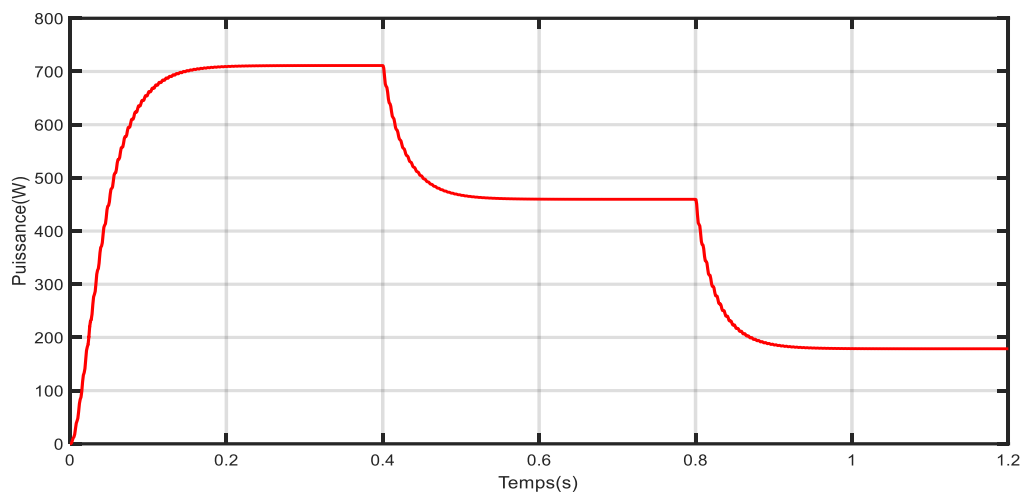
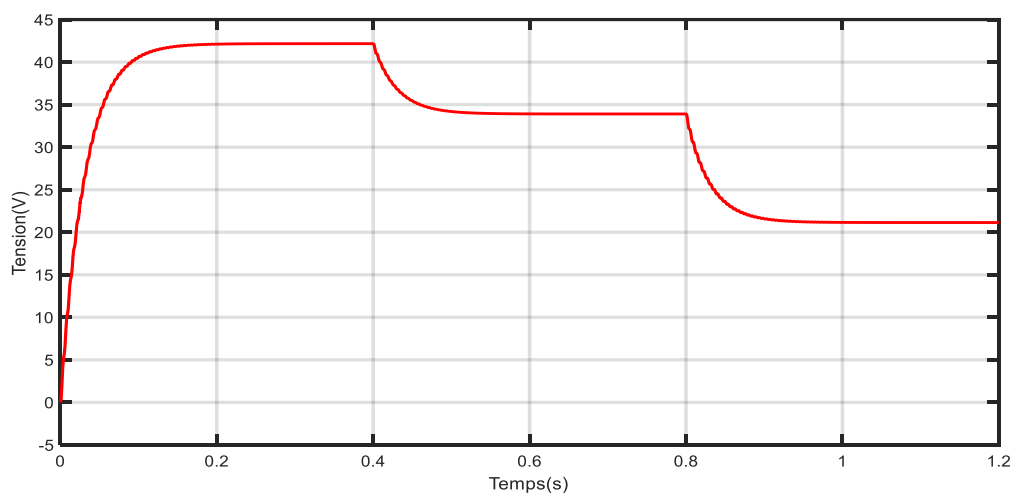


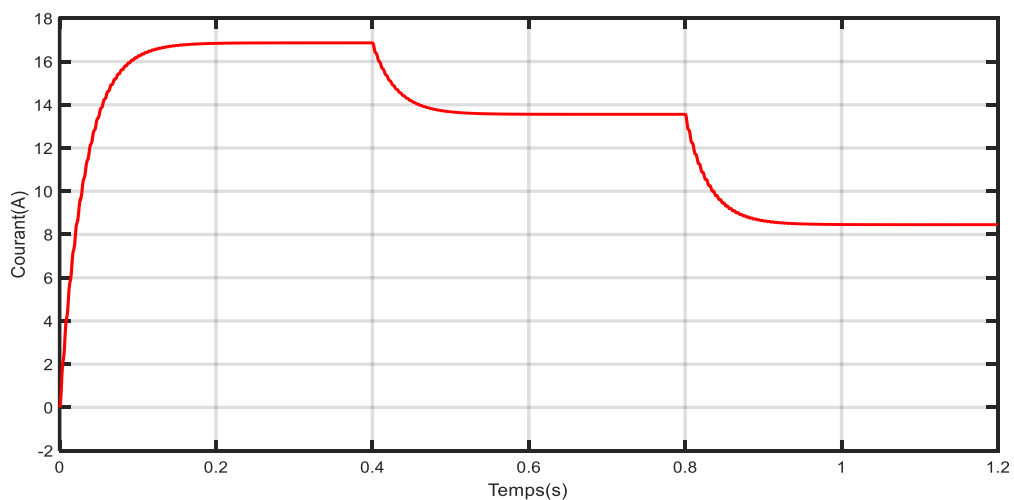
Figure II.24 : Profil d'éclairement et de température utilisé.



(a)



(b)



(c)

**Figure II.25 :** Performances de l'algorithme INC, (a) : Puissance de sortie du hacheur, (b) Tension de sortie du hacheur, (c) Courant de sortie du hacheur.



Les performances du système soumis à un changement soudain de l'irradiation solaire incidente sont présentées sur la Figure II.25. Comme il peut être expliqué que l'éclairement diminue, un nouveau MPP de fonctionnement est généré avec une nouvelle tension et un nouveau courant. (La tension au point MPP est légèrement inférieure à la tension MPP à l'état nominal et avec une diminution substantielle du courant MPP par rapport à la valeur nominale). Cela diminue finalement la puissance du générateur photovoltaïque.

L'ensemble des résultats obtenus montre que le hacheur Boost et la commande MPPT avec l'algorithme incrémentation de la conductance accomplissent correctement leurs rôles. Le hacheur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le champ PV. La commande MPPT assure le transfert de la puissance maximale fournie par le champ PV à la charge. Après ce point, les différentes grandeurs électriques (puissance, tensions et courants) se stabilisent autour des valeurs optimales fixées par les conditions standards de l'ensoleillement et de température.

Le tableau II.2 résume les valeurs des performances de l'algorithme INC (puissance, tension et courant de sortie du hacheur) aux différents régimes permanents sous les variations de l'éclairement et de la température.

<b>Intervalle de variation de E (W/m<sup>2</sup>) et T (°C)</b>	<b>Puissance (watts)</b>	<b>Tension (volts)</b>	<b>Courant (Ampères)</b>
[0s, 0.4s] → G=1000 W/m <sup>2</sup> et T=25 °C.	711.1	42.16	16.87
]0.4s, 0.8s] → G=800 W/m <sup>2</sup> et T=35 °C	459.8	33.9	13.56
]0.8s, 1.2s] → G=500 W/m <sup>2</sup> et T=30 °C	178.8	21.14	8.458

**Tableau II.2** : Suivi des performances de l'algorithme INC

## II-6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté dans un premier temps le modèle d'une cellule photovoltaïque ainsi que le modèle du convertisseur DC-DC Boost employé comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et faire fonctionner le générateur GPV à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking). Par la suite, nous avons présenté deux méthodes de suivi de

la puissance maximale et nous avons retenu l'algorithme d'accroissement de la conductibilité INC-MPPT qui se caractérise par un rendement supérieur relativement à l'algorithme Perturb and Observe « P&O ». À la fin de ce chapitre nous avons pu montrer les performances d'un système photovoltaïque par simulation numérique.

### III. Introduction :

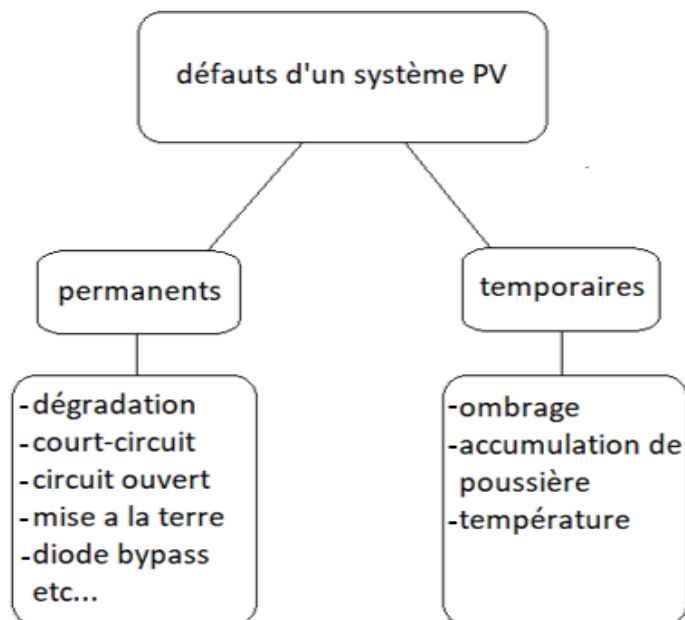
Le générateur PV est généralement soumis à une variété de défauts, notamment des conditions d'ombrage partiel, une défaillance de l'unité de suivi du point de puissance maximale (MPPT), des points chauds/microfissures du module PV et des défauts électriques tels que le circuit ouvert (OC), court-circuit (CC), ligne-à ligne (LL), ligne à terre (LG) et défaut d'arc. Ces défauts contribuent aux pertes d'énergie et/ou à la dégradation du système.

L'objectif principal de ce chapitre est de simuler les performances d'un système PV sous différents types de défauts temporaires et permanents, et dans des conditions météorologiques différentes.

#### III-1. 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...).



**Figure III.1** : Différents types des défauts d'un système PV

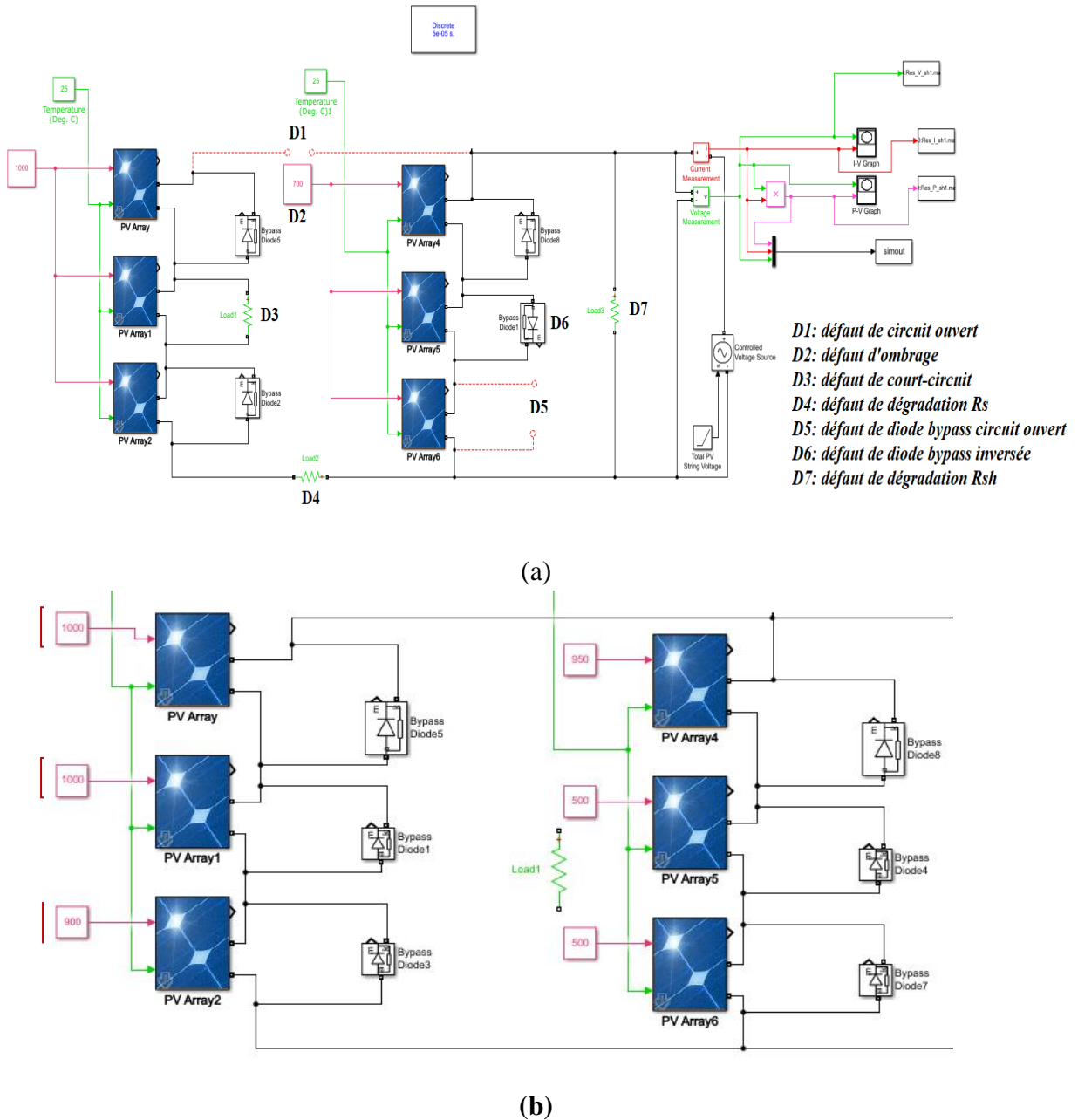
Les différents défauts que nous pouvons trouver dans un système PV sont représentés dans le tableau III.1: [16]

Composant	Défaut
<b>Générateur PV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feuilles d'arbre, déjections, pollution, sable, neige etc.</li> <li>• Détérioration des cellules, fissure, échauffement des cellules</li> <li>• Pénétration de l'humidité, dégradation des interconnexions,</li> <li>• Corrosion des liaisons entre les cellules</li> <li>• Modules de performances différentes</li> <li>• Module arraché ou cassé</li> <li>• Modules court-circuités, modules inversés</li> </ul>
<b>Boite de jonction</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rupture du circuit électrique</li> <li>• Court-circuit du circuit électrique</li> <li>• Destruction de la liaison</li> <li>• Corrosion des connexions</li> </ul>
<b>Câblage et connecteur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circuit ouvert</li> <li>• Court-circuit</li> <li>• Mauvais câblage (module inversé)</li> <li>• Corrosion des contacts</li> <li>• Rupture du circuit électrique</li> </ul>
<b>Protection (Diode by-pass et diode anti-retour)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destruction des diodes.</li> <li>• Absence ou non fonctionnement de diodes</li> <li>• Inversion de la polarité des diodes au montage</li> </ul>

**Tableau III.1** : Défauts du générateur photovoltaïque

Étant donné que la méthode de diagnostic et d'identification des défauts d'une installation photovoltaïque est généralement basée sur l'analyse des caractéristiques I-V et P-V, nous analysons ici les défauts bien connus (court-circuit, ombrage partiel, circuit ouvert, et dégradation des deux résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_{sh}$ ) qui peuvent apparaître du côté DC d'un champ photovoltaïque et leur impact sur les caractéristiques. Ces différents défauts

temporaires et permanents analysés sous l'environnement Matlab/Simulink sont représentés sur le schéma de la Figure III.2.



**Figure III.2 :** Schéma de simulation des défauts du générateur PV sous Matlab/simulink, (a) : défauts temporaires et permanents, (b) : défauts d'ombrage et de diode by-pass

**III-1-1. Défaut d'ombrage :**

L'ombrage est la diminution de l'intensité d'éclairement solaire, il existe deux types d'ombrage :

- Ombrage dur : qui se produit si les panneaux PV sont ombragés par un matériau solide par exemple bâtiment ou poussière, qui entraîne une baisse de tension (Figure III.3).
- Ombrage doux (léger) : qui peut être causé par les nuages, qui affecte le courant mais non pas la tension [17].

Les deux influent négativement sur les performances du module PV. En effet, les cellules ombrées se comportent comme une résistance au courant généré. Elles chauffent et le phénomène de hot spot se produit [18].




Défauts	Images descriptives
Ombrage	
Poussière	
Déjection d'oiseau	
Neige	
Mauvaise installation	

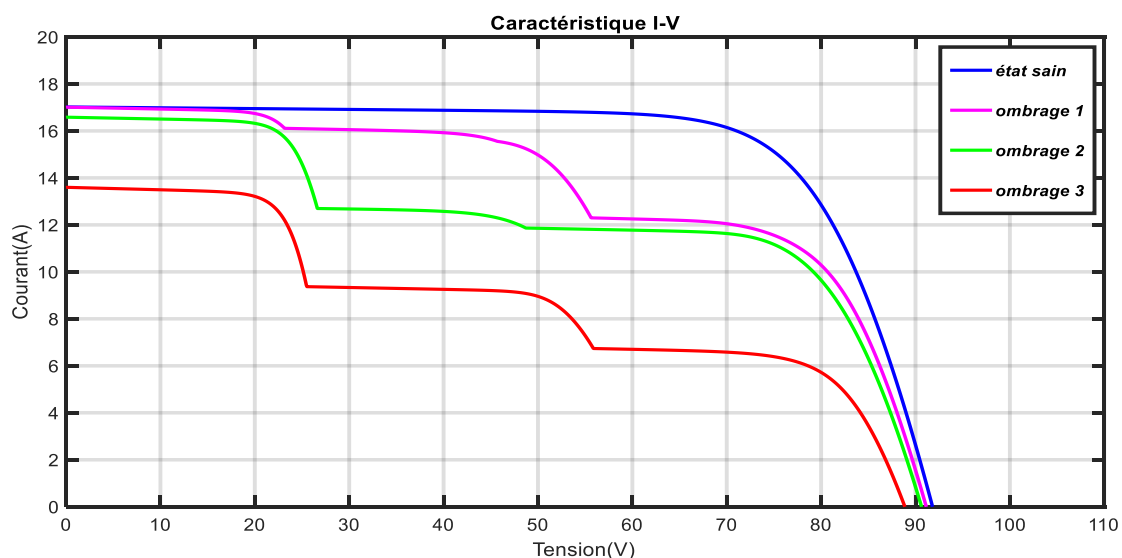
Tableau III.2 : Exemples de défauts d'ombrage

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 III.3 :

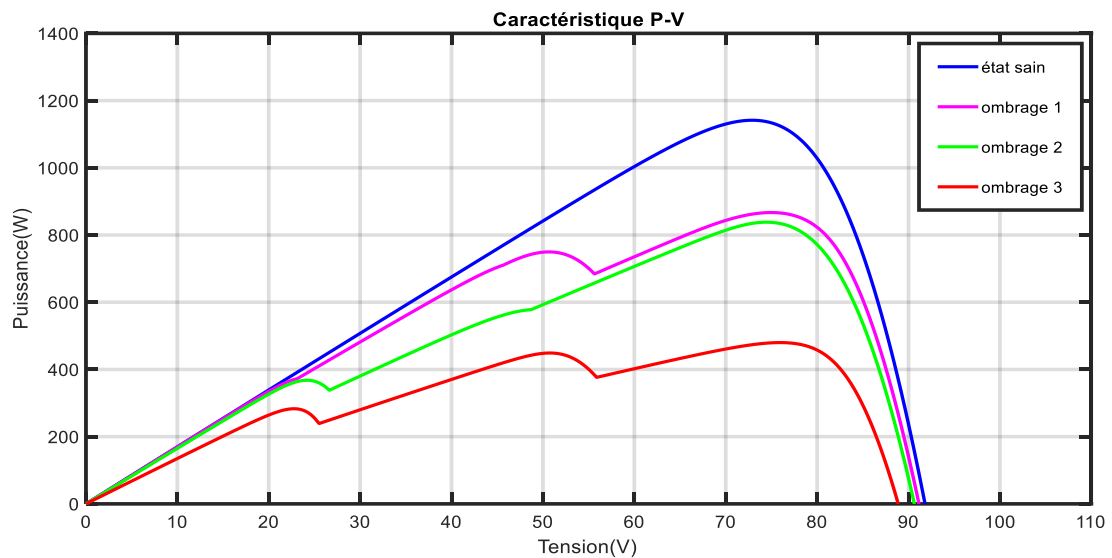
Conditions de fonctionnement	E1 (W/m <sup>2</sup> )	E2 (W/m <sup>2</sup> )	E3 (W/m <sup>2</sup> )	E4 (W/m <sup>2</sup> )	E5 (W/m <sup>2</sup> )	E6 (W/m <sup>2</sup> )
Ombrage 1	1000	1000	900	950	500	500
Ombrage 2	1000	1000	950	1000	900	500
Ombrage 3	1000	700	400	600	400	400

**Tableau III.3** : Cas de défauts d'ombrage simulés

La figure III.3 montre une distorsion de la caractéristique I–V due à un ombrage partiel. La caractéristique P-V (Figure III.4) montre l'apparition de plusieurs pics : cela est dû à la conduction des diodes de dérivation, qui sont connectées en parallèle pour éviter la défaillance du point chaud ou pour protéger le module PV. Mais la disposition de la diode de dérivation peut avoir un effet sur l'ombrage partiel. Lorsque la diode de dérivation est activée sous l'effet d'un ombrage partiel, il y a une chute de tension qui réduit la puissance générée. Il est important de noter que la diode de dérivation ne s'active qu'au-dessus d'une certaine intensité de polarisation inverse. L'impact principal sur la caractéristique est la modification de la pente : ce qui entraînera une modification des résistances série et parallèle.



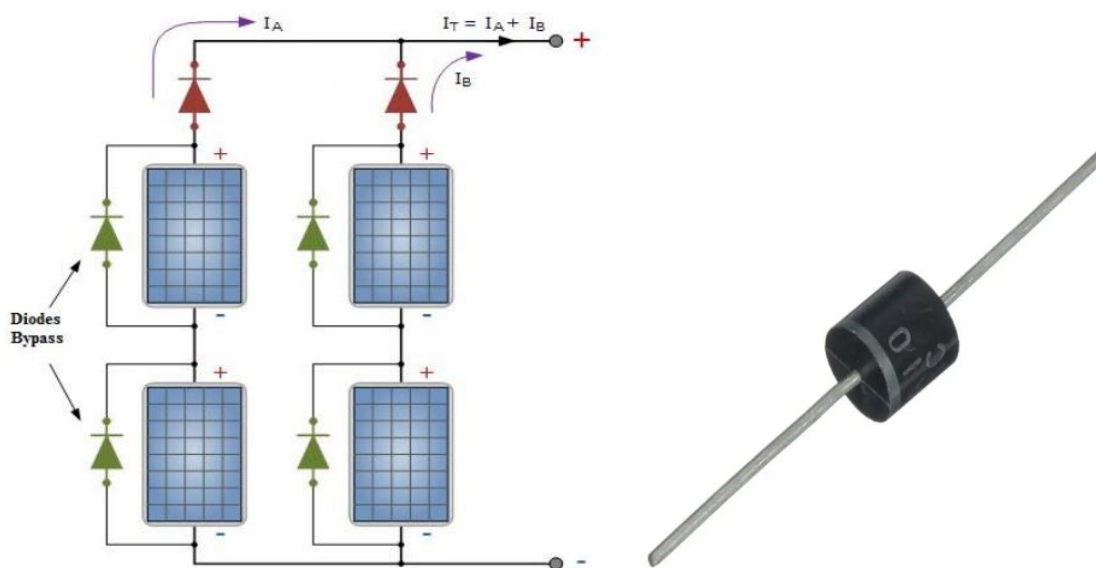
**Figure III.3** : Caractéristique P-V pour différents % d'ombrage



**Figure III.4 :** Caractéristique I-V pour différents % d'ombrage

### III-1-2. Défauts de diode by-pass :

La diode en fonctionnement normale est passante si la tension des cellules protégées par elle-même est négative, et elle bloquée dans le cas contraire, mais lorsque la diode est en état de défaillance, elle ne protège plus les cellules (Figure III.5). Elle peut subir durant son fonctionnement à plusieurs défauts comme le cas d'un court-circuit, d'un circuit ouvert ou d'une inversion de polarisation dans le cas de montage.

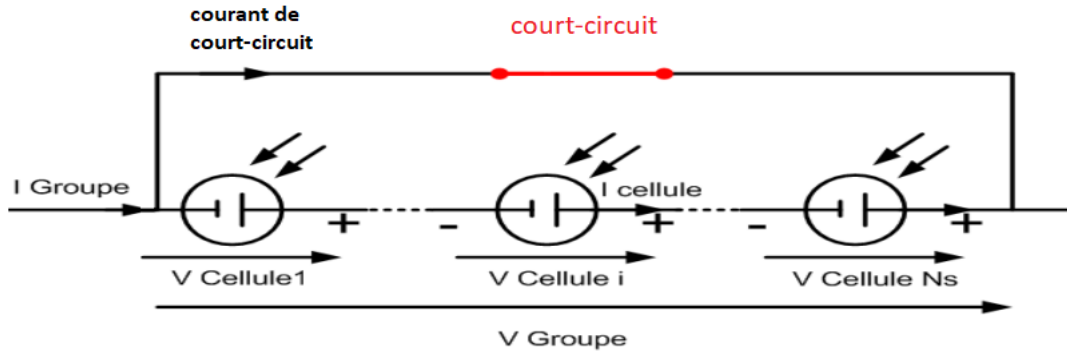


**Figure III.5:** Diode by-pass dans un générateur PV



**III-1-2-1. Diode by-pass court-circuitée:**

En cas de court-circuit la diode joue le rôle d'un fils conducteur, ou la tension de groupe des cellules est nulle (Figure III.6), et le courant de groupe est égal à la somme des courants (courant de court-circuit et courant de cellule).

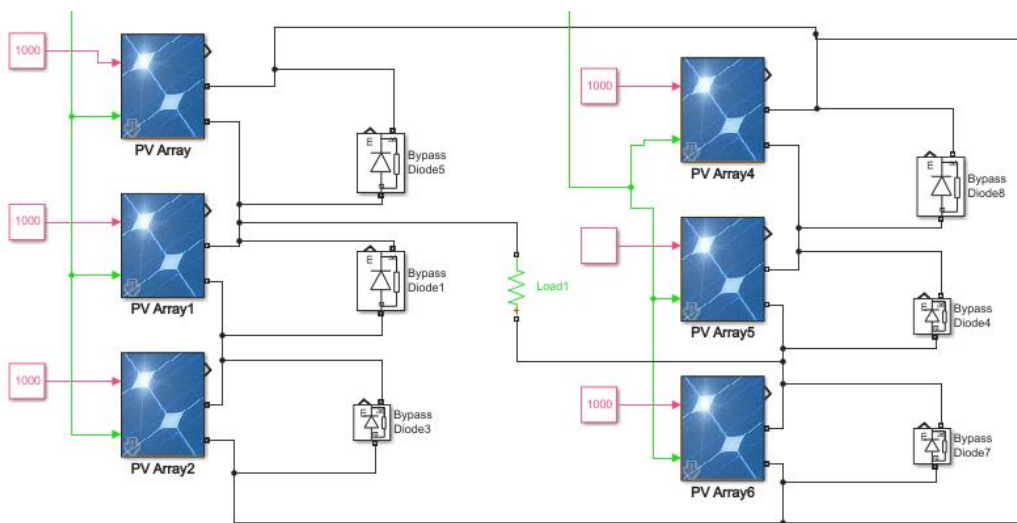


**Figure III.6 :** Groupe des cellules PV avec diode by-pass court-circuitée

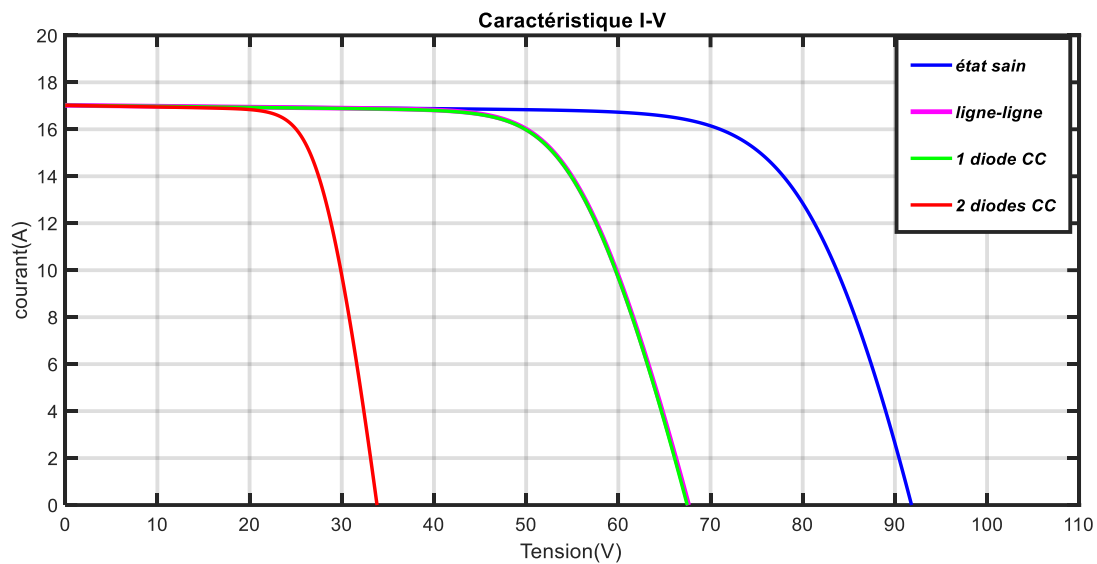
$$V_{groupe} = 0 \tag{III-1}$$

$$I_{groupe} = I_{cellule} + I_{court-circuit} \tag{III-2}$$

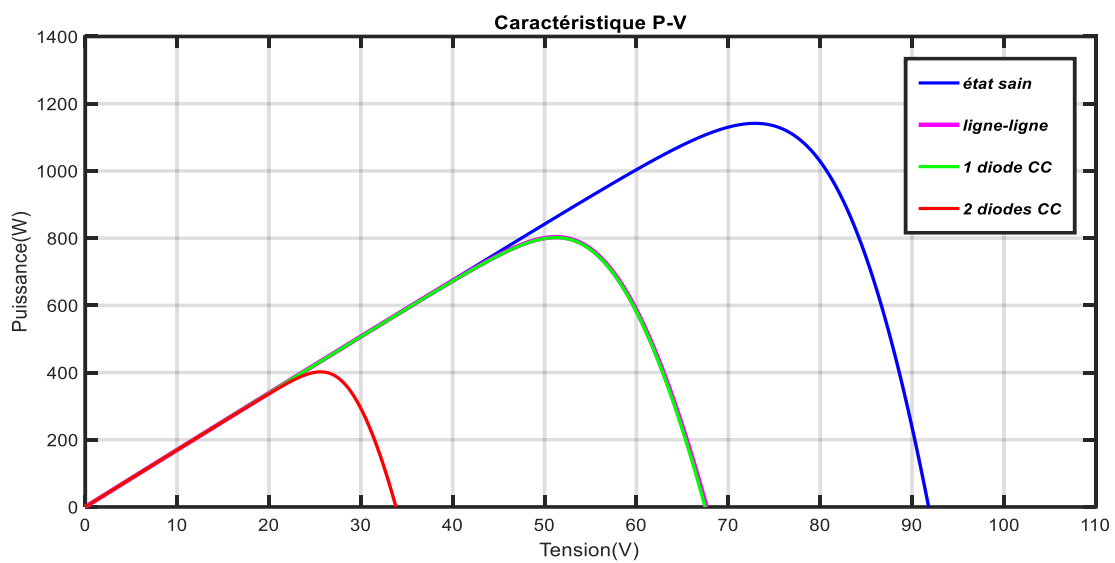
L'effet de court-circuit est simulé en plaçant des résistances avec des valeurs faibles avec les modules correspondants, comme indiqué sur la figure III.7. Trois cas de simulation des défauts de court-circuit ont été analysés : le premier cas est un défaut de CC ligne-ligne, dans le deuxième cas la diode by-pass DP2 est court-circuitée et dans le troisième cas les deux diodes by-pass DP2 et DP3 sont court-circuitées (Figure III. 2b).



**Figure III.7 :** Schéma de simulation d'un défaut de court-circuit L-L



**Figure III.8 :** Caractéristique I-V avec défauts de court-circuit.

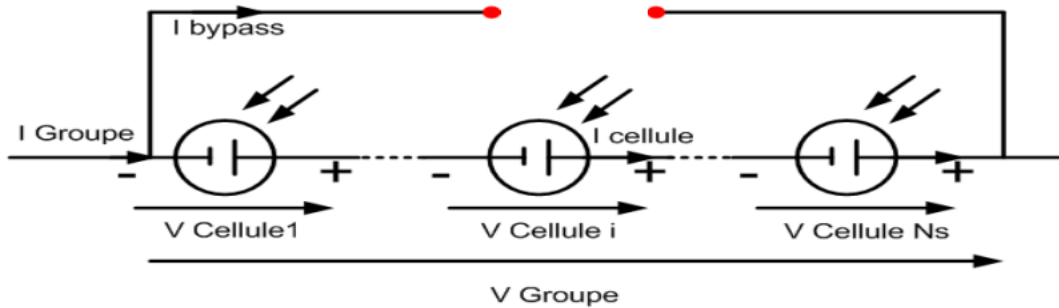


**Figure III.9:** Caractéristique P-V avec défauts de court-circuit.

Les courbes des caractéristiques courant-tension et puissance-tension (Figure III.8 et Figure III.9), montrent que le court-circuit diminue la tension en circuit ouvert et la puissance maximale du générateur photovoltaïque, tandis que le courant de court-circuit reste inchangé. Il est clair d'après ces résultats de simulation que les courbes des défauts de CC ligne-ligne et une diode by-pass court-circuitée sont identiques.

### III-1-2-2. Diode by-pass en circuit ouvert :

En cas d'un circuit ouvert, la tension de groupe est la somme des tensions des cellules, et le courant de groupe est égal au courant de cellule.

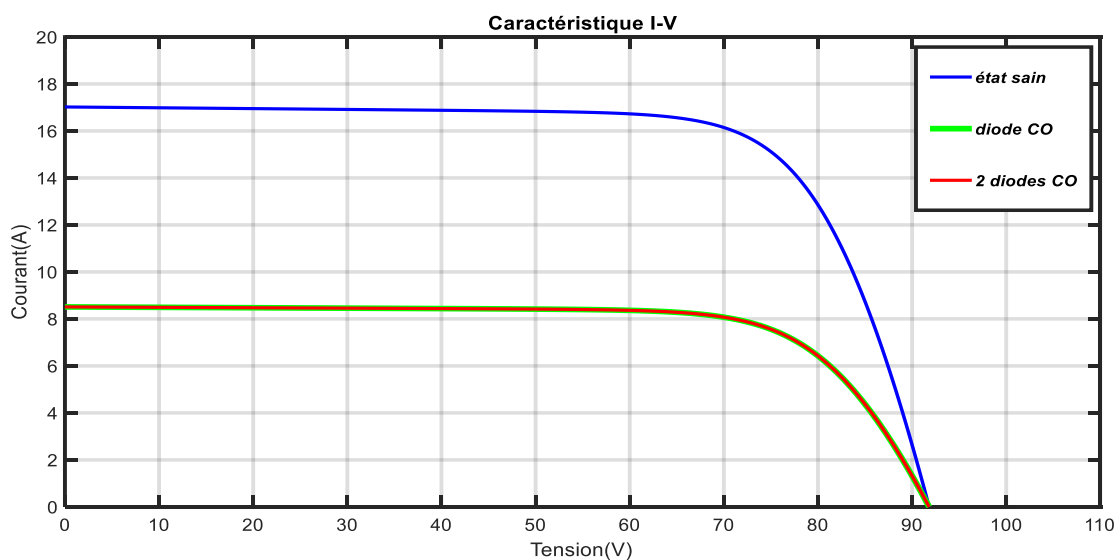


**Figure III.10:** groupe des cellules PV avec diode by-pass en circuit ouvert

$$V_{groupe} = \sum_{i=1}^{Ns} V_{cellule} \quad (\text{III-4})$$

$$I_{groupe} = I_{cellule} \quad (\text{III-5})$$

Le circuit ouvert est simulé en plaçant des résistances importantes comme le montre la figure III. 2a. Pour simuler le circuit ouvert, la résistance est configurée avec une valeur de résistance élevée ( $R = 100\,000\ \Omega$ ) qui déconnecte complètement la chaîne du générateur photovoltaïque. Les courbes des figures III. 11 et figure III.12 illustrent l'effet du circuit ouvert sur les caractéristiques I-V et P-V.



**Figure III.11 :** Caractéristique I-V avec diode by-pass en circuit ouvert

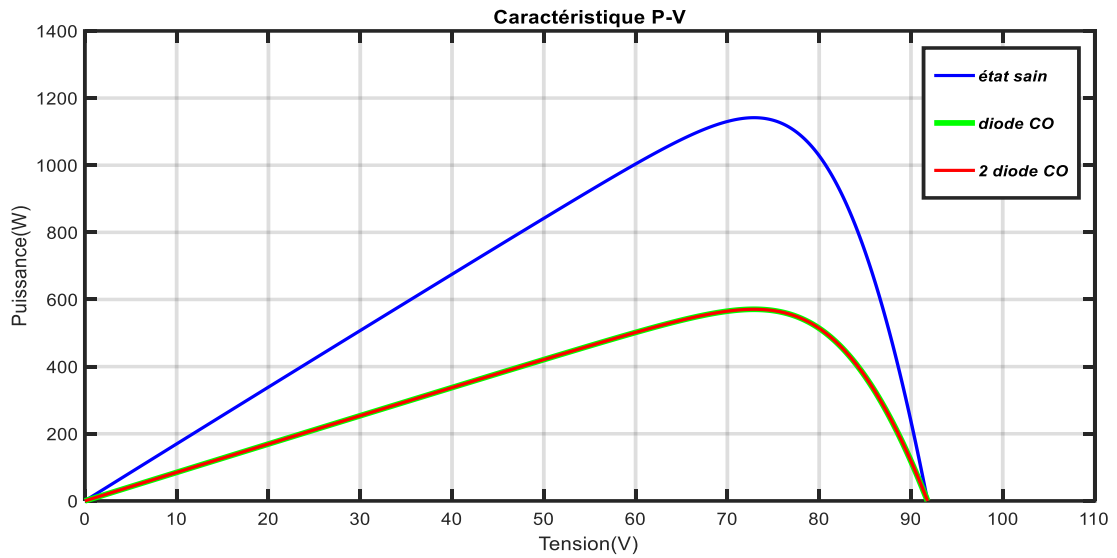


Figure III.12 : Caractéristique P-V avec de diode by-pass en circuit ouvert

Il est évident que le circuit ouvert diminue considérablement la puissance de sortie et le courant de court-circuit. Cependant, il n'y a qu'un léger changement dans la pente caractéristique courant-tension tandis que la tension en circuit ouvert reste inchangée.

III-1-2-3. Cas de diode by-pass inversée :

La diode dans ce cas est conductrice seulement si la valeur de sa tension de protection des cellules est positive.

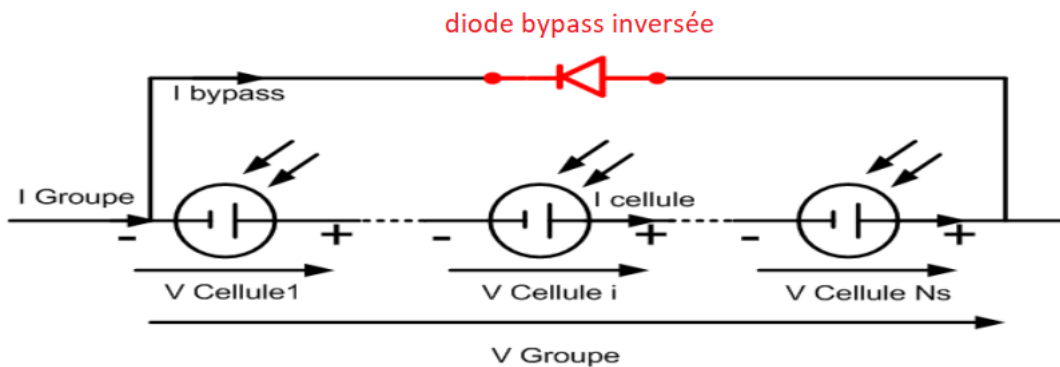


Figure III.13 : groupe des cellules avec diode bypass inversée

$$I_{groupe} = I_{cellule} \tag{III-6}$$

$$V_{groupe} = \sum_{i=1}^{Ns} V_{cellule} = V_{diode-bypass-inverse} \tag{III-7}$$

Trois cas de simulation des défauts de la diode by-pass inversée ont été analysés : le premier cas est le défaut de DP3 inversée, dans le deuxième cas les deux diodes by-pass DP2 et DP5 sont inversées et le dernier cas c'est les diodes by-pass DP2, DP4 DP6 qui ont été inversées (Figure III. 2b).

Les résultats de simulation obtenus sont illustrés dans les figures (III. 14 III. 15) qui représentent les caractéristique I-V et P-V.

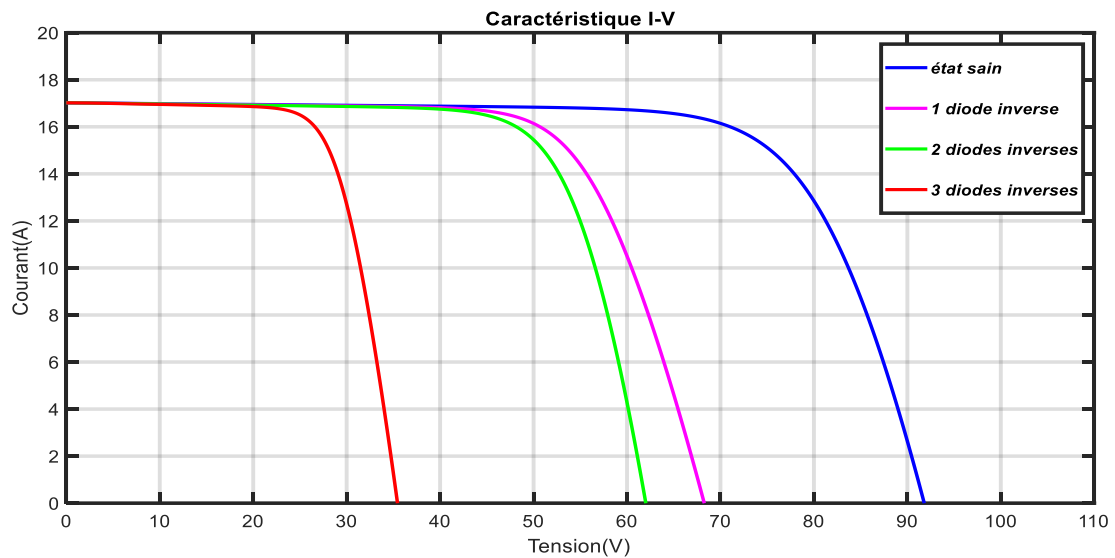


Figure III.14 : Caractéristique I-V avec diode bypass inversée

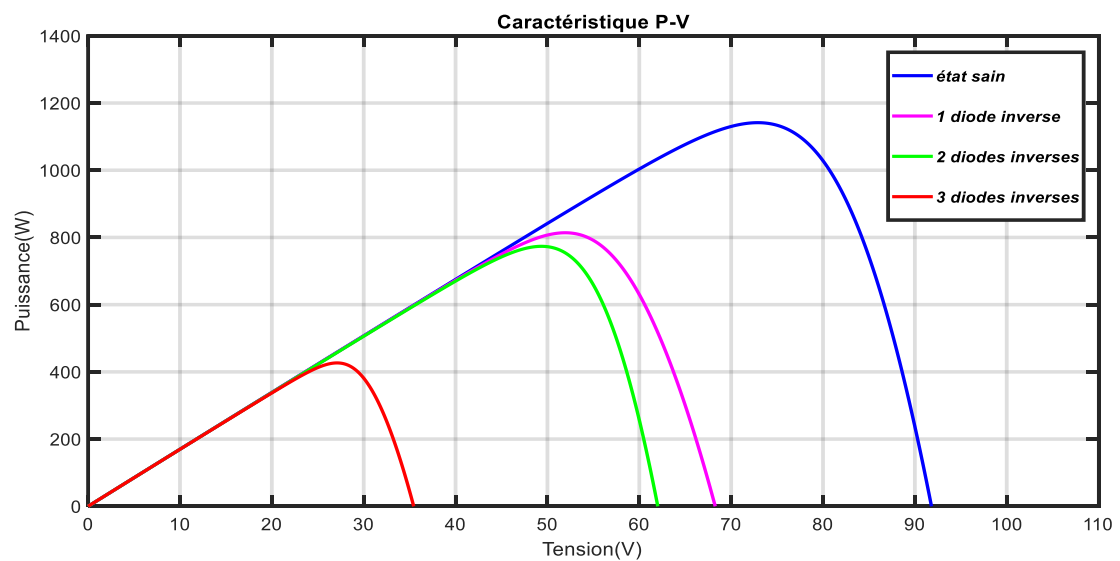


Figure III.15 : Caractéristique P-V avec diode bypass inversée

Il est clair d'après ces figures que le défaut de diode by-pass inversée diminue considérablement la puissance de sortie et la tension en circuit ouvert. Tandis que reste le courant de court-circuit reste inchangé.

### III-1-3. Défaut de dégradation :

#### III-1-3-1. Résistance Série $R_s$ :

La résistance interne des cellules est représentée dans le schéma bloc par une résistance série. Lorsque la valeur de cette résistance augmente, la valeur de tension diminue. Trois valeurs de  $R_s$  ont donc été utilisées pour obtenir différents niveaux de dégradation.

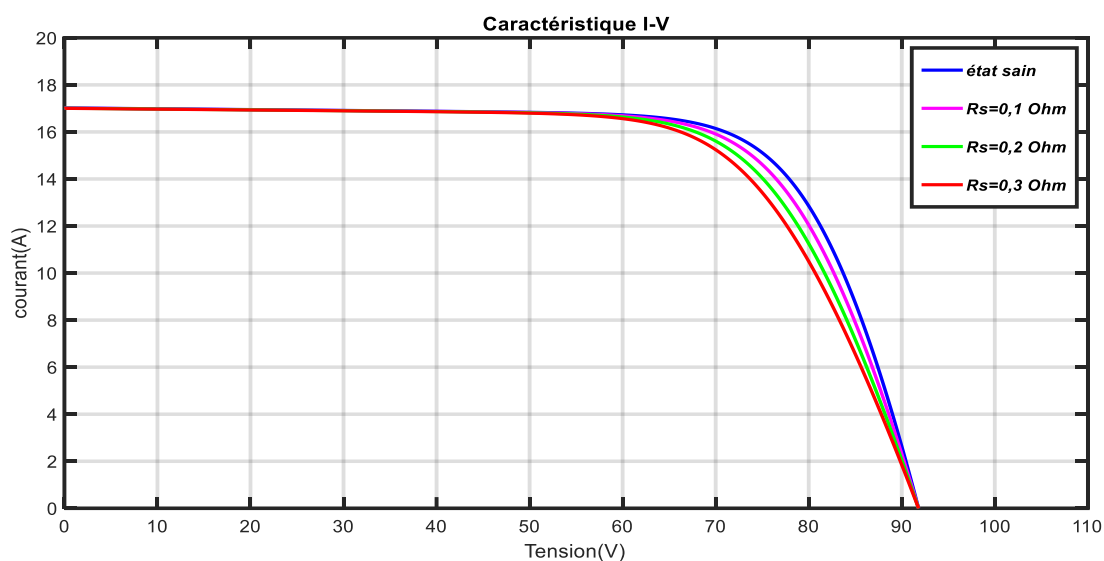


Figure III.16 : Caractéristique I-V avec augmentation de la résistance série  $R_s$

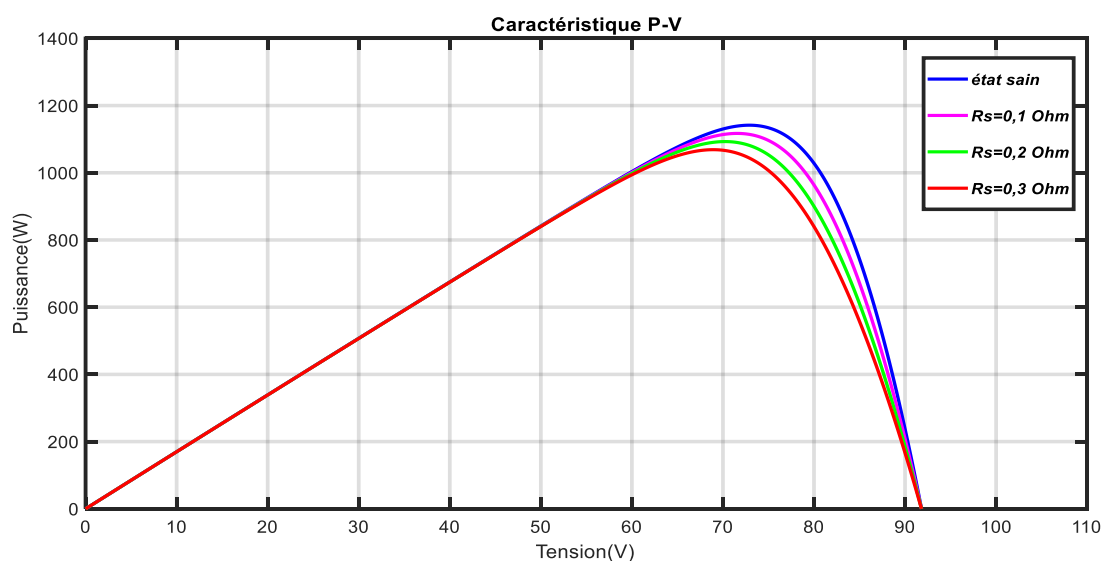


Figure III.17: Caractéristique P-V avec augmentation de la résistance série  $R_s$

Comme le montrent les figures (III.16) et (III.17), la dégradation de la résistance série modifie considérablement la pente caractéristique I-V et diminue la puissance de sortie du générateur PV.

### III-1-3-2. Résistance parallèle Rsh :

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte la fuite qui se produit forcément entre les bornes opposées d'une photopile [19]. La diminution de cette résistance diminue la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , donc diminution de la puissance maximale du panneau. Trois valeurs de Rsh ont donc été utilisées pour obtenir différents niveaux de dégradation. Les figures (III.18 et III.19) illustrent les caractéristiques I-V et P-V du GPV.

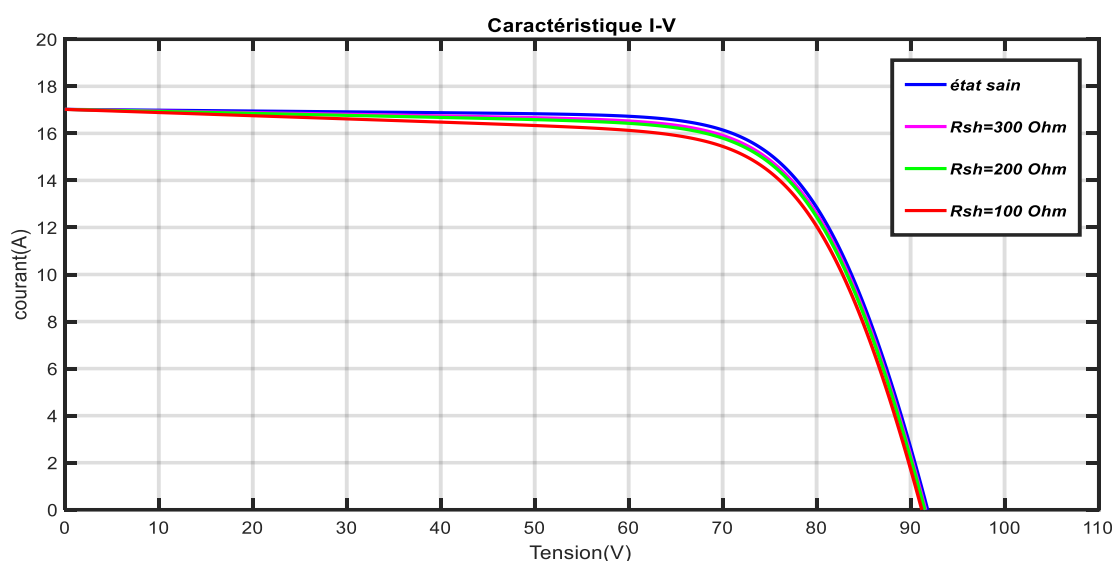


Figure III.18 : Caractéristique I-V avec diminution de résistance shunt Rsh

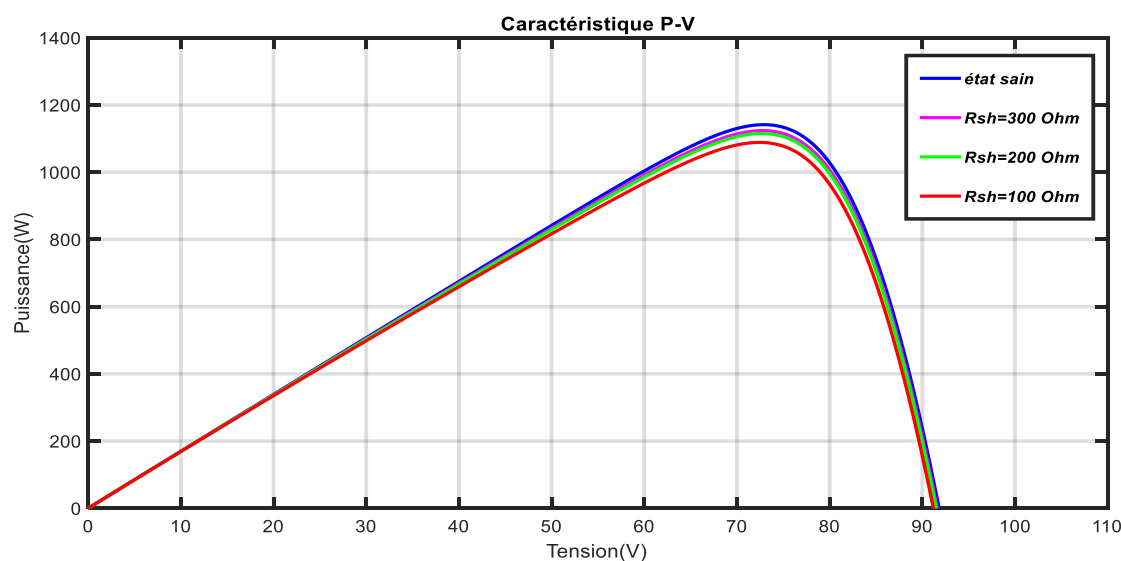


Figure III.19 : Caractéristique P-V avec diminution de résistance shunt Rsh

### III-1-4. Courbes de différents types de défauts d'un système PV :

Les figures (III.20 et III.21) illustrent les caractéristiques I-V et P-V du système photovoltaïque étudié avec quelques types de défauts tels que le défaut de court-circuit, défaut de circuit ouvert, défaut de dégradation simulés sous les conditions  $E=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25 \text{ C}^\circ$  et le défaut d'ombrage 1. Sur la Figure III.20, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert restent inchangés dans les cas de dégradation, mais le point MPP est inférieur au point normal. Dans le cas de défaut de circuit ouvert, la tension de circuit ouvert reste inchangée, tandis que le courant de sortie diminue considérablement. En conséquence, le point de puissance maximum  $P_m$  peut être évidemment réduit.

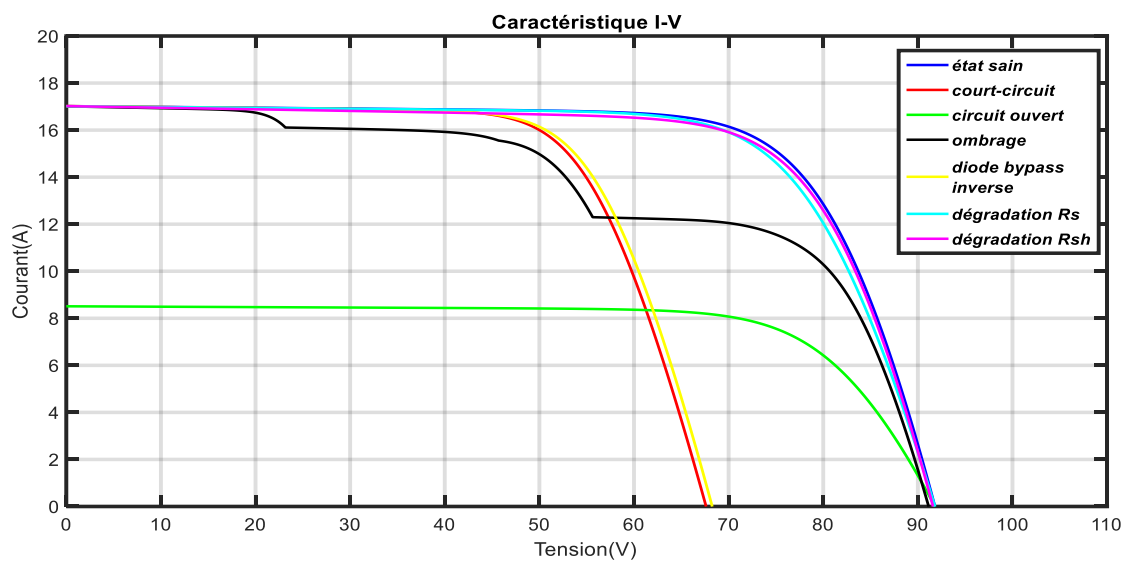


Figure III.20 : Caractéristique I-V des différents défauts d'un système PV.

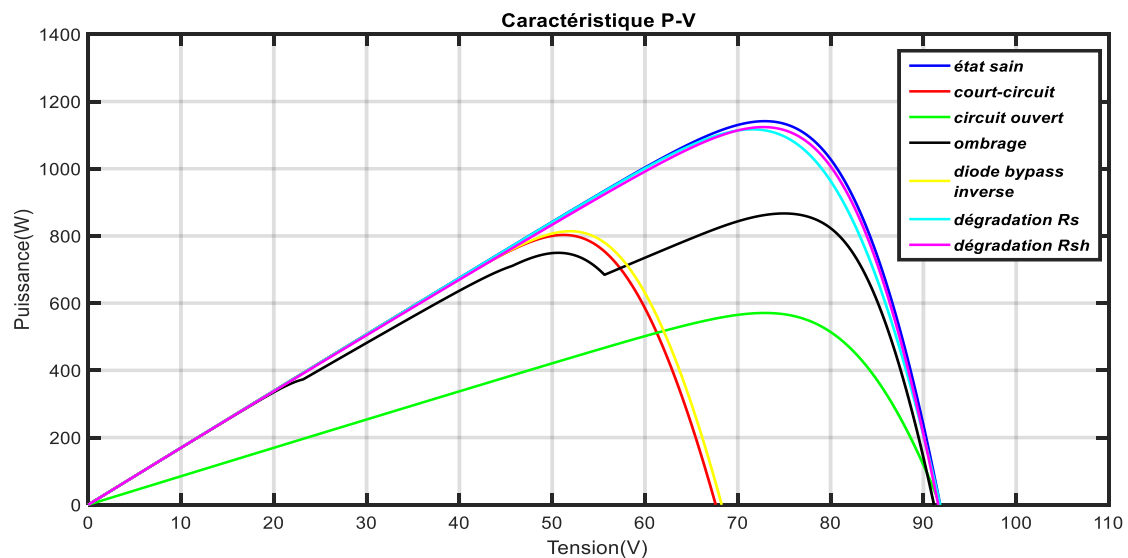


Figure III.21 : Caractéristique P-V des différents défauts d'un système PV.

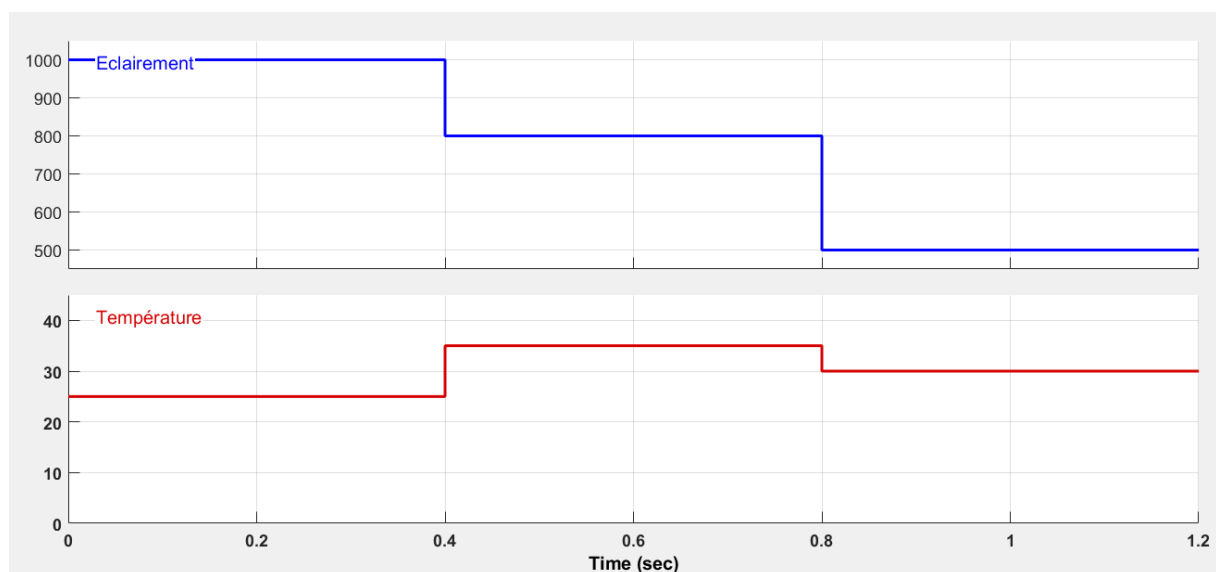


Par conséquent, comme le montre les deux Figures, différents défauts ont évidemment un impact différent sur les courbes I-V et P-V, ce qui peut impliquer la faisabilité potentielle de la détection et de la classification des défauts directement en fonction des courbes caractéristiques et des conditions ambiantes.

### III-1-5 Performances du système PV lors des défauts de court-circuit et circuit ouvert sous un profil variable d'ensoleillement et de température :

Prenons l'exemple du profil utilisé dans le deuxième chapitre:

- [0s, 0.4s] →  $E=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- ]0.4s, 0.8s] →  $E=800 \text{ W/m}^2$  et  $T=35 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- ]0.8s, 1.2s] →  $E=500 \text{ W/m}^2$  et  $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Figure III.22 :** Profil d'éclairement et de température utilisé.

Les figures (III.23), (III.24) et (III.25) illustrent les performances de l'algorithme incrémentation de conductance : puissance, tension et courant de sortie du hacheur. Il est clair que la commande MPPT basée sur la technique INC assure le transfert de la puissance maximale fournie par le champ PV à la charge pour différentes conditions de fonctionnements. Les trois grandeurs de sortie P, V et I diminuent d'une manière considérable sous le défaut de circuit ouvert dans les conditions  $E=500 \text{ W/m}^2$  et  $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Le tableau III.3 résume les valeurs des performances de l'algorithme INC (puissance, tension et courant de sortie du hacheur) aux différents régimes permanents du système PV étudié avec des défauts de court-circuit et circuit ouvert, sous les variations de l'éclairement et de la température.

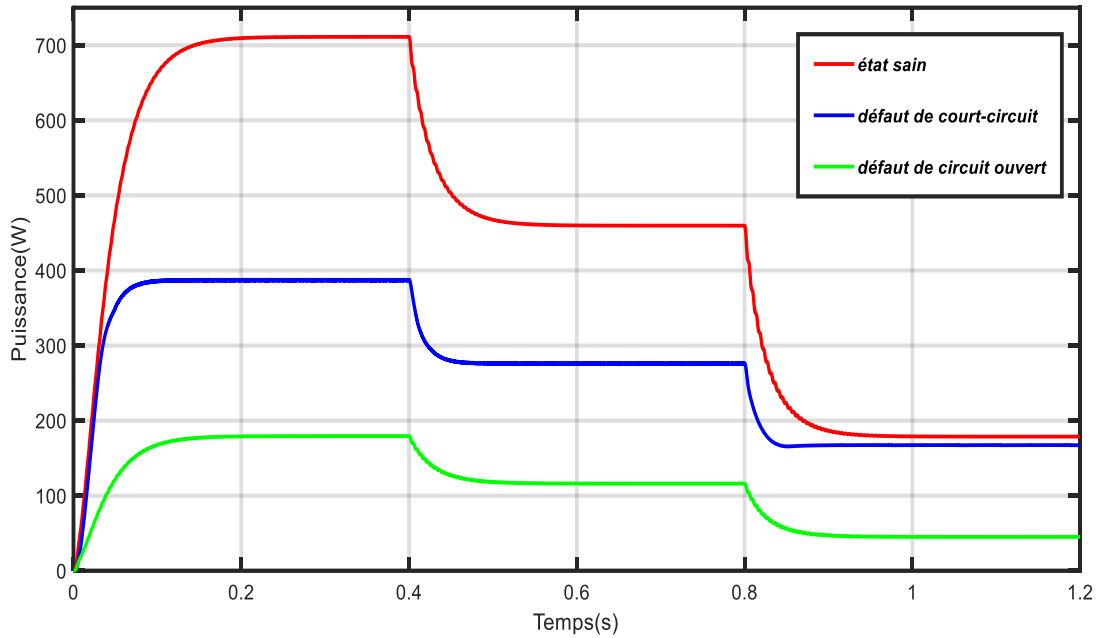


Figure III.23 : Puissance de sortie du hacheur.

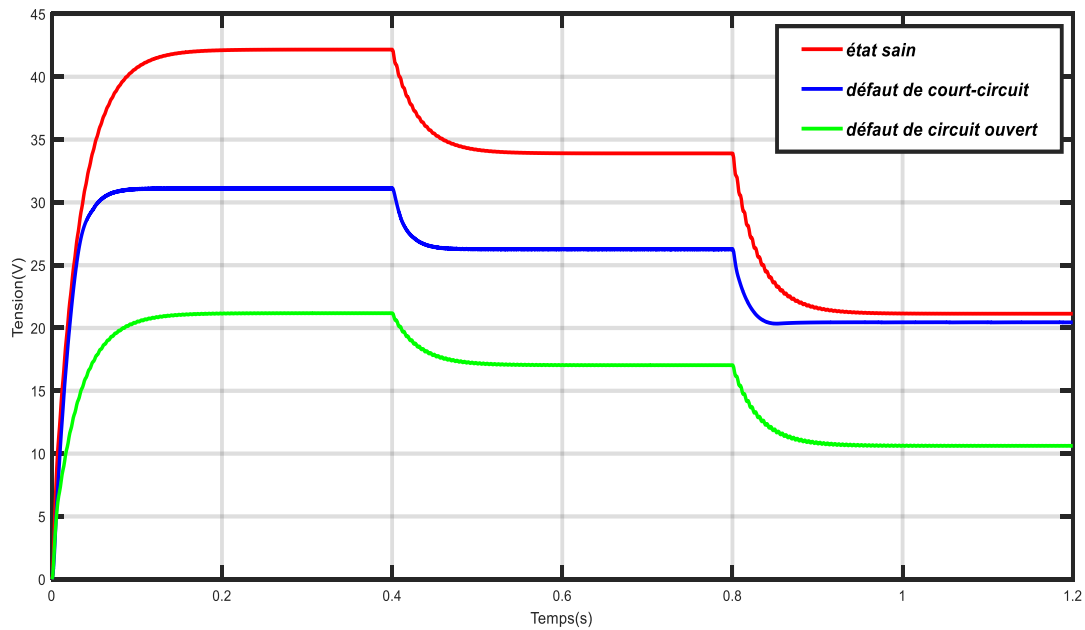


Figure III.24 : Tension de sortie du hacheur.

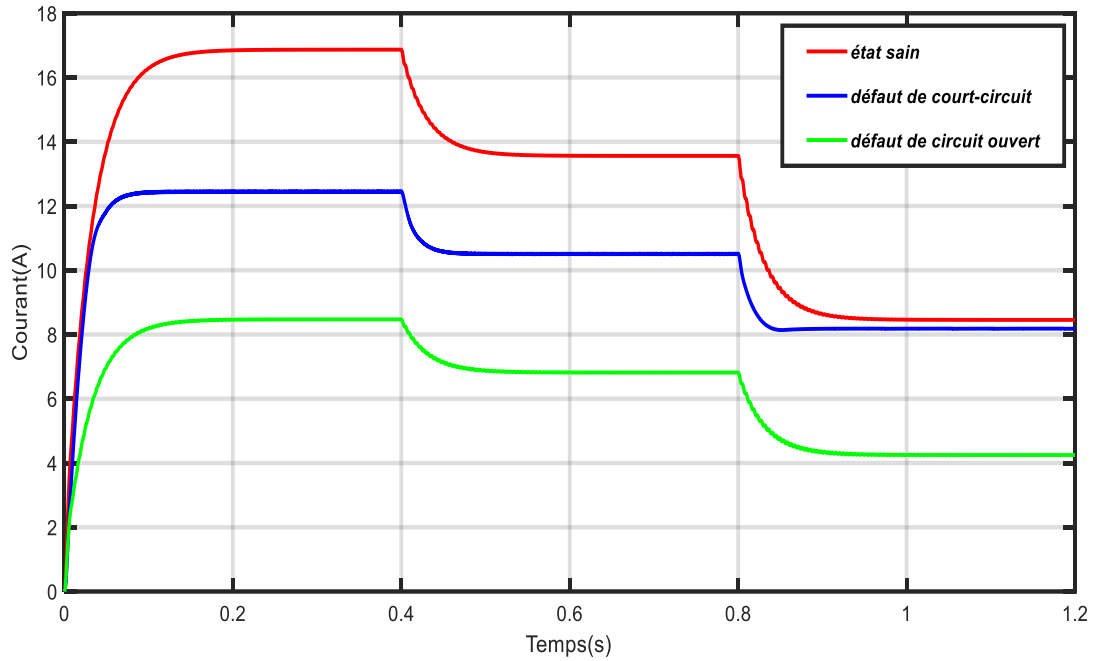


Figure III.25 : Courant de sortie du hacheur.

Intervalle de variation de E (W/m <sup>2</sup> ) et T (°C)	Etat du générateur PV	Puissance (watts)	Tension (volts)	Courant (Ampères)
[0s, 0.4s] E=1000 W/m <sup>2</sup> et T=25 °C.	Sain	711.1	42.16	16.87
	Défaut de court-circuit	387.40	31.12	12.45
	Défaut de circuit-ouvert	179.40	21.18	08.47
]0.4s, 0.8s] E=800 W/m <sup>2</sup> et T=35 °C	Sain	459.80	33.90	13.56
	Défaut de court-circuit	276.00	26.27	10.51
	Défaut de circuit-ouvert	116.10	17.05	06.815
]0.8s, 1.2s] E=500 W/m <sup>2</sup> et T=30 °C	Sain	178.80	21.14	08.458
	Défaut de court-circuit	167.40	20.46	08.183
	Défaut de circuit-ouvert	45.01	10.61	04.248

Tableau III.3 : Suivi des performances de l'algorithme INC

**III-2. Conclusion :**

Dans ce troisième chapitre et dans un premier temps, nous avons donné un bref aperçu sur des défauts qu'un système photovoltaïque peut subir. Par la suite nous avons mis l'accent sur les différents types de défauts temporaires et permanents des systèmes PV tels que l'ombrage partiel, défaut de court-circuit des diodes by-pass, défaut de circuit ouvert et les défauts de dégradation. En se basant sur les caractéristiques I-V et P-V, la simulation numérique sous l'environnement Matlab/simulink nous a montré la gravité de chaque type de défaut sur le système PV. Par conséquent, les technologies de détection et de diagnostic automatiques des défauts sont essentielles pour détecter ces défauts précoces pour une exploitation et une maintenance efficaces, fiables et sûres des systèmes photovoltaïques.

## IV. Introduction :

Dans le chapitre précédent on a bien présenté et simulé les différents défauts des systèmes PV. Ces défauts influent sur le rendement de ces derniers par la diminution de la puissance générée avec une réduction de la disponibilité et la fiabilité des systèmes. Afin de détecter et localiser ces défauts pour optimiser le fonctionnement des systèmes PV et de maximiser la puissance générée, un diagnostic pour prolonger la durée de vie utile de installations PV, et éviter les arrêts du système et réduire les problèmes de sécurité graves s'avère nécessaire. L'objectif de ce chapitre est d'utiliser la méthode des réseaux de neurones pour la classification des défauts de court-circuit, défauts de circuit ouvert et défauts d'ombrage qui sont dues à différentes circonstances.

### IV-1. Diagnostic :

Le diagnostic est une procédure qui permet de trouver l'élément défectueux et la cause de défaillance dans un système. Autrement dit 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 [20].

#### IV-1-1. Étapes de diagnostic :

- **Prise de mesure :** la mesure nous permet d'avoir les informations nécessaires sur un système à l'aide d'un capteur ou une chaîne de mesure (Figure IV.1).
- **Détection de défaut :** la détection des défauts se base sur le traitement d'un signal qui peut contenir des informations sur l'état de système, soit le système est en état de bon fonctionnement soit en panne.
- **Localisation de défaut :** c'est l'étape à laquelle nous pouvons identifier l'élément défaillant dans le système.
- **Identification de défaut :** Il s'agit de caractériser le défaut, d'estimer son importance et son comportement dans le temps [21].
- **Décision :** c'est de décidé quelle action nous devons appliquer entre plusieurs actions possibles pour résoudre un problème ou un défaut.
- **Correction :** c'est l'action d'arrêter le système et de procéder à une maintenance corrective [22].
- **Adaptation :** c'est la reconfiguration des paramètres de système pour l'ajuster à sa consigne.



**Figure IV.1 :** Organigramme de diagnostic des défauts

#### IV-1-2. Méthodes de diagnostic :

Il existe plusieurs méthodes de diagnostic mais selon les approches, on peut classer les méthodes de diagnostic comme suit :

- Approche avec modèle.
- Approche sans modèle.

##### IV-1-2-1. Méthode de diagnostic avec modèle :

Ces méthodes sont basées sur la connaissance du système, par la comparaison entre le modèle de référence et le système surveillé pour suivre l'évolution des paramètres et des caractéristiques du système, la différence entre les grandeurs et les caractéristiques liées au fonctionnement de système est appelée résidus, ces résidus sont alors utilisés comme entrées d'un processus de détection des défauts [23] :

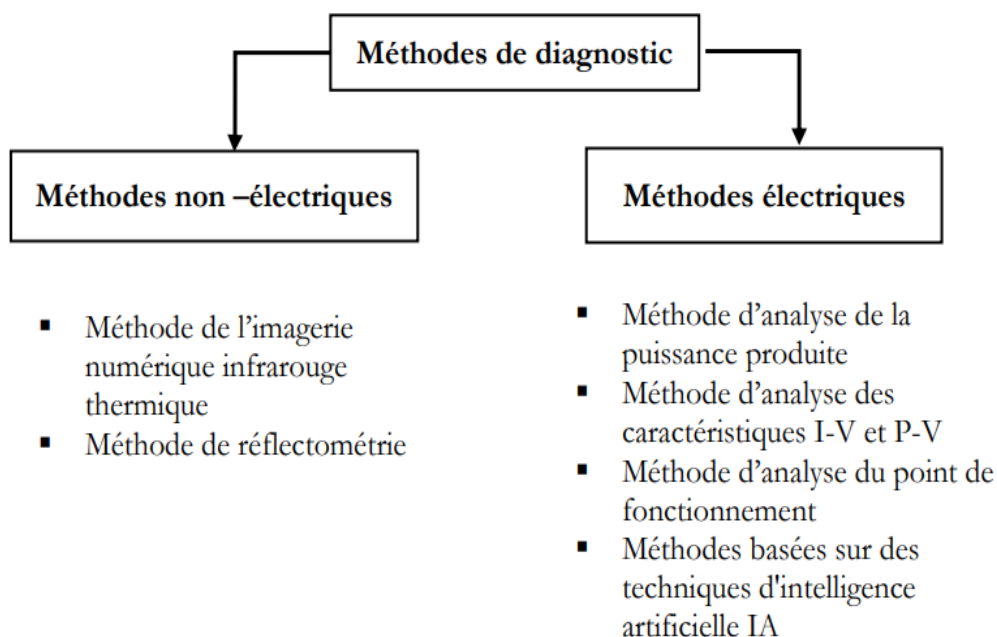
- Surveillance à base des observateurs (estimation) : ce modèle est décrit sous une représentation de variable d'état.
- Surveillance par projection dans l'espace de parité : cette méthode consiste à vérifier l'exactitude des équations mathématiques du modèle sur les sorties du procédé.
- Surveillance par estimation paramétrique : c'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique.

#### IV-1-2-2. Méthode de diagnostic sans modèle :

Différemment aux méthodes précédentes, celles-ci se sont basées sur la modélisation des signatures des défauts et non pas sur un modèle de référence, L'analyse est réalisée par une interprétation du type signal ou par système expert.

#### IV-2. Méthodes de diagnostic des défauts d'un système PV :

On peut classifier les méthodes de diagnostic sous deux catégories principales (électrique et non-électrique) comme le montre la figure IV.2.



**Figure IV.2 :** Méthodes de diagnostic des défauts d'un système PV

#### IV-2-1. Méthodes d'intelligence artificielle :

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 les systèmes PV. Plusieurs articles ont été écrits et de nombreuses méthodes basées sur l'intelligence artificielle continuent d'être examinées pour la détection et le diagnostic des défauts. Parmi ces techniques on trouve la technique du réseau de neurones artificiels (RNA) qui a déjà été étendue à des domaines spécifiques, notamment la détection de formes, le traitement du signal, etc.

**IV-2-2. Réseau de neurones :****IV-2-2-1. Historique :**

En 1890 W. James, le psychologue américain introduit le concept de mémoire associative. Il a proposé ce qui devenu la loi de fonctionnement pour l'apprentissage des réseaux de neurones, connue par loi de Hebb.

En 1943 J. Mc Culloch et W. Pitt sont les premiers qui montre que les fonctions logiques, arithmétiques et symboliques peut être réalisé par des réseaux de neurones formels.

En 1949 D. Hebb, le psychologue américain publie la règle de Hebb qui explique la relation entre la physiologie et la psychologie, cette règle est utilisée dans les réseaux de neurones « les techniques d'apprentissage ».

En 1958 F. Rosenblatt construit le premier neuro-ordinateur basé sur le modèle de Perceptron.

En 1960 l'automaticien américain B. Widrow développe un modèle d'élément linéaire adaptative a base des réseaux multicouches.

En 1969 M. Minsky et S. Papert publient le livre Perceptrons qui démontre les limitations de tous les modèles des réseaux de neurones.

En 1980 Rumelhart–Mc Clelland, Werbos–LeCun : perceptron multi-couches, mécanismes d'apprentissage performants (rétro-propagation du gradient).

En 1982 J. J. Hopfield est un physicien reconnu à qui l'on doit le renouveau d'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels.

En 1985 la rétro-propagation apparait, un algorithme d'apprentissage adapté aux réseaux de neurones multicouches.

A partir de ce moment, la recherche sur les réseaux de neurones connaît un essor fulgurant et les applications commerciales de ce succès académique suivent au cours des années 90 [24].

**IV-2-2-2. Définition :**

Un réseau de neurones est un ensemble d'éléments de traitement de l'information, avec une topologie spécifique d'interconnexions entre ces éléments et une loi d'apprentissage pour adapter les poids de connexions [24].



### IV-2-2-3. Neurone biologique :

Un neurone est une cellule nerveuse vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques, le neurone peut recevoir, stocker et transmettre des informations, il est constitué d'un corps cellulaire, d'axone, des dendrites et des synapses (Figure IV.3).

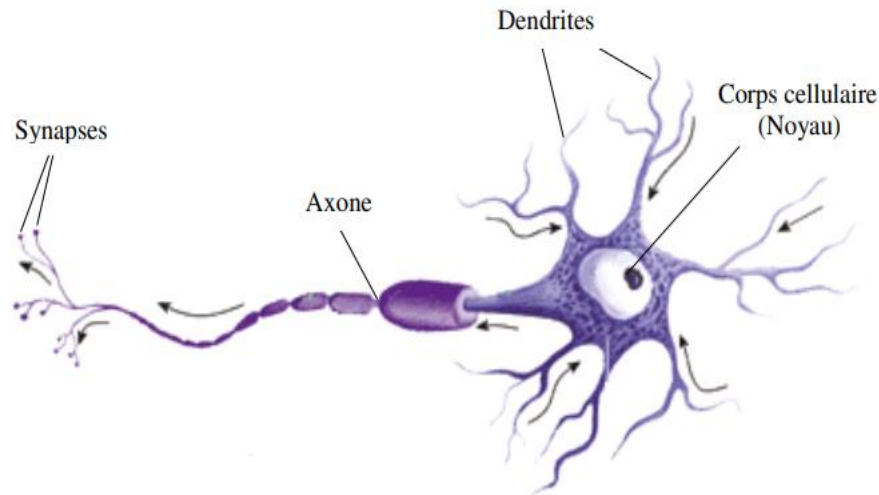


Figure IV.3 : Neurone biologique.

Les composants d'un neurone biologique [25] :

- **Le corps cellulaire** : appelé Soma, il contient le noyau de la cellule nerveuse ; c'est en cet endroit que prend naissance l'influx nerveux qui représente l'état d'activité du neurone.
- **Les dendrites** : ramifications tubulaires courtes formant une espèce d'arborescence autour du corps cellulaire ; ce sont les entrées principales du neurone qui captent l'information venant d'autres neurones.
- **L'axone** : longue fibre nerveuse qui se ramifie à son extrémité ; c'est la sortie du neurone et le support d'information vers les autres neurones.
- **La synapse** : les synapses constituent les zones de jonction entre deux neurones ou entre un neurone et une cellule effectrice qui communique l'information, en la pondérant par un poids synaptique, à un autre neurone elle est essentielle dans le fonctionnement du système nerveux.

### IV-2-2-4. Neurone artificiel :

Un neurone artificiel dit formel est un modèle théorique inspiré de neurone biologique, il contient plusieurs entrées, chacune de ces entrées associée un poids, fonction de transfert et élément de sortie, pour inventer un raisonnement intelligent d'une façon artificiel (Figure IV.4).

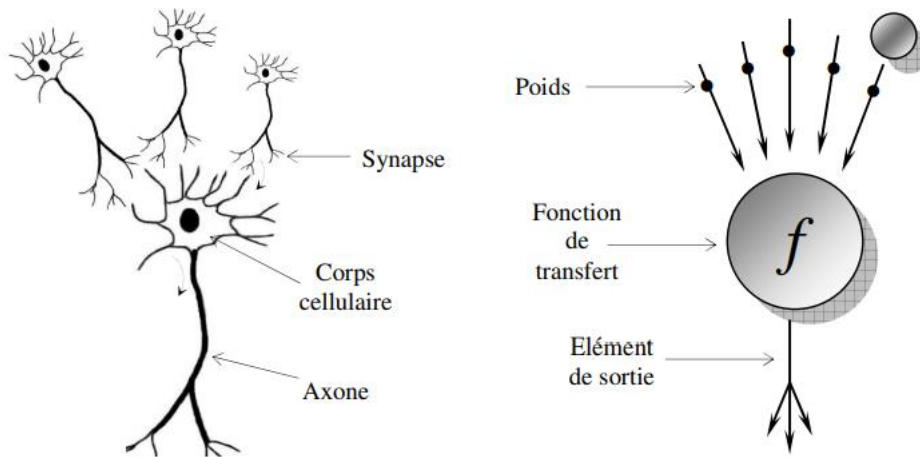


Figure IV.4 : Neurone artificiel (formel).

Le tableau ci-dessous contient les différences entre un neurone biologique et un neurone formel (artificiel) [26] :

Neurone biologique	Neurone artificiel
Synapse	Poids de connexion
Axone	Signale de sortie
Dendrites	Signale d'entrées
Corps cellulaire	Fonction d'activation

Tableau IV.1 : Neurone artificiel et neurone biologique.

**IV-2-2-5. Comportement :**

Un neurone artificiel reçoit les informations des entrées  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) via des connexions, chacune d'elles affecte un poids synaptique  $w$  (Figure IV.5). Il fonctionne en deux étapes :

La première étape : dans cette étape le calcul du potentiel  $v_j$  du neurone  $j$  par le prétraitement des données reçus :

$$v_j = b_j + \sum_{i=1}^n w_{j,i} \cdot x_i \tag{IV-1}$$

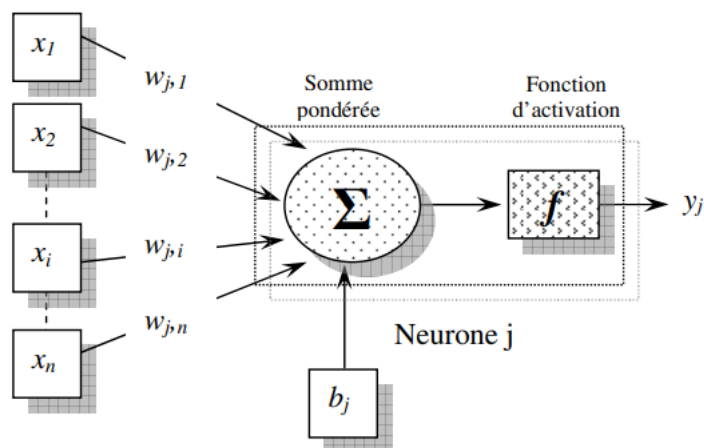
Avec :  $b_j$  est une constante égale à 1.

La formule la plus simple du potentiel est :

$$v_j = \sum_{i=0}^n w_{j,i} \cdot x_i \tag{IV-2}$$

Dans la deuxième étape on calcule la valeur de l'état interne  $y_j$  du neurone  $j$ , en utilisant la valeur du potentiel  $v_j$  à l'aide de la fonction de transfert  $f$  dit aussi fonction d'activation.

$$y_j = f(v_j) = f\left(\sum_{i=0}^n w_{j,i} \cdot x_i\right) \quad (\text{IV-3})$$



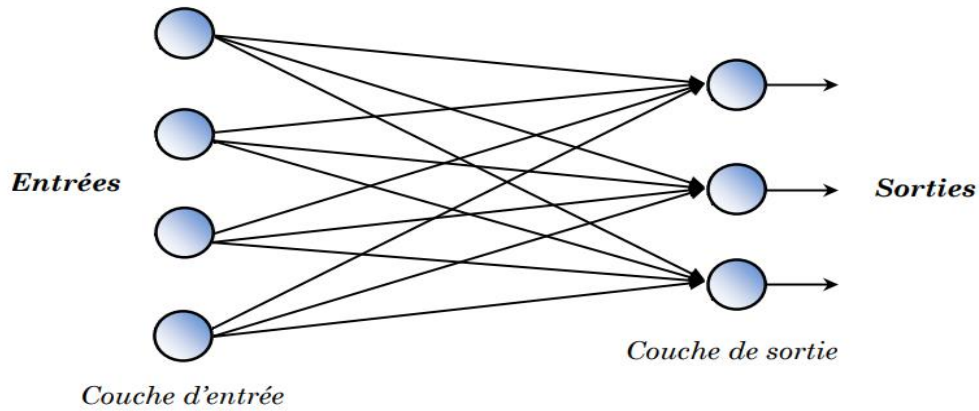
**Figure IV.5 :** Comportement d'un neurone artificiel (formel).

### IV-2-3. Les différents modèles de réseaux de neurones :

Un réseau de neurone artificiel est une structure organisée inspirée de réseau de neurone biologique, il contient de neurones interconnectés entre eux par des liaisons unidirectionnelles affectées de poids, celles-ci permettent d'émettre et recevoir des informations. On peut classer les réseaux de neurones artificiels selon sa topologie et son nombre des couches en deux modèles :

#### IV-2-3-1. Réseaux de neurones monocouches :

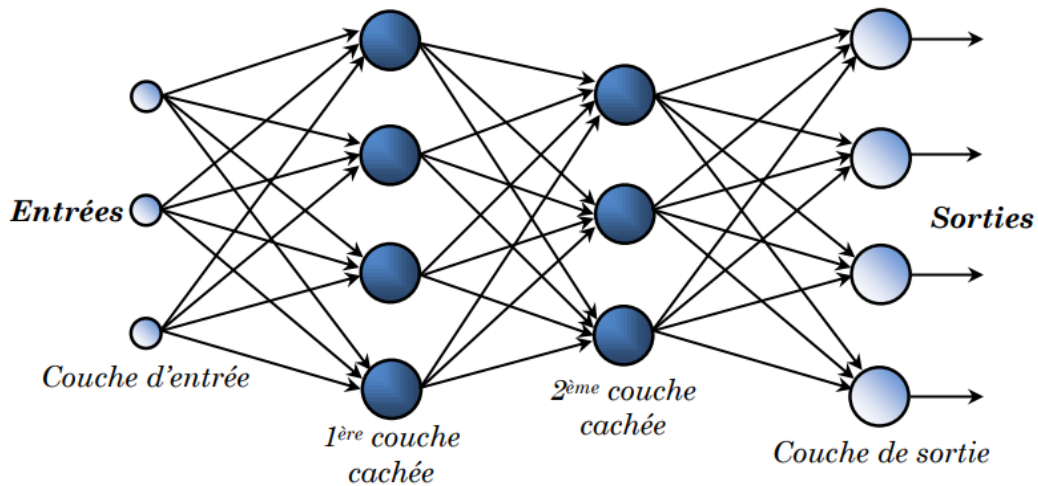
Le perceptron monocouche est le modèle le plus simple de réseaux de neurones artificiels, il se compose seulement de deux couches ; couche d'entrée et couche de sortie. D'ailleurs la première couche ne compte pas (Figure IV.6). Ce modèle est conçu afin de résoudre les opérations logiques les plus simple **AND** et **OR**. Il ne peut traiter que les problèmes linéairement séparables.



**Figure IV.6 :** Modèle de perceptron monocouche.

#### IV-2-3-2. Réseaux de neurones multicouches :

Le perceptron multicouche est une extension de perceptron précédent, il contient une ou plusieurs couches cachées entre la couche d'entrée et la couche de sortie leur rôle est de transférer et traiter les données. La couche d'entrée associe à l'entrée du système et elle ne contient aucun neurone, les couches cachées sont les couches des neurones et la couche de sortie c'est la couche qui fournit la sortie de système (Figure IV.7). Ce modèle est utilisé pour résoudre les problèmes qui ne sont pas linéairement séparables comme la fonction logique **XOR**.

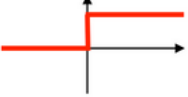
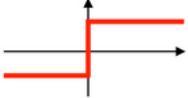
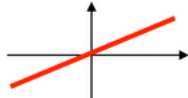

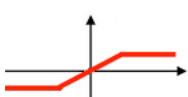


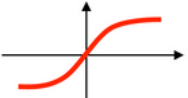


**Figure IV.7 :** Modèle de perceptron multicouche.

#### IV-2-4. Fonction d'activation :

La fonction d'activation est une fonction mathématique qui permet de définir l'état interne du neurone en fonction de son entrée, cette fonction est caractérisée par sa monotonie,

son seuillage, et sa saturation. Le tableau IV.2 suivant représente les différentes fonctions d'activation :

La fonction d'activation	Equation	Graphe
Echelon (unipolaire)	$\begin{cases} f(x) = 0 & \text{si } x < 0 \\ f(x) = 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Echelon (bipolaire)	$\begin{cases} f(x) = -1 & \text{si } x < 0 \\ f(x) = 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Linéaire	$f(x) = x$	
Linéaire saturée	$\begin{cases} f(x) = 0 & \text{si } x < 0 \\ f(x) = x & \text{si } 0 \leq x \leq 1 \\ f(x) = 1 & \text{si } x > 1 \end{cases}$	
Linéaire saturée symétrique	$\begin{cases} f(x) = -1 & \text{si } x < -1 \\ f(x) = x & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ f(x) = 1 & \text{si } x > 1 \end{cases}$	
Rampe	$\begin{cases} f(x) = 0 & \text{si } x < 0 \\ f(x) = x & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Sigmoïde	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	
Tangente hyperbolique	$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	

**Tableau IV.2 :** Fonctions d'activation.

### IV-2-5. L'apprentissage :

L'apprentissage est un processus d'optimisation ou une phase de développement du réseau de neurones, son rôle est d'optimiser les poids de chaque connexion pour modifier le comportement du réseau de neurone afin d'obtenir le comportement désiré. On distingue trois types d'apprentissage ; supervisé, par renforcement et non supervisé.

#### IV-2-5-1. Apprentissage supervisé :

Ce type d'apprentissage forcé le réseau a convergé vers la réponse attendue, il est basé sur la comparaison entre le résultat de sortie calculé par le réseau et la réponse attendue en sortie, les poids va être modifié jusqu'à ce que le résultat fournisse par le réseau devenir le plus proche possible à la sortie attendue (Figure IV.8).

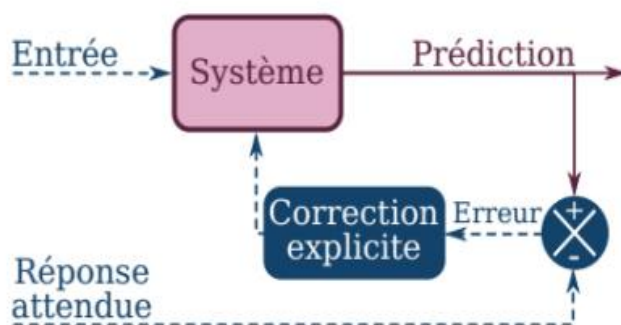


Figure IV.8 : Schéma d'apprentissage supervisé

#### IV-2-5-2. Apprentissage non-supervisé :

Ce type d'apprentissage ne contient que des entrées, il laisse le réseau converger librement vers n'importe quel état, le réseau s'auto-organise pour extraire lui-même les données et les regrouper automatiquement. Il est réalisé à l'aide des informations locales contenues dans les poids synaptiques et dans l'activation de neurones élémentaires. La connaissance a priori de la sortie désirée n'est pas nécessaire. [27]

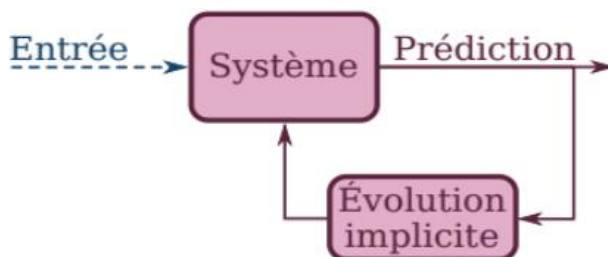


Figure IV.9 : schéma d'apprentissage non-supervisé.

### IV-2-5-3. Apprentissage renforcé :

L'apprentissage par renforcement est utile quand une information de retour sur la qualité de la performance est fournie (Figure IV.9). Mais la conduite souhaitée du réseau n'est pas complètement spécifiée par le professeur [28].

## IV-3. Diagnostic des défauts du système PV

### IV-3-1. Représentation du réseau de neurones avec trois entrées et une sortie :

La structure développée du réseau de neurones est illustrée sur la figure IV.10. C'est un réseau MLP perceptron multicouches avec trois entrées, une couche cachée de 10 neurones et une sortie. En fait, la sélection des entrées a été obtenue en utilisant les paramètres disponibles à partir de l'ensemble de données des caractéristiques I-V et P-V obtenues par simulations des quelques défauts des panneaux solaires, y compris la tension (V), le courant (I) et la puissance (P) de sortie du générateur PV. Chaque courbe est représentée par 800 points ( $V_{pv}$ ,  $I_{pv}$ ,  $P_{pv}$ ). Les courbes P-V sélectionnées représentent différentes valeurs d'éclairement à une température ambiante de 25°C. La sélection des couches cachées est obtenue à l'aide d'une simulation de 5 à 35 couches cachées ; en conséquence, dix couches cachées ont été sélectionnées en raison de ses performances optimales.

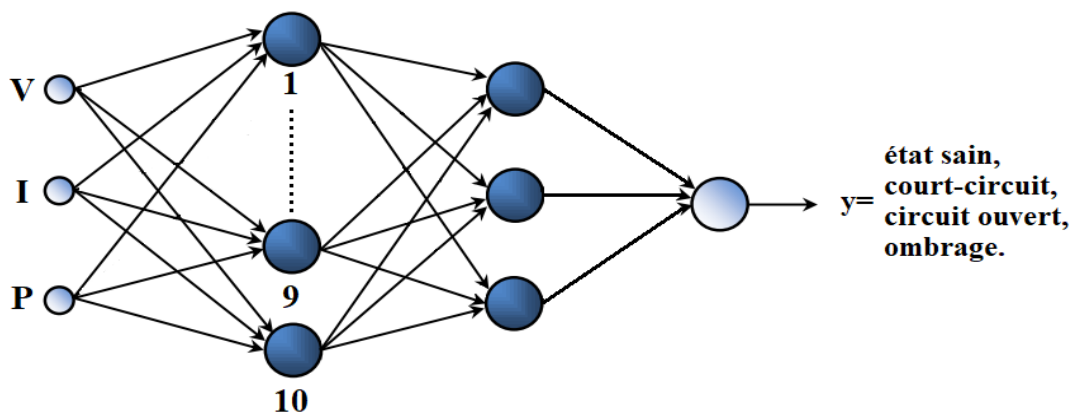


Figure IV.10 : Représentation du réseau avec une seule sortie

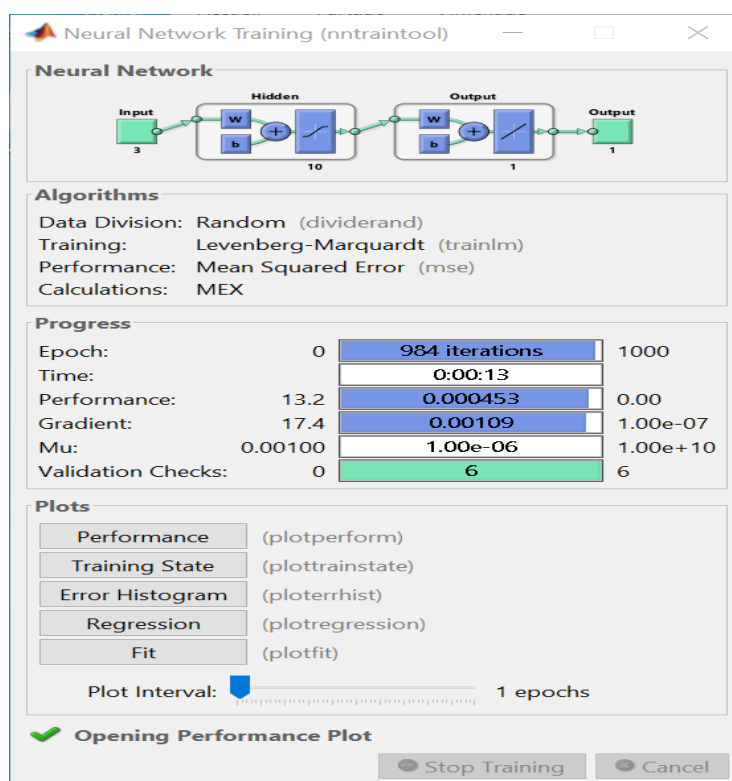
Les défauts simulés dans ce premier cas sont : le défaut de court-circuit, défaut de circuit ouvert et défaut d'ombrage. La sortie désirée du RNA est codifiée comme suit :

$$y = [\text{état sain} \quad \text{court-circuit} \quad \text{circuit ouvert} \quad \text{ombrage}] = [0 \quad 1 \quad 2 \quad 3]$$

L'algorithme utilisé pour l'apprentissage est l'algorithme de Levenberg Marquardt (LM). Cette technique est très adaptée à la formation de réseaux de neurones où l'indice de performance est l'erreur quadratique moyenne. L'algorithme LM offre un algorithme d'entraînement de réseau neuronal rapide pour un nombre modéré de paramètres de réseau. De plus, il fournit un

compromis adéquat entre la vitesse de la méthode de Newton et la convergence garantie de la descente la plus raide. Le réseau est généré par une formation hors ligne avec la fonction "trainlm" en utilisant "nftool" dans MATLAB/SIMULINK. 70 % de l'ensemble de données ont été utilisés pour l'apprentissage, 15 % ont été utilisés pour la validation et 15 % ont été utilisés pour le processus de test.

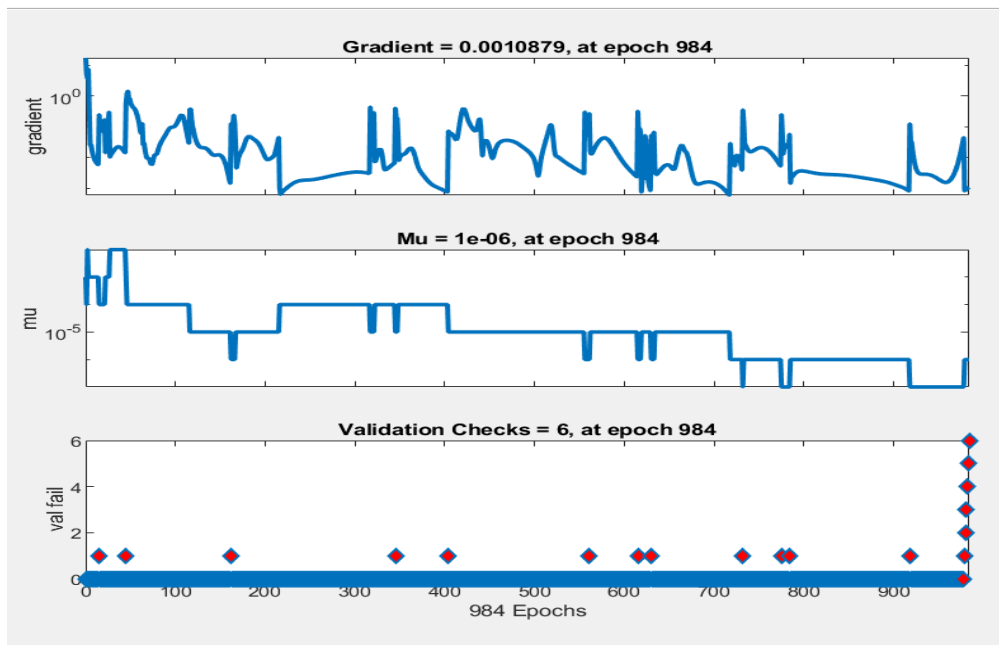
La figure IV.11 montre la fenêtre de performance du réseau neuronal pour la classification des défauts du système solaire photovoltaïque. Dans ce total, 984 itérations sont nécessaires pour une formation complète du RNA à l'aide de l'algorithme de levenberg-Marquardt. Le gradient pour cette formation était mesuré jusqu'à 0,00109.



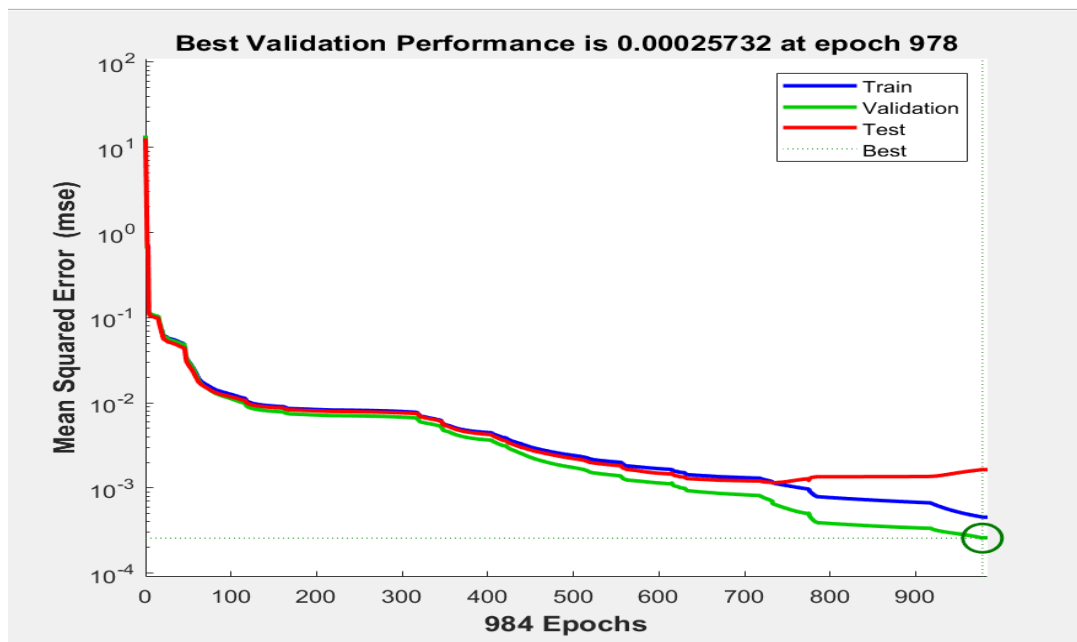
**Figure IV.11:** Fenêtre d'entraînement du RNA.

Les Figures (IV.12) et (IV.13) montrent l'état d'apprentissage et la phase de performance du RNA pour gérer l'ensemble de données sélectionnées. Sur la figure IV.12, le gradient, le paramètre d'impulsion (Mu) et le contrôle de validation de l'ensemble de données formées sont représentés à 984 itérations. Selon la simulation, le gradient est de 0,00108798 à l'itération 984, ce qui représente l'écart négligeable des données formées avec une fonction de perte minimale.





**Figure IV.12 :** Courbes de gradient, Mu et la valeur d'échec

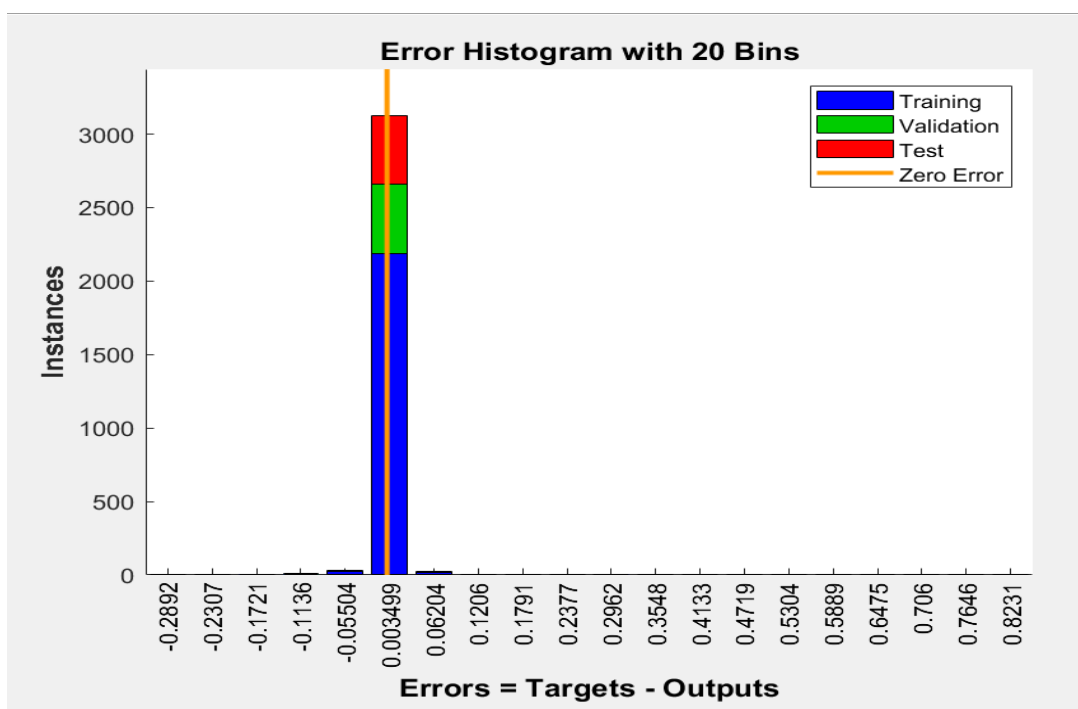


**Figure IV.13:** Graphe de l'erreur d'apprentissage, de test et de validation

La très petite valeur proche de zéro de Mu, le gradient et les contrôles de validation de l'ensemble de données entraîné justifient l'applicabilité de l'algorithme de Levenberg Marquardt pour la classification des défauts du système PV. Sur la figure IV.13, l'erreur quadratique moyenne est représentée pour différentes itérations où les échantillons de l'ensemble formé de données sont convergés avec le meilleur résultat d'apprentissage à 984 itérations. Par

conséquent, les meilleures performances de validation de l'ensemble formé de données sont atteintes à 978 itérations. Selon le résultat de la simulation, la meilleure performance de validation est de 0,00025732. Les données d'apprentissage en bleu, les données de validation en vert, les données de test en rouge et zéro erreur en orange.

La figure IV.14 valide également l'algorithme utilisé représentant une erreur nulle dans la phase d'apprentissage, de validation et de test de la correspondance des données. Les bacs représentent le nombre de barres verticales dans l'histogramme d'erreur de la figure IV.14, où l'erreur totale du RNA varie de -0,2892 (bac le plus à gauche) à 0,8231 (bac le plus à droite). La plage d'erreur est divisée en 20 tranches plus petites. Chaque barre verticale représente le nombre d'échantillons de l'ensemble de données sélectionnées qui se trouve dans un bac particulier. Au milieu de l'histogramme d'erreur, le bac a une erreur de 0,003499 pour 2240 échantillons de l'ensemble de données d'apprentissage, 480 échantillons de l'ensemble de données de validation et 480 échantillons de l'ensemble de données de test.



**Figure IV.14 :** Histogramme d'erreur.

Comme le montre la figure IV.15, les valeurs de régression indiquée par R sont 0.99982 pour l'apprentissage, 0.9999 pour la validation, et 0.99933 pour les données de test. La valeur R est de 0.99976 pour toutes les données. Lorsque cette valeur se rapproche de 1, la précision des données calculées par le système augmente.

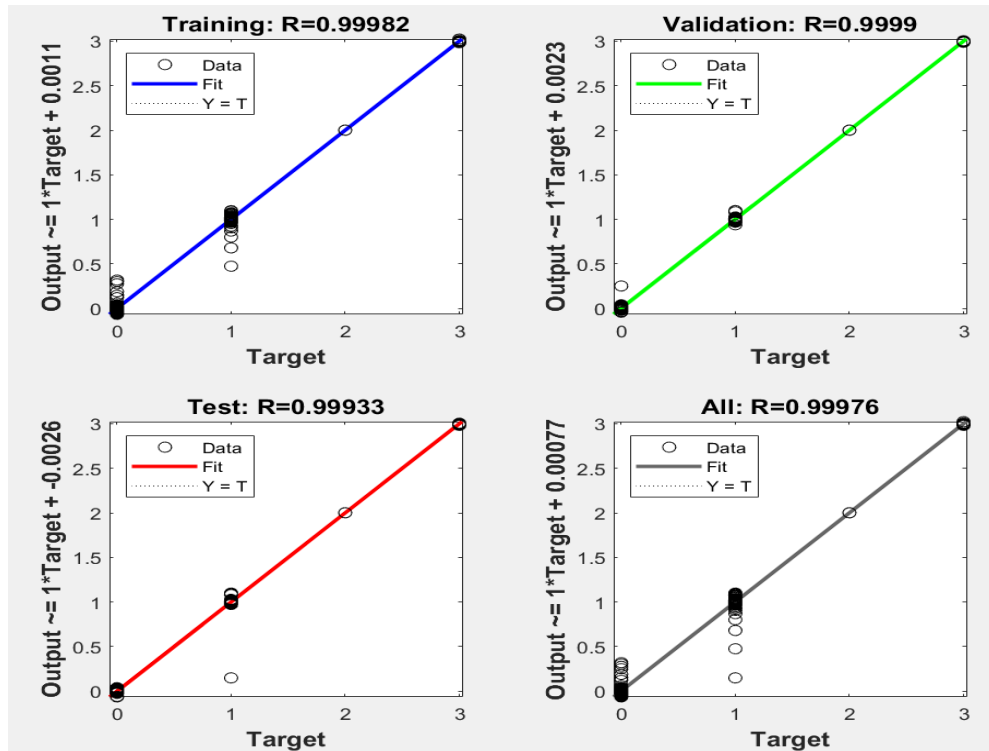


Figure IV.15 : Courbes de régression

La figure IV.16 montre que les données sont parfaitement formées à l'aide de l'algorithme de Levenberg-Marquardt avec une erreur négligeable où la sortie suit bien les valeurs ciblées du RNA.

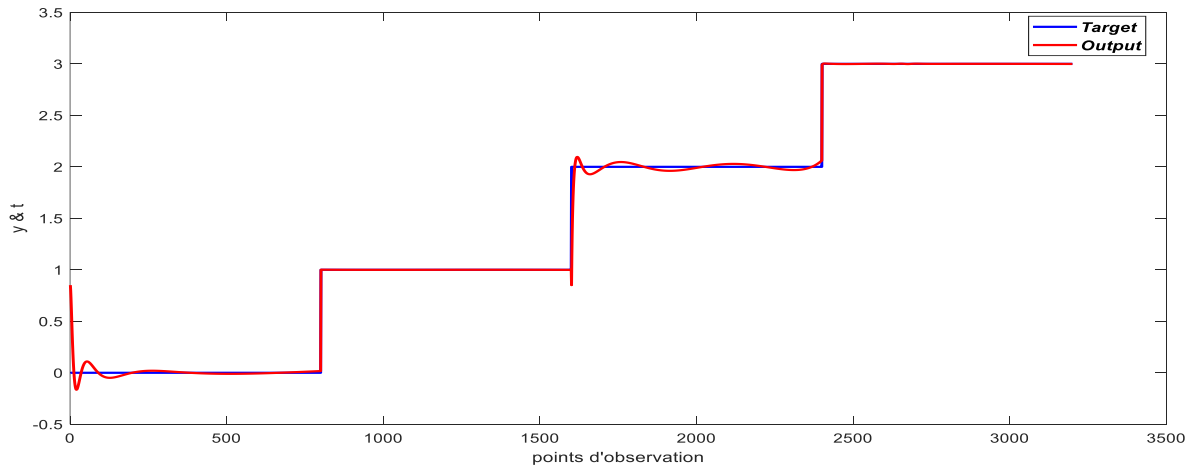


Figure IV.16 : Sortie du RNA.

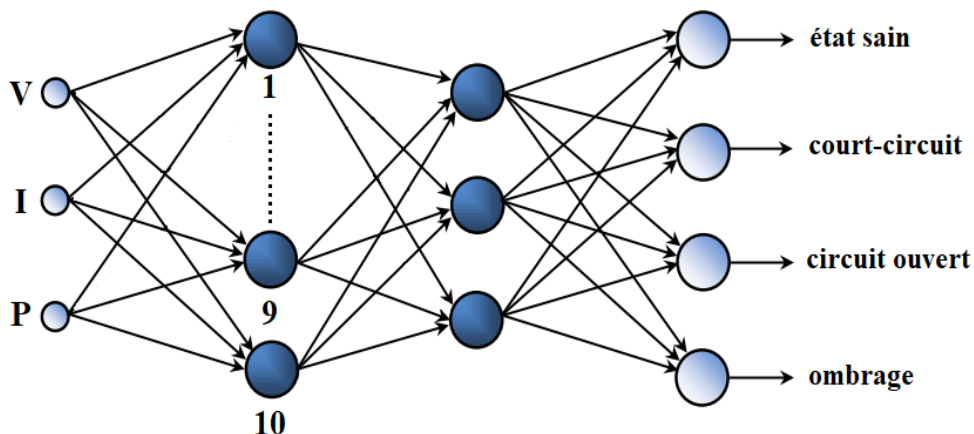
**IV-3-2. Représentation du réseau de neurones avec trois entrées et quatre sorties :**

Différentes architectures ont été évaluées et la meilleure a été choisie par essais et erreurs. La structure optimisée se compose de 3 neurones dans la couche d'entrée qui représentent la tension, le courant et la puissance de sortie du générateur PV. La couche cachée

est composée de 10 neurones, dont la fonction d'activation est tansig, et 4 neurones, dont la fonction d'activation est purelin dans la couche de sortie qui représentent l'état sain, défaut de court-circuit, défaut de circuit ouvert et défaut d'ombrage, comme le montre la figure IV.17. L'ensemble de formation se compose de 4 courbes P-V. Chaque courbe est représentée par 4200 points ( $V_{pv}$   $I_{pv}$ ,  $P_{pv}$ ). Les courbes P-V sélectionnées représentent différentes valeurs d'éclairement à une température ambiante de 25°C. Les sorties désirées qui représentent l'état sain et les défauts de court-circuit, défaut de circuit ouvert et défaut d'ombrage sont codifiées comme suit :

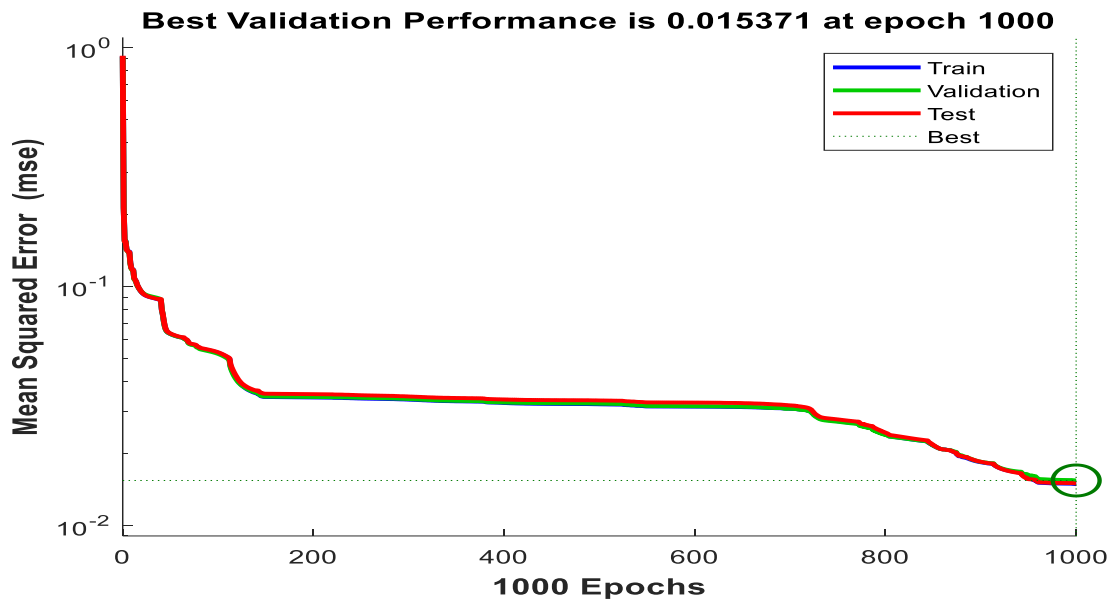
- **Etat sain**                                     $[1 \ 0 \ 0 \ 0]$
- **Défaut de court-circuit**             $[0 \ 1 \ 0 \ 0]$
- **Défaut de circuit ouvert**         $[0 \ 0 \ 1 \ 0]$
- **Défaut d'ombrage**                         $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$

L'algorithme utilisé pour l'apprentissage est l'algorithme de Levenberg Marquardt (LM). Le réseau est généré par une formation hors ligne avec la fonction `trainlm` en utilisant 'nftool' dans MATLAB/SIMULINK. 70 % de l'ensemble de données ont été utilisés pour l'apprentissage, 15 % ont été utilisés pour la validation et 15 % ont été utilisés pour le processus de test.



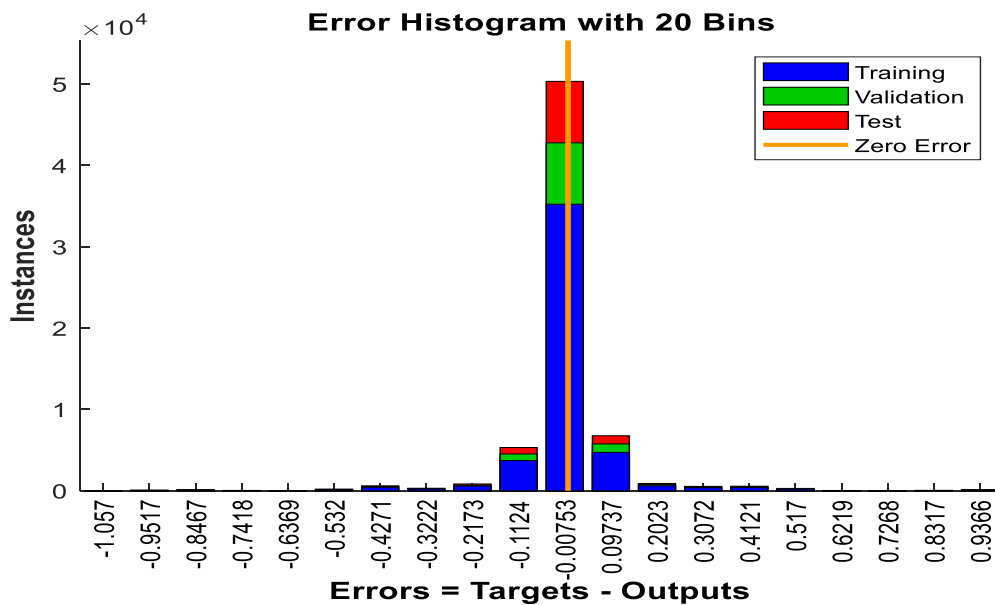
**Figure IV.17 :** Représentation du réseau avec quatre sorties.

L'erreur quadratique moyenne à différentes itérations est représentée sur la figure IV.18, qui illustre la convergence des données entraînées avec le meilleur résultat d'entraînement de 0.015371 à 1000 itérations.



**Figure IV.18 :** Graphe de l'erreur d'apprentissage, de test et de validation

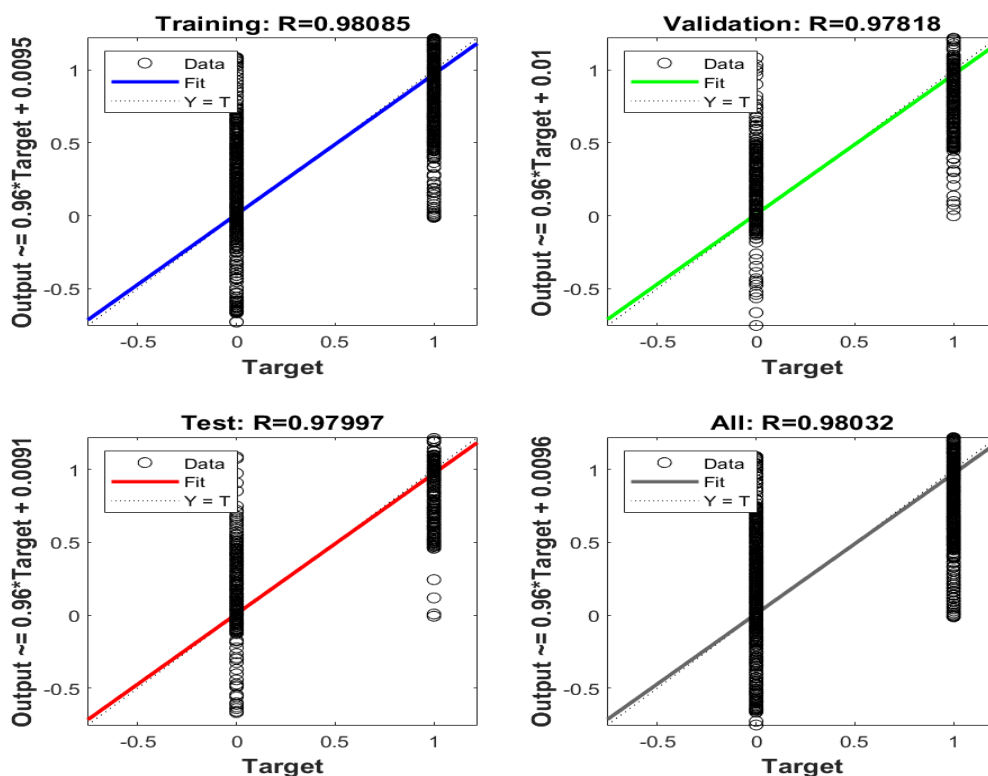
La figure IV.19 montre que l'erreur totale varie de -1.057 à 0,9366 avec une erreur nulle dans la phase d'apprentissage, de validation et de test de l'ensemble de données formé. Dans l'histogramme d'erreur, le bac du milieu a une erreur de -0,00753.



**Figure IV.19 :** Histogramme d'erreur.

Le tracé de régression du RNA de la figure IV.20, où R=0.98032 représente la prédiction parfaite de la sortie en fonction de l'entrée et de la corrélation entre les valeurs générées en sortie

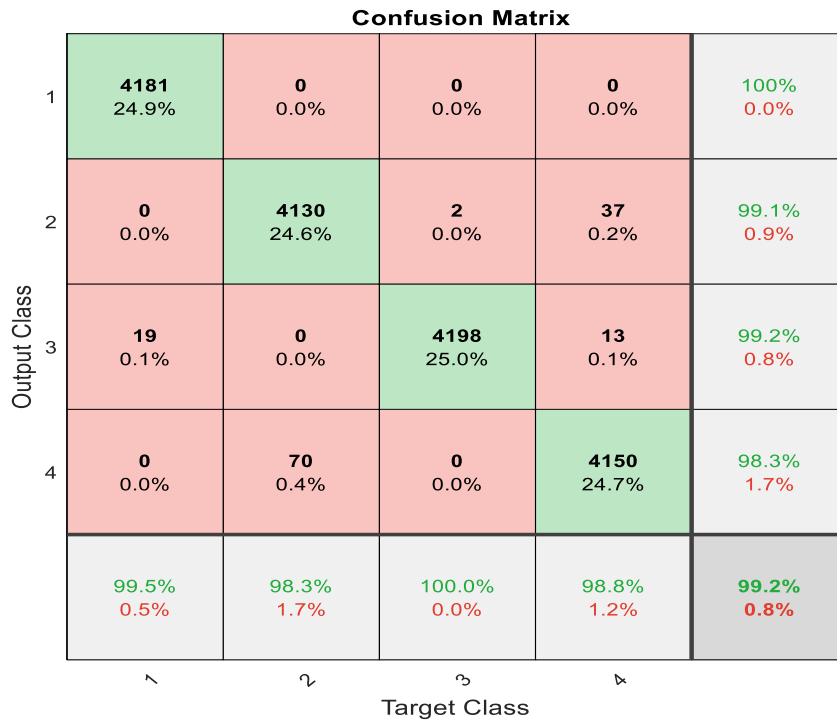
et les valeurs générées cibles des défauts du panneau solaire. Généralement, une erreur est calculée en soustrayant la sortie de la cible.



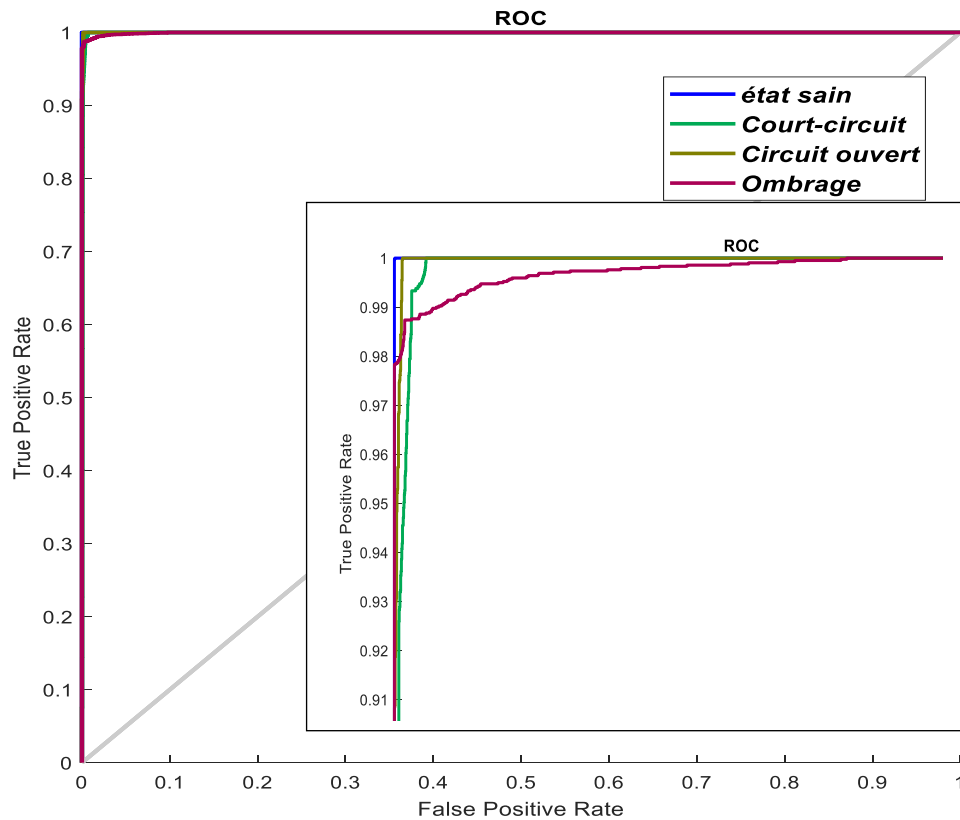
**Figure IV.20** : Courbe de régression.

Lors de la lecture de la matrice de confusion (Figure IV.21), les cellules vertes et rouges représentent respectivement le nombre de classifications correctes et incorrectes par le RNA. Les cellules grises représentent la précision de détection totale par rapport à chaque ligne et colonne. Les chiffres 1, 2, 3 et 4 signifient respectivement état sain, défaut de court-circuit, défaut de circuit ouvert et défaut d'ombrage. La précision globale de l'algorithme utilisé, comme en témoigne la matrice de confusion, était de 99,2 %.

Les caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC) fournissent un aperçu plus approfondi des performances du choix du RNA, en fournissant le taux de « vrais-faux positifs » pour les quatre cas étudiés. À partir de la figure IV-22, la grande précision de l'algorithme est évidente, car chaque cas de défaut est étroitement aligné sur le côté gauche du tracé ROC.



**Figure IV.21 : Matrice de confusion**



**Figure IV.22 : Courbe ROC**

**IV-4. Conclusion :**

Dans un premier temps nous avons présenté d'une manière succincte des généralités sur les méthodes de diagnostic. On a mis l'accent sur les méthodes de l'intelligence artificielle telle que la technique des réseaux de neurones qui a remporté un énorme succès dans les problèmes de classification multi-classes, ainsi que pour les tâches de reconnaissance de formes et de régression. Les différents modèles des réseaux de neurones avec les techniques d'apprentissage ont été abordés. Dans un deuxième temps, et à l'aide de cette technique (RNA) on a pu diagnostiquer trois types de défauts des panneaux photovoltaïques, les défauts de court-circuit, défauts de circuit-ouvert et défauts d'ombrage. Des RAN ont été réalisés à partir des caractéristiques I-V et P-V d'un système photovoltaïque. En général, la méthodologie proposée s'est avérée capable de détecter de manière fiable les défauts, elle montre que le problème de la détection automatique des défauts peut être divisé en deux parties : premièrement, il est détecté s'il y a des défauts, puis le type de défaut est détecté.



Ce travail entre dans le cadre de diagnostic des défauts des systèmes photovoltaïques à base des réseaux de neurones. Alors que les technologies photovoltaïques sont devenues l'une des ressources d'énergie renouvelable les plus prometteuses dans les environnements urbains, la surveillance et la maintenance de ces systèmes ont gagné en importance, afin de soutenir un fonctionnement fiable du système pendant la durée de vie prévue du fonctionnement sur le terrain.

Dans le premier chapitre on a présenté des généralités sur l'énergie solaire et plus particulièrement le photovoltaïque, les différents types des cellules...etc. le deuxième chapitre a été consacré dans un premier temps, à la modélisation de la cellule PV ainsi que l'hacheur élévateur et la commande de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), par la suite une simulation numérique sous MATLAB/SIMULINK d'un système PV connecté à une charge résistive a été présentée. Les résultats obtenus ont bien montré l'efficacité de la commande de l'incrément de conductance (INC) pour le suivi du point MPP sous l'effet des variations de l'éclairement et de la température.

Les défauts sur les modules individuels d'un système photovoltaïque (PV) peuvent avoir un effet néfaste important sur l'efficacité énergétique et la fiabilité de l'ensemble du système PV. De plus, les défauts des modules PV peuvent créer des risques pour la sécurité du personnel et des risques d'incendie s'ils ne sont pas détectés rapidement. C'est dans ce contexte que le troisième chapitre a été consacré à l'étude et la simulation de différents types des défauts survenant sur les panneaux PV, tels que les défauts de dégradation, de court-circuit, d'ombrage, de circuit ouvert ...etc. la simulation numérique de quelques défauts sous des conditions météorologiques différentes nous a permis à partir des caractéristiques I-V et P-V de les caractériser à partir de la diminution du courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, la puissance au point MPP.

Les défauts dans tous les composants (modules, lignes de connexion, convertisseurs, onduleurs, etc.) des systèmes photovoltaïques peuvent sérieusement affecter l'efficacité, le rendement énergétique ainsi que la sécurité et la fiabilité de l'ensemble de l'installation PV, s'ils ne sont pas détectés et corrigés rapidement. De plus, si certains défauts persistent (par exemple, défaut d'arc, défaut à la terre et défaut de ligne à ligne), ils peuvent entraîner un risque d'incendie. Une attention particulière est portée à la méthode des réseaux de neurones permettant de détecter, localiser et classer avec précision les défauts éventuels survenant dans un système PV. Dans le dernier chapitre et à l'aide de cette technique intelligente, les défauts de

court-circuit, d'ombrage et circuit ouvert ont été bien classifiés, selon un choix judicieux des deux réseaux neuronaux MLP multicouches avec une et quatre sorties. La valeur R proche de 1 du tracé d'entraînement, la matrice de confusion et le ROC pour prédire la sortie désirée, montre que le modèle est entraîné avec succès avec des ensembles de données d'entraînement et d'une précision satisfaisante.

Le travail présenté dans ce mémoire ouvre des voies d'amélioration que l'on peut donner comme suit :

- Utiliser des techniques intelligentes dans un système de diagnostic des défauts telles que la logique floue ou les réseaux neurones pour bien extraire la puissance maximale.
- Elargir la base d'apprentissage du RNA en considérant d'autres types de défauts.
- Appliquer des techniques de réduction de dimensionnalité telles que l'analyse par composante principale (PCA) et l'analyse discriminante linéaire (LDA) pour réduire les dimensions des données d'apprentissage.

## **Bibliographie :**

- [1] : K. Ishaque, Z. Salam, M. Amjad, S. Mekhilef. An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation. IEEE transactions on Power Electronics. Vol 27, pp. 3627-3638, 2012
- [2] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems », Ph.D, P.e U.S merchant Marine Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [3] : D. Delagnes, « Production d'énergie électrique : énergie solaire photovoltaïque ». Revue, juin 2007.
- [4] : H. FATIHA et R. AICHA « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » Mémoire master académique en Electrotechnique universite kasdi merbah ouargla 2014.
- [5] : Anne Labouet et Michel villos, Energie solaire photovoltaïque, Dunod, Paris (France) 2003.
- [6] : E. Becquerel, Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques, Compte Rendu Des Séances L'académie Des Sci. 9 (1839) 145-149.
- [7] : H. Djebbouri, « Le Module PV UDTS-50 : Performances et Dégradation après plus de 25 ans d'utilisation, mémoire de master académique, Université Ahmed draia Adrar, 2017 ».
- [8] : N.Souilamas, "rayonnement solaire et conversion photovoltaïque", école technique de Blida -laboratoire e-learning, 2017 :p. 4-36.
- [9] : M. C. Alonso-García, J. M. Ruiz and W. Herrmann, "Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays," Renewable Energy, vol. 31, pp. 1986-1993, 2006.
- [10] : M.Belhadj ; « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ». Mémoire de magister, Université de Bechar, 2008.
- [11] : V. Tamrakar, S. Gupta, Y. Sawle. Single-diode and two-diode PV cell modeling using Matlab for studying characteristics of solar cell under varying conditions. Electrical & Computer Engineering : An International Journal. Vol 4, pp. 67-77, 2015.
- [12] H. Abbas, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, M. Abid. Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque. Revue des Energies renouvelables. Vol 17, pp. 435-445, 2014.

- [13] : I. Vechiu ; « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome ».Thèse de doctorat, Université du Havre ,2005.
- [14] : V. Salas, E. Olias, A. Barrado,A. Lazaro. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. Solar energy materials solar cells. Vol 90, pp. 1555-1578, 2006;
- [15] : M.R. Sourov, U.T. Ahmed and M.G. Rabbani, 'A High Performance Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power System Using DC-DC Boost Converter', IOSR Journal of Engineering, Vol. 2, N°12, pp. 12 – 20, 2012.
- [16] : L.Bun, "Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV", thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2011.
- [17] : V. Sharma and S.S. Chandel, 'Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: a review', Renewable Sustainable Energy Review, Vol. 27, pp. 753 - 767, 2013. doi:10.1016/j.rser.2013.07.046.
- [18] : M. Cândida, C. de Oliveira, A. Sonia, A. Diniz, M. Viana and V. de Freitas, 'The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: a review', Renewable Sustainable Energy Review, pp. 1 - 19, 2017. doi:10.1016/j.rser.2017.06.039.
- [19] : A. Ricaud ; Photopiles solaire de la physique de conversion photovoltaïque auxiliaires, matériaux et procédées; presses polytechniques et universitaires romandes 1997
- [20] : 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.
- [21] : C. Ventura and G. Marco, 'Development of models for on-line diagnostic and energy assessment analysis of PV power plants : the study case of 1 MW Sicilian, PV plant', Energy Procedia, Vol. 83, pp. 248 - 257, 2015. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.179.
- [22] : S. Hachour, 'Approche décentralisée pour la détection et la localisation de défauts dans une ferme photovoltaïque', Projet de Stage, 2011.
- [23] : B. Bessam,"analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des technique intelligents", Thèse de Doctorat, université de Biskra, 2016.

[24] : S E Gacem, " Identification des systèmes non linéaires par réseaux de neurones", Mémoire magister, université de Biskra ,2015.

[25] : Y.Elmir, H. Boutelli, " Détermination de la tension de seuil d'initiation de la couronne dans le mélange SF<sub>6</sub> – N<sub>2</sub> Par réseaux neurones artificiels" Mémoire de master, université kasdi merbah,Ouargla 2015-2016.

[26] : Radwan Sadouni, « cours commande intelligente »,Université de ghardaia, Janvier 2020.

[27] : Kadem Meriem et Sedik Ratiba, "modelisation et simulation de la commande mppt d'un systeme photovoltaïque a base de reseaux de neurones artificiels", Mémoire de fin d'étude master professionnel, université mouloud mammeri de tizi-ouzou.

[28] : Berchaoua Hicham ,Guerfi abdelkrim et Guaraissa Hamza, "Amélioration le rendement d'un système photovoltaïque autonome par la commande MPPT neuronale", Mémoire de fin d'étude, université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued.

## Résumé :

Le monde ne cesse d'évoluer et ce dans tous les domaines. Cette évolution rapporte une image sur l'excès de consommation d'énergie, ce qui implique la diminution de ressources énergétiques fossiles.

Cela amène à trouver d'autres ressources énergétiques inépuisables, autrement dit renouvelables.

Aux cours des dernières années la production électrique par des installations photovoltaïques a connu un grand progrès. Mais un système photovoltaïque peut être exposé à des défauts durant de leur fonctionnement, ce qui pourrait créer un impact sur ses performances, c'est pourquoi il faut faire un diagnostic afin de les optimiser autant que possible.

**Mots clés :** énergie, ressources énergétiques, fossiles, renouvelables, production électrique, installation photovoltaïque, système photovoltaïque, défauts, diagnostic, optimiser

## Abstract :

The world is constantly changing in all areas. This evolution brings back an image on the excess of energy consumption, which implies the reduction of fossil energy resources.

This leads to finding other inexhaustible energy resources, renewable.

In recent years, the production of electricity by photovoltaic installations has made great progress. But a photovoltaic system can be exposed to faults during their operation, which could create an impact on its performance, which is why it is necessary to make a diagnosis in order to optimize them as much as possible.

**Key words:** energy consumption, fossil energy resources, renewable, the production of electricity, photovoltaic system, energy resources, faults, diagnosis, optimize.

## ملخص:

العالم يتغير بشكل مستمر في جميع المجالات. لهذا التطور صورة على كمية استهلاك الطاقة، مما يؤدي لتقليل موارد الطاقة الأحفورية.

هذا يستلزم إيجاد موارد طاقة أخرى لا تنضب، بمعنى آخر متجددة.

في السنوات الأخيرة، حقق إنتاج الكهرباء من خلال الأنظمة الكهروضوئية تقدماً كبيراً. لكن يمكن أن يتعرض النظام الكهروضوئي للأعطال أثناء تشغيله، مما قد يؤدي إلى إحداث تأثير على أدائه، ولهذا السبب من الضروري إجراء التشخيص من أجل تحسينها قدر الإمكان.

**كلمات مفتاحية:** استهلاك الطاقة، الطاقة الأحفورية، متجددة، إنتاج الكهرباء، الأنظمة الكهروضوئية، الأعطال، التشخيص