

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj  
Faculté des Sciences et de la Technologie



## THÈSE

Présentée pour l'obtention du **diplôme** de **DOCTORAT** 3<sup>ème</sup> cycle

**En** : Elctrotechnique

**Spécialité** : **Electrotechnique Industrielle**

**Par** : TATI Fethallah

## Sujet

**Commande MPPT et contrôle d'un système  
photovoltaïque en tenant compte des défauts :  
détection et localisation**

Soutenue publiquement, le 29/04/2024, devant le jury composé de :

M. HAMIMID Mourad	Professeur	à l'U. BBA	Président
M. TALHAOUI Hicham	Professeur	à l'U. BBA	Directeur de thèse
M. KESSAL Abdelhalim	Professeur	à l'U. BBA	Examineur
M. BERRABAH Fouad	Professeur	à l'U. M'sila	Examineur
M. BENSALFIA Yassine	Professeur	à l'U. Bouira	Examineur
M. AISSA Oualid	Maître de Conférences A	à l'U. BBA	Invité

# Dédicaces

Louange à Dieu Tout-Puissant qui m'a permis de voir ce jour tant attendu. Les mots ne pourront peut-être pas exprimer la gratitude et la sincérité, envers mes chers parents à qui je dédie cette thèse.

A mes chères frères, Mohamed laid, Abderrazak  
et Zinelabidine

A mes chères sœurs, leurs maris et leurs enfants  
pour leurs aides et tous support dans les moments  
difficiles,

A ma chère grand-mère,  
à qui je souhaite une bonne santé, A toute ma  
famille.

A tous mes chers amis et mes collègues,  
pour leur soutien moral, encouragement et  
conseils précieux tout au long de mes études.

# Remerciements

Au terme de ce travail, mes remerciements vont premièrement et avant tout à notre Créateur **ALLAH** qui nous a donné le pouvoir, la patience, la volonté et l'énergie pour mener à bien ce travail. Je tiens également à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à y parvenir dans les meilleures circonstances possibles.

Tout d'abord, je suis extrêmement reconnaissant à mon superviseur, le professeur TALHAOUI Hicham, pour ses précieux conseils, son soutien continu et sa patience tout au long de mon doctorat. Ses immenses connaissances et sa grande expérience m'ont encouragé tout au long de mes recherches universitaires et dans ma vie quotidienne.

Je tiens également à exprimer ma gratitude aux membres du jury de thèse de doctorat : Prof. HAMIMID Mourad, Prof. KESSAL Abdelhalim, Prof. BERRABAH Fouad, Prof. BENSAFIA Yassine et Dr. AISSA Oualid, merci pour votre temps et vos efforts, pour vos précieux commentaires et vos questions qui suscitent la réflexion. Vos idées ont grandement enrichi la qualité de mon travail.

Mes plus sincères remerciements vont également à ma famille et à ma mère qui m'ont soutenu et qui ont toujours été là.

Enfin, je tiens à exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail.

## ملخص

لقد أثبتت تكنولوجيا الألواح الكهروضوئية إمكاناتها الكبيرة كمصدر مهم للطاقة المتجددة، وهذا ما يؤكد التوجه الوطني وكذا العالمي نحو استخدام هذا المصدر وتوسيع انتشاره كذلك في العديد من التطبيقات الصناعية و اليومية. من أجل تحسين مردودية الطاقة المنتجة من الألواح الكهروضوئية، هناك عدة تقنيات و طرق تم استعمالها أهمها التحكم بتقنية تتبع نقطة الطاقة القصوى. في هذه الأطروحة، تم تقديم تقنية متقدمة تعتمد على استراتيجيتين مندمجتين، وضع الانزلاق-المنطق الغامض. ورغم ذلك، فإن هناك العديد من العوامل التي قد تؤدي إلى تعطل الأنظمة الكهروضوئية وتدهور كفاءتها أثناء تشغيلها. وهذا يتطلب إيجاد طرق لتشخيص و تحديد هذه العيوب و دراسة تأثيرها على أداء النظام. تمت معالجة بعض العيوب في هذا البحث وهي كالاتي: التظليل الجزئي، قصر الدائرة، الدائرة المفتوحة، المقاومة التسلسلية، ومقاومة التوازي. في دراسات سابقة، تم استخدام العديد من الطرق لتشخيص الأخطاء واكتشافها في النظام الكهروضوئي. وفي هذه الأطروحة، نحن مهتمون بشكل خاص بتعظيم الطاقة التي ينتجها النظام الكهروضوئي، مع اكتشاف وتحديد الأعطال في هذا النظام. يتم تشخيص العيوب وتحديد استخدامها باستخدام طريقتين ذكيتين: الشبكة العصبية الاصطناعية والخلايا العصبية الغامضة.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقات المتجددة ، الألواح الكهروضوئية ، النقطة الأعظمية للطاقة ، تشخيص الأعطال ، الشبكات العصبية ، التظليل الجزئي.

## Abstract

Photovoltaic panel technology has proven its great potential as an important source of renewable energy, which is confirmed by the national and global trend to use this source and extend its diffusion in many industrial and everyday applications. To improve the energy efficiency produced by photovoltaic panels, several techniques and methods have been used, the most important being MPPT control, which tracks the point of maximum power. In this thesis, an advanced MPPT technique based on two combined sliding mode-fuzzy logic strategies has been presented. However, many factors can lead to the failure of photovoltaic systems and the deterioration of their efficiency during operation. Methods must therefore be found to diagnose and identify these faults and study their impact on system performance. Some of the faults dealt with in this research work are: partial shading, short-circuit, open circuit, series resistance and parallel resistance. In previous studies, numerous methods have been used to diagnose and detect faults in a photovoltaic system. In this thesis, we are particularly interested in maximizing the energy produced by a photovoltaic system, while detecting and identifying faults in this system. Faults are diagnosed and identified using two intelligent methods: the artificial neural network and the neuro-fuzzy.

**Keywords:** Renewable energies, photovoltaic panels, MPP, fault diagnosis, neural networks, partial shading.

## Résumé

La technologie des panneaux photovoltaïques a prouvé son grand potentiel en tant que source importante d'énergie renouvelable, ce qui est confirmé par la tendance nationale et mondiale à utiliser cette source et à étendre sa diffusion dans de nombreuses applications industrielles et quotidiennes. Afin d'améliorer l'efficacité énergétique produite par les panneaux photovoltaïques, plusieurs techniques et méthodes ont été utilisées, la plus importante étant le contrôle MPPT qui permet de suivre le point de puissance maximale. Dans cette thèse, une technique MPPT avancée basée sur deux stratégies combinées mode glissant-logique floue a été présentée. Cependant, de nombreux facteurs peuvent conduire à la défaillance des systèmes photovoltaïques et à la détérioration de leur efficacité au cours de leur fonctionnement. Il faut donc trouver des méthodes pour diagnostiquer et identifier ces défauts et étudier leur impact sur les performances du système. Certains défauts ont été traités dans ce travail de recherche, à savoir : l'ombrage partiel, le court-circuit, le circuit ouvert, résistance série et celui de la résistance parallèle. Dans les études précédentes, de nombreuses méthodes ont été utilisées pour diagnostiquer et détecter les défauts d'un système photovoltaïque. Dans cette thèse, on s'intéresse particulièrement à la maximisation de l'énergie produite par un système photovoltaïque, tout en détectant et en identifiant les défauts de ce système. Les défauts sont diagnostiqués et identifiés à l'aide de deux méthodes intelligentes qui sont : le réseau de neurones artificiels et le neuro-flou.

**Mots Clés :** Énergies renouvelables, panneaux photovoltaïques, MPP, diagnostic de défauts, réseaux neuronaux, ombrage partiel.

# Table des matières

Table des figures	i
Liste des tableaux	iv
Nomenclature	v
Introduction Générale	1
<b>1 Généralités sur les panneaux photovoltaïques</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	5
1.2 Sources d'énergies renouvelables . . . . .	5
1.2.1 Energie éolienne . . . . .	7
1.2.2 Hydroélectricité . . . . .	8
1.2.3 Biomasse . . . . .	8
1.2.4 Energie géothermique . . . . .	9
1.2.5 Energie solaire . . . . .	9
1.3 Energie solaire en Algérie . . . . .	11
1.4 Historique de la technologie photovoltaïque . . . . .	12
1.5 Types des cellules photovoltaïques . . . . .	12
1.5.1 Cellules de silicium cristallin . . . . .	13
1.5.2 Cellules à base de couches minces . . . . .	15
1.5.3 Cellules de troisième génération . . . . .	17
1.6 Développement du rendement des panneaux solaires . . . . .	17
1.7 Principe de la conversion de l'énergie solaire . . . . .	18
1.8 Modélisation des panneaux solaires . . . . .	20
1.9 Influence de la température et de l'éclairement . . . . .	21
1.9.1 Influence de l'éclairement . . . . .	21
1.9.2 Influence de la température . . . . .	22
1.10 Association en série et en parallèle de cellules photovoltaïques . . . . .	23

---

1.10.1	Association en série . . . . .	23
1.10.2	Association en parallèle . . . . .	24
1.10.3	Association en série et en parallèle . . . . .	25
1.11	Conclusion . . . . .	26
<b>2</b>	<b>Poursuite du point de puissance maximale</b>	<b>27</b>
2.1	Introduction . . . . .	28
2.2	Connection directe . . . . .	29
2.3	Convertisseurs statiques . . . . .	29
2.4	Convertisseurs statiques DC-DC . . . . .	30
2.4.1	Hacheur abaisseur (Buck converter) . . . . .	30
2.4.2	Hacheur élévateur (Boost Converter) . . . . .	31
2.4.3	Convertisseurs abaisseur-élévateur (Buck-Boost DC-DC) . . . . .	32
2.5	Caractéristiques importantes . . . . .	33
2.5.1	Rendement . . . . .	34
2.5.2	Température . . . . .	34
2.5.3	Tension d'entrée et de sortie . . . . .	34
2.5.4	Taille, poids et modernité . . . . .	34
2.6	Poursuite du point de puissance maximale . . . . .	34
2.7	Méthodes MPPT . . . . .	35
2.7.1	Méthodes classiques . . . . .	35
2.7.2	Méthode intelligente . . . . .	37
2.7.3	Méthode hybride . . . . .	41
2.7.4	Autres méthodes . . . . .	43
2.8	Résultats de simulation . . . . .	45
2.9	Conclusion . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Défauts associés aux systèmes photovoltaïques</b>	<b>53</b>
3.1	Introduction . . . . .	54
3.2	Terminologie du diagnostic . . . . .	54
3.3	Classifications des défauts dans les systèmes . . . . .	55
3.3.1	Défaut de point chaud . . . . .	57
3.3.2	Dégradation . . . . .	58
3.3.3	Ombrage partiel . . . . .	58
3.3.4	Défaut de court-circuit . . . . .	59
3.3.5	Défaut de mise à la terre . . . . .	60
3.3.6	Défaut d'arc . . . . .	60

3.3.7	Défaut de ligne à ligne . . . . .	61
3.3.8	Défaut de circuit ouvert . . . . .	61
3.3.9	Défaut de la diode de by-pass . . . . .	61
3.3.10	Défauts dans la boîte de jonction . . . . .	62
3.3.11	Défaut de MPPT . . . . .	62
3.4	Méthodes de détection des défauts . . . . .	62
3.4.1	Méthode visuelle . . . . .	63
3.4.2	Méthodes non électriques . . . . .	63
3.4.3	Méthode électrique . . . . .	65
3.4.4	Méthodes basées sur des techniques d'intelligence artificielle . . . . .	66
3.5	Conclusion . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Détection des défauts dans les systèmes photovoltaïques</b>	<b>68</b>
4.1	Introduction . . . . .	69
4.2	Détection des défauts d'ombrage partiel à l'aide d'une technique de réseau neuronal artificiel . . . . .	69
4.2.1	Réseau de neurones artificiels . . . . .	69
4.2.2	Simulation du modèle de panneau par RNA . . . . .	70
4.2.3	Description du système de diagnostic . . . . .	71
4.3	Méthode proposée . . . . .	73
4.3.1	Création de résidus . . . . .	74
4.3.2	Prétraitement et validation des données . . . . .	75
4.3.3	Architecture du système de diagnostic de défaut proposé . . . . .	76
4.3.4	Phase de détection . . . . .	79
4.3.5	Phase de classification . . . . .	79
4.4	Détection des défauts dans le panneau photovoltaïque à l'aide de la technique des Neuro-Flous (ANFIS) . . . . .	87
4.4.1	Introduction . . . . .	87
4.4.2	Architecture d'un réseau de neurones flous . . . . .	87
4.4.3	Description du système de détection . . . . .	88
4.4.4	Résultats et discussions . . . . .	90
4.5	Conclusion . . . . .	94
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>95</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>97</b>

# Table des figures

1.1	Sources d'énergies renouvelables . . . . .	6
1.2	Statistiques de la capacité internationale de la production des énergies électriques de différents types des sources renouvelables entre 2019 et 2021 . . .	6
1.3	Capacité éolienne mondiale dans le scénario net zéro, 2010-2030 . . . . .	7
1.4	Applications de l'énergie solaire thermique . . . . .	10
1.5	Catégories de cellules photovoltaïques . . . . .	13
1.6	Cellules polycristallins . . . . .	14
1.7	Cellules monocristallins . . . . .	14
1.8	Cellules à base de couches minces . . . . .	16
1.9	Développement de l'efficacité des modules Monocristallines . . . . .	18
1.10	Principe de la jonction P-N . . . . .	20
1.11	Schéma équivalent d'une cellule solaire . . . . .	20
1.12	Influence de l'irradiation sur les caractéristiques I-V (a) et P-V (b) . . . . .	22
1.13	Influence de la température sur les caractéristiques I-V (a) et P-V (b) . . . . .	22
1.14	Raccordement des modules en série . . . . .	23
1.15	Association série des modules . . . . .	24
1.16	Raccordement des modules en parallèle . . . . .	24
1.17	Association parallèle des modules . . . . .	25
1.18	structure générale de l'association série parallèle . . . . .	25
1.19	Association série parallèle des modules . . . . .	26
2.1	Description du système photovoltaïque . . . . .	28
2.2	Connection directe panneau-charge . . . . .	29
2.3	Différents types de convertisseurs statiques . . . . .	30
2.4	Schéma équivalent d'un hacheur abaisseur (Buck converter) . . . . .	31
2.5	Séquences de fonctionnement du hacheur abaisseur . . . . .	31
2.6	Schéma équivalent d'un hacheur élévateur (Boost converter) . . . . .	32
2.7	Séquences de fonctionnement du hacheur élévateur . . . . .	32

2.8	Schéma équivalent d'un convertisseurs abaisseur- élévateur (Buck-Boost)	33
2.9	Séquences de fonctionnement du hacheur abaisseur- élévateur	33
2.10	Classification des différents types de commandes MPPT	35
2.11	Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O	36
2.12	Différentes valeurs de pas avec irradiation de 1000 W/m <sup>2</sup> et température 25°C	37
2.13	Structure générale d'un contrôleur MPPT flou	38
2.14	Résultat de simulation d'un MPPT utilisant la SMC	40
2.15	Schéma équivalent de la commande AFSCM	43
2.16	Hierarchie sociale du loup gris	44
2.17	Schéma bloc présentant les différentes parties du système photovoltaïque	46
2.18	Différentes valeurs de gain (k)	47
2.19	Comparaison entre la méthode SMC et la méthode AFSCM	49
2.20	Scénario de changement des valeurs d'irradiation sans changement de la valeur de la température	49
2.21	Test de performance en cas de changement des valeurs d'irradiation	50
2.22	Scénario de modification des valeurs de température sans modification de la valeur d'irradiation	50
2.23	Test de performance en cas de changement des valeurs de température	51
2.24	Test de variation de la valeur de charge	51
3.1	Classification des différents types des défauts Pv	56
3.2	Caractéristiques I-V & P-V des différents types des défauts PV	57
3.3	Caractéristiques I-V & P-V durant l'ombrage partiel	59
3.4	Caractéristiques P-V et I-V du panneau photovoltaïque en bon état et avec le défaut (C-C)	60
3.5	Caractéristiques P-V et I-V du panneau photovoltaïque en bon état et avec le défaut	61
3.6	Diagramme des différentes méthodes de détection des défauts	63
4.1	Structure du modèle PV basé sur RNA	70
4.2	Comparaison entre le panneau photovoltaïque et le modèle RNA	71
4.3	Structure générale du système de diagnostic proposé	72
4.4	Organigramme général du système de diagnostic proposé	74
4.5	Schéma de la procédure de diagnostic	75
4.6	Organigramme du modèle photovoltaïque par RNA	76
4.7	Diagramme du réseau neuronal pour le diagnostic des défauts d'ombrage	77

4.8	Architecture proposée pour le système de diagnostic des défauts . . . . .	77
4.9	Présentation du paramètre de corrélation R . . . . .	78
4.10	Performance du système de détection neuronal proposé . . . . .	79
4.11	Résultats de la simulation pour quatre pourcentages d'ombrages partiels différents : (a) 0%, (b) 20%, (c) 40% et (d) 60% d'ombrage, avec Irr égal à 1000 W/m <sup>2</sup> et T= 25 °C . . . . .	80
4.12	Divers signes pour un certain pourcentage des ombrages partiels : (a) 0% ombrage, (b) 20% ombrage, (c) 40% ombrage et (d) 60% ombrage . . . . .	80
4.13	Valeurs de sortie 1 et de sortie 2 lors du premier test . . . . .	81
4.14	Simulation des cas de défauts pour 0% d'ombrage et 40% d'ombrage, avec : Irr de référence égal à 723 W/m <sup>2</sup> et 30 °C . . . . .	82
4.15	Erreurs pour les valeurs de la sortie 1 et de la sortie 2 dans le 2ème test . .	82
4.16	Simulation des cas de défauts pour (0, 20 et 40%) avec : Irr de référence égal à 457 W/m <sup>2</sup> et 35 °C . . . . .	83
4.17	Erreurs pour les valeurs de la sortie 1 et de la sortie 2 dans le 3ème test . .	83
4.18	Simulation des défauts pour quatre cas différents d'ombrage partiel (0, 20, 40, 60%), avec : Irr de référence égal à 862 W/m <sup>2</sup> et 27 °C . . . . .	84
4.19	Erreurs pour les valeurs de la sortie 1 et de la sortie 2 dans le 4ème test . .	84
4.20	Architecture d'un réseau de neurones flous . . . . .	88
4.21	Structure générale du système photovoltaïque et diagnostic . . . . .	89
4.22	Conception du système de détection des défauts . . . . .	90
4.23	Signaux de puissance de sortie pour : simulateur de défaut, panneau PV avec défaut, panneau PV sain . . . . .	91
4.24	Erreur entre le PV avec défaut et le simulateur de défaut . . . . .	91
4.25	Signaux de défaut (sortie) -Essai 1- . . . . .	92
4.26	Signaux de défaut (sortie) -Essai 2- . . . . .	93
4.27	Détection de défaut Rs par le mécanisme de détection intelligent proposé .	93
4.28	Détection de défaut C-O par le mécanisme de détection intelligent proposé	94

# Liste des tableaux

1.1	L'efficacité des cellules et modules photovoltaïques . . . . .	18
2.1	Étude comparative avec les travaux de recherche existants dans la littérature . . . . .	48
4.1	Étude comparative avec les travaux de recherche existants dans la littérature	85
4.2	Nouvelles techniques de diagnostic dans un système photovoltaïque et résultats attendus . . . . .	86
.3	Paramètres du module photovoltaïque . . . . .	A

# Nomenclature

<i>ABC</i>	Artificial Bee Colony (Algorithme de colonie d'abeilles artificielles)
<i>AC</i>	Alternating Current (Courant Alternatif)
<i>AFSMC</i>	Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control (Commande adaptative par mode glissant)
<i>AG</i>	Algorithme génétique
<i>AI</i>	Artificial Intelligence (Intelligence Artificielle)
<i>ANFIS</i>	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (système d'inférence neuro-floue adaptatif )
<i>C – C</i>	Court Circuit
<i>C – O</i>	Circuit Ouvert
<i>CdTe</i>	Cadmium telluride (Tellurure de cadmium)
<i>CIGS</i>	Séléniure de Cuivre-Indium-Gallium
<i>CSCM</i>	Cellule Solaire à Couches Minces
<i>CSP</i>	Concentrated solar power system (Système solaire thermique à concentration)
<i>DC</i>	Direct current (Courant continu)
$E_g$	Energie de Gap [ev].
<i>B</i>	Facteur d'idéalité de la jonction
<i>FLC</i>	Fuzzy Logic Control (Commande par logique floue)
<i>FPSO</i>	Fuzzy Particle Swarm Optimization Algorithm (Optimisation par essais de particules floues)
$\alpha_{sc}$	Coefficient de température de $I_{sc}$

<i>GWO</i>	Grey Wolf Optimizer (Optimisation de loup gris)
<i>I – V</i>	Courant - Tension
<i>I<sub>RNA</sub></i>	Courant du modèle RNA
<i>IC</i>	Incremental/Conductance
<i>IEC</i>	International Electrotechnical Commission (Commission Internationale d'Electrotechnique )
<i>IFAC</i>	International Federation of Automatic Control
<i>V<sub>mpp</sub></i>	Courant de sortie au MPP du générateur PV
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point Tracking (Suivi du point de puissance maximale)
<i>OSC</i>	Organic solar cell (Cellule solaire organique)
<i>P – V</i>	Puissance - Tension
<i>P&amp;O</i>	Perturbation & observation
<i>P<sub>s</sub></i>	Partial Shading (Ombrage Partiel)
<i>PSO</i>	Particle Swarm Optimization (Optimisation par Essaim de Particules)
<i>PV</i>	Photovoltaïque
<i>PVM</i>	Photovoltaic module (Module Photovoltaïque)
<i>R<sub>sh</sub></i>	Résistance parallale
<i>R<sub>s</sub></i>	Résistance série
<i>RNA</i>	Réseau de neurones artificiels
<i>I<sub>or</sub></i>	Courant de court-circuit de la cellule pour une température et un éclai- rement de référence (1000 W/m <sup>2</sup> et 25 °C )
<i>I<sub>d</sub></i>	Courant passant dans la diode
<i>G</i>	Eclairement sur la surface de la cellule
<i>G<sub>r</sub></i>	Eclairement de référence (1000 W/m <sup>2</sup> )
<i>I<sub>rr</sub></i>	Irradiation solaire
<i>I<sub>sc</sub></i>	Courant du court-circuit (short-circuit current)
<i>MLI</i>	Modulation de largeur d'impulsion

$PVG$	Photovoltaic Generator (Générateur photovoltaïque)
$Temp$	Température ambiante
$T_{cell}$	Température de la surface de la cellule
$T_{ref}$	Température de référence (25 °C)
$\Delta I$	Ecart du courant enregistré entre le système réel et le modèle RNA proposé
$\Delta V$	Ecart de tension enregistrée entre le système réel et le modèle RNA proposé
$SMC$	Sliding Mode Control (Commande par mode glissant)
$V_{pv}$	Tension de sortie du panneau
$V_{RNA}$	Tension du modèle RNA
$V_{mpp}$	Tension de sortie au MPP du générateur PV

# Introduction Générale

Ces dernières années, la sécurité énergétique est devenue un défi pour les gouvernements du monde entier, en raison de la disponibilité limitée des ressources traditionnelles et de la demande croissante d'énergie électrique. Cet intérêt a incité les chercheurs à rechercher et à découvrir de nouvelles sources d'énergie électrique de nature renouvelable, telles que l'énergie éolienne, la biomasse, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et l'énergie solaire [1].

De nombreux pays dans le monde ont adopté une politique de recours aux énergies renouvelables afin de mettre fin à l'utilisation des combustibles fossiles, de diversifier les sources d'énergie et de réduire les émissions de dioxyde de carbone [2,3]. Les installations photovoltaïques, considérées comme l'une des principales sources d'énergie renouvelable, se sont répandues dans le monde entier grâce à leur simplicité et à leur durabilité [4,5].

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue en convertissant la lumière du soleil en électricité grâce à une technologie basée sur l'effet photoélectrique. Cette forme d'énergie renouvelable, inépuisable et non polluante, peut être produite dans des installations composées de petits générateurs pour l'autoconsommation ou dans de grandes centrales photovoltaïques.

Les systèmes d'énergie solaire sont encore inefficaces et leur coût par kilowattheure (kwh) sont souvent trop élevés pour être compétitifs par rapport aux combustibles fossiles, ce qui constitue le problème fondamental de la technologie des panneaux solaires.

L'enjeu mondial de ce domaine se traduit par un développement rapide de la production de panneaux solaires. Plusieurs générations de panneaux de conception et de matériaux différents ont été fabriquées pour obtenir d'excellents rendements. De plus, ces tailles et formes sont adaptables à différentes applications.

Dans le cas d'une connexion directe (générateur photovoltaïque - charge), le taux de conversion énergétique de la technologie actuelle des cellules est insuffisant ; elles ne transmettent qu'environ 30 % [6], les 70 % restants étant considérés comme des pertes d'énergie. La technique MPPT permet d'utiliser la puissance maximale fournie par le panneau solaire à un moment donné afin de réduire cette perte d'énergie importante.

Il existe de nombreuses techniques d'optimisation (MPPT), qui diffèrent des techniques classiques et d'autres techniques avancées. D'autre part, malgré les nombreux avantages de ce type d'énergie (énergie solaire) et sa diffusion rapide, elle est confrontée à un certain nombre de défis représentés par des problèmes dans le système solaire et ses composants.

Dans de nombreux domaines technologiques, des avancées significatives peuvent être observées dans le domaine du diagnostic et de la détection des défauts. En outre, l'un des secteurs les plus importants à bénéficier de ces avancées est celui des énergies renouvelables en général et de l'énergie solaire en particulier. Cela s'explique par la diversité des objectifs et des utilisations de ce type d'énergie. L'adoption généralisée des centrales solaires est un indicateur fort de la tendance apparente à investir dans les énergies vertes et renouvelables.

Différentes techniques de détection sont utilisées dans le domaine du diagnostic. Certaines techniques peuvent être considérées comme des techniques classiques et d'autres comme des techniques modernes. Cette classification dépend de la technique utilisée. Principalement, toutes les techniques classiques sont basées sur les compétences acquises par les agents et les employeurs. En revanche, les techniques modernes s'appuient sur des outils informatiques et des algorithmes d'intelligence artificielle. Chaque technique se distingue des autres en fonction des résultats fournis, de la précision et de la rapidité de l'identification des défauts.

Le défaut le plus courant par rapport aux autres défauts est le défaut d'ombrage partiel, en raison de son occurrence répandue et fréquente dans diverses installations photovoltaïques. Malgré la simplicité de ce dernier, il peut causer de nombreux problèmes et dysfonctionnements qui vont de problèmes mineurs à des incendies. Une technique intelligente est proposée dans cette thèse pour déterminer le pourcentage d'ombrage en temps réel, afin de réduire et de prédire les dysfonctionnements du système. Cette thèse propose également une technologie hybride basée sur l'intelligence artificielle pour détecter plusieurs défauts que peuvent présenter les panneaux photovoltaïques.

Cette thèse est divisée en quatre parties :

La première partie est consacrée à la technologie photovoltaïque générale et aux différents types de cellules solaires.

La deuxième partie traite de l'aspect commande du système, qui s'appuie sur des convertisseurs statiques pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT). Le convertisseur DC-DC élévateur est utilisé dans cette thèse avec un contrôle MPPT hybride qui est appelé comme suit Commande adaptative floue par mode glissant, afin d'obtenir de meilleurs résultats en ce qui concerne la maximisation de l'énergie fournie par le module photovoltaïque.

La troisième partie est consacrée à la détection de divers défauts associés au système photovoltaïque avec discussion de quelques méthodes de détection de ces défauts.

Dans la dernière partie, on a proposé deux techniques de détection des défauts. La première méthode consiste à détecter les défauts d'ombrage et s'appuie sur des algorithmes d'intelligence artificielle pour déterminer le pourcentage d'ombrage. La seconde méthode est une méthode hybride qui s'appuie également sur des algorithmes d'intelligence artificielle pour détecter la présence de certains types de défauts et déterminer leur type dans le panneau photovoltaïque. Enfin, on termine par une conclusion générale et quelques perspectives.

# Chapitre 1

## Généralités sur les panneaux photovoltaïques

## 1.1 Introduction

Le domaine des énergies renouvelables est l'un des domaines qui a connu un développement très rapide et important, en raison de l'importance de l'énergie dans la vie humaine et de la diversité de ses applications.

Il existe de nombreux types d'énergie renouvelable, notamment l'énergie éolienne, l'hydroélectricité, la biomasse, etc. Toutes les énergies renouvelables jouent un rôle important dans la préservation de l'environnement et la réduction de la pollution en général, ainsi que dans l'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> [3]. En outre, certains types de cette énergie peuvent être utilisés dans des endroits isolés et sur des terrains difficiles en tant que ressources durables. En effet, il est difficile d'approvisionner ces zones en énergie par les méthodes traditionnelles (réseaux interconnectés).

Le photovoltaïque est la source d'énergie la plus utilisée par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables [4]. Cette utilisation généralisée de cette énergie est due à plusieurs facteurs, dont le plus important est que ce type d'énergie est disponible pratiquement partout dans le monde et que sa production est moins coûteuse que la production d'autres énergies renouvelables. De plus, les équipements électriques destinés à ce type d'énergie peuvent être facilement transportés et peut être considéré comme une source d'énergie mobile.

La technologie photovoltaïque a connu plusieurs phases ou générations de progrès technologiques, chaque génération s'appuyant sur la précédente en termes de matières premières utilisées dans la production ou la fabrication des panneaux.

Dans ce chapitre, un aperçu de la technologie photovoltaïque est fourni. Ce chapitre aborde d'abord les points suivants : les types d'énergies renouvelables, l'évolution de la technologie des cellules photovoltaïques, les types de cellules photovoltaïques, l'effet de la température et du rayonnement sur les cellules photovoltaïques, le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques. Les panneaux solaires sont ensuite modélisés et simulés afin de connaître leur comportement. Enfin, ce chapitre se termine par une conclusion.

## 1.2 Sources d'énergies renouvelables

Les sources d'énergies renouvelables varient en fonction de leur source naturelle. L'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse, l'énergie géothermique et l'énergie solaire figurent parmi les sources d'énergie renouvelable les plus populaires, comme le montre la Figure. 1.1.

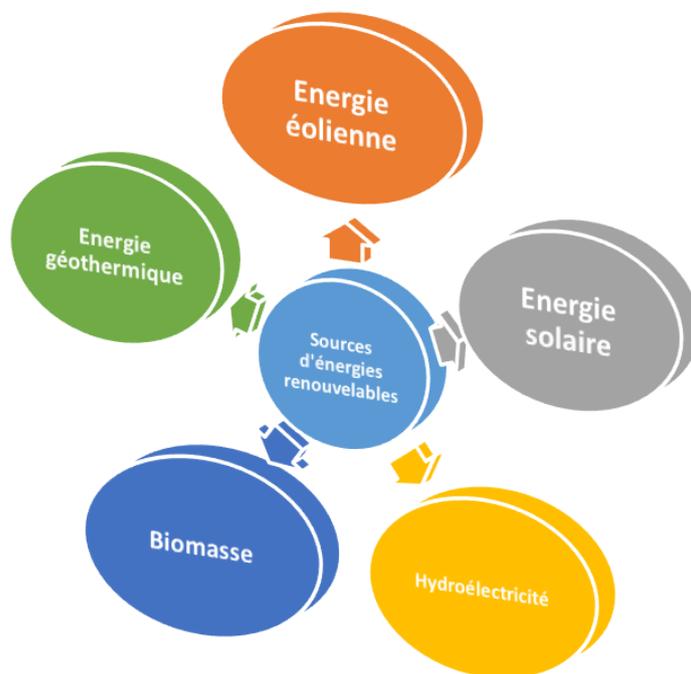


Figure 1.1: Sources d'énergies renouvelables

La référence [7] a mentionné que; la capacité de production d'électricité au niveau mondial à partir de diverses sources d'énergies renouvelables entre 2019 et 2021 est présentée dans Figure. 1.2.

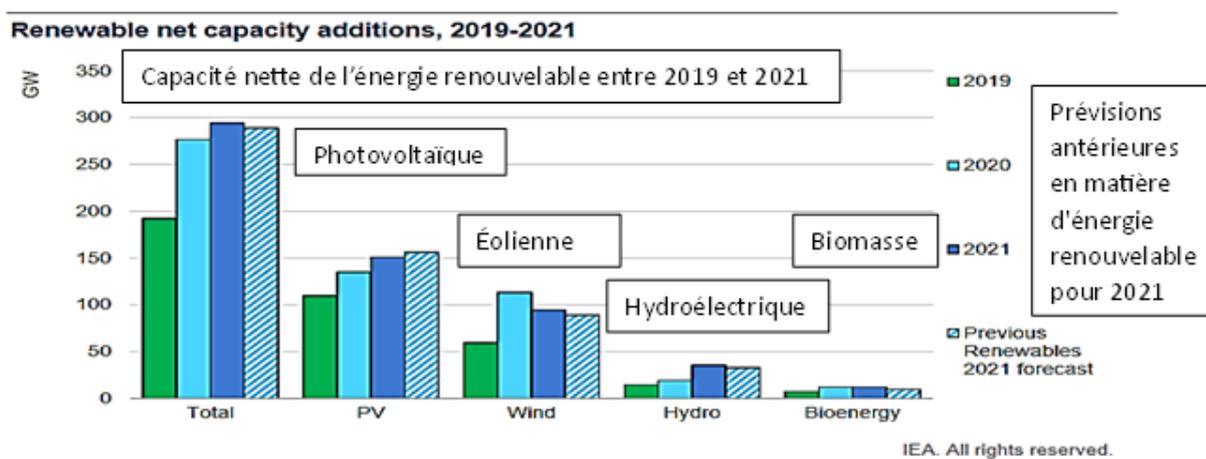


Figure 1.2: Statistiques de la capacité internationale de la production des énergies électriques de différents types des sources renouvelables entre 2019 et 2021

### 1.2.1 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est produite à l'aide de turbines, qui utilisent un mécanisme de conversion pour transformer le vent en électricité. Le mouvement de l'air et le réchauffement inégal de la terre par le soleil produisent des régions de température et de pression atmosphérique différentes, qui à leur tour produisent des vents [8]. La quantité extraite par l'énergie du vent à l'aide d'éolienne est très importante et très rentable par rapport à l'espace occupé. Où, la quantité d'énergie produite par une éolienne varie en proportion directe de la force du vent. Additivement, la puissance des machines varie de quelques dizaines de watts à plusieurs mégawatts, et les diamètres d'environ 1 mètre à plus de 100 mètres. Principalement, les éoliennes sont installées dans des champs de vent bien étudiés, généralement situés sur des terres ouvertes, sur des crêtes de montagnes ou au large des lacs ou de l'océan. Il peut être placé soit en pleine mer, soit sur des zones plates [9].

La Figure. 1.3 représente la capacité mondiale de production d'énergie éolienne en pleine mer ou sur des étendues plates, selon l'auteur dans [10], avec une prévision de la quantité d'énergie produite en 2030.

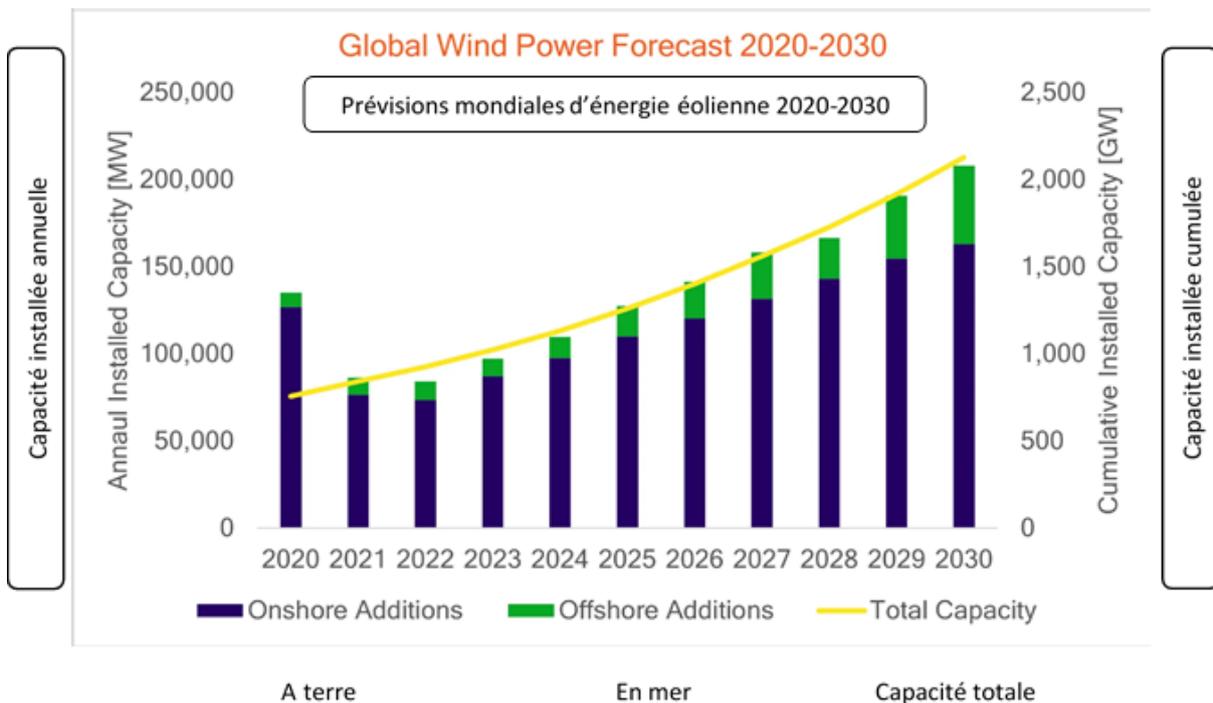


Figure 1.3: Capacité éolienne mondiale dans le scénario net zéro, 2010-2030

D'un autre côté, certains parcs éoliens peuvent générer un certain impact sur l'environnement, soit sur les humaines à travers une pollution sonore, ce qui affecte directement la population proche de lui, soit encore sur la nature en provoquant le décès d'oiseaux. Mais

certaines chercheurs dans ce domaine ont proposé des solutions pour réduire la pollution issue de l'énergie éolienne [11].

### 1.2.2 Hydroélectricité

L'énergie hydroélectrique est considérée comme l'une des énergies renouvelables les plus connues avant les années 90 [12], et elle est considérée comme une source d'énergie vitale. Le principe de fonctionnement de cette énergie est de convertir l'énergie de l'eau courante en électricité en faisant couler l'eau d'altitudes plus élevées vers des altitudes plus basses. Où, l'eau tombée entraîne une turbine qui convertit le mouvement en électricité. Parmi les principales sources de production de cette énergie figurent les barrages, les vagues et les marées.

Ce type d'énergie se caractérise par de bons rendements et de faibles impacts environnementaux, notamment dans la production de dioxyde de carbone. Investir dans ce type d'énergie est très intéressant, notamment dans les zones riches en barrages par exemple [13].

L'un des inconvénients les plus importants de ce type d'énergie est qu'elle est liée à de grands systèmes (machines) qui nécessitent des investissements très importants et élevés. Nous constatons également qu'elle provoque des changements dans les systèmes environnementaux (écologiques), qui à leur tour affectent directement les animaux et les plantes qui vivent dans ces lieux [9].

### 1.2.3 Biomasse

Le principe de la biomasse est la transformation de divers déchets en différentes formes d'énergies, telles que la création de chaleur, d'électricité ou de gaz combustible. Les cultures, les déchets et les autres ressources biologiques sont exploités pour produire de l'énergie et d'autres produits sans avoir recours aux combustibles fossiles [14].

Certaines des matières premières de biomasse les plus courantes (et / ou les plus prometteuses) sont : grains et amidons, résidus agricoles, déchets alimentaires, sous-produits d'animaux, cultures énergétiques, déchets urbains, etc....

Comme les autres sources d'énergie, ce type d'énergie présente des avantages et des inconvénients, dont les plus courants sont la fiabilité, la disponibilité et la réduction des déchets. D'autre part, le coût élevé de la récolte et du transport des matériaux issus de la biomasse doit être pris en compte [11].

### 1.2.4 Energie géothermique

L'énergie géothermique est la chaleur que le sous-sol terrestre irradie vers la surface. L'eau ou la vapeur sont deux moyens par lesquels l'énergie géothermique peut être transportée à la surface de la terre [15]. Selon ses caractéristiques, l'énergie géothermique peut produire de l'électricité propre ou être utilisée pour le chauffage et le refroidissement.

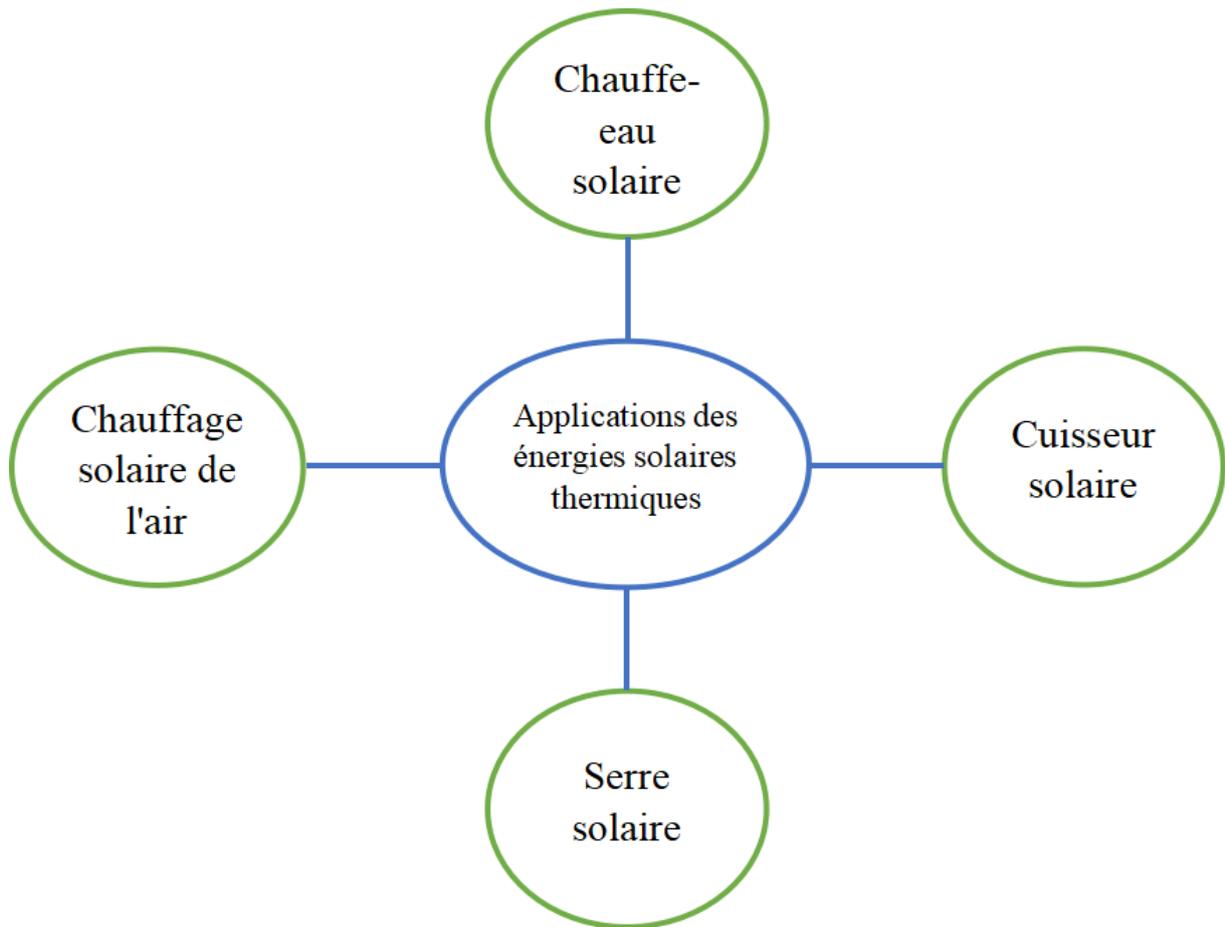
De nombreux avantages caractérisent ce type d'énergie. Le principal est qu'il ne dépend pas des conditions météorologiques. De plus, il est renouvelable, et a un énorme potentiel car on estime actuellement que l'énergie géothermique peut fournir une énorme quantité d'énergie : les centrales géothermiques peuvent fournir entre 0,0035 et 2 TW d'énergie [16]. Le principal problème est que ce type d'énergie ne peut généralement être utilisé qu'à proximité de zones tectoniquement actives.

### 1.2.5 Energie solaire

Grâce aux quantités importantes d'énergie délivré par le soleil à la terre, cette énergie présente une promesse encourageante pour exploiter ce type d'énergie qui peut être qualifiée de source indispensable, parce qu'il influe sur les autres types d'énergie : éolienne et biomasse.

Les types d'énergie solaire sont divisés en deux types populaires selon le type d'exploitation, à condition que le but soit uniquement : comment obtenir de l'énergie électrique grâce à la conversion de l'énergie solaire. Les deux principales technologies d'énergies solaires sont l'énergie solaire thermique concentrée et le photovoltaïque (PV).

- Energie solaire thermique : La conversion thermique est un moyen de convertir la chaleur du soleil en énergie électrique. Le principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique est que lorsque la surface du récepteur solaire est exposée au soleil, elle absorbe la chaleur à travers le récepteur solaire thermique qui entre en contact avec le caloporteur. La chaleur produite est utilisée pour chauffer de l'eau ou faire fonctionner une turbine à vapeur. Figure. 1.4 représente de nombreuses applications utilisées pour ce type d'énergie, et les applications les plus populaires comprennent : le chauffage solaire de l'air, le four solaire, et d'autres, comme l'ont présenté les auteurs dans la référence [17].



**Figure 1.4:** Applications de l'énergie solaire thermique

Les systèmes solaires thermiques à concentration (CSP) utilisent des miroirs pour réfléchir et concentrer la lumière du soleil sur des récepteurs, qui collectent l'énergie solaire et la convertissent en chaleur. L'énergie obtenue peut alors être utilisée pour produire de l'électricité ou être stockée en vue d'une utilisation ultérieure. Cette technologie est principalement utilisée dans les très grandes centrales électriques.

La technologie CSP contient quatre types populaires ; réflecteur de fresnel linéaire, creux parabolique, plat parabolique et récepteur centrale [18]. Cependant, l'air est chauffée par le soleil et monte dans une cheminée par convection naturelle. Par conséquent, une zone de captage solaire qui contient une structure de serre à l'intérieur produit l'air chaud qui à son tour entraîne une/ou plusieurs turbines. Pour le bon fonctionnement d'une centrale solaire thermique, deux facteurs sont essentiels : la taille de la zone de collecte et la taille de tour. En dehors de cela, l'un des avantages de ce type est qu'il peut produire de l'énergie en continu, contrairement à d'autres systèmes solaires qui ne peuvent le faire que par intermittence car ils dépendent du soleil pour fonctionner. Des matériaux spéciaux peuvent être utilisés pour stocker la chaleur du soleil pendant la journée et la restituer la

nuit.

- **Energie photovoltaïque** : L'énergie solaire photovoltaïque utilise le rayonnement solaire pour produire de l'électricité, contrairement à l'énergie solaire thermique qui repose sur l'effet de la chaleur. Cela dépend principalement de l'élément de base du panneau photovoltaïque, qu'est la cellule solaire [19].

Chaque cellule contient un matériau semi-conducteur qui absorbe la lumière du soleil et émet des électrons. D'autres matériaux présents dans la cellule empêchent les électrons de se recombiner avec leurs atomes, de sorte qu'ils circulent sous forme de courant. Une seule cellule produit généralement environ 1 ou 2 watts de puissance, mesurée lorsque les cellules sont combinées en modules, panneaux ou systèmes complets. Ceux-ci comprennent également des structures de montage qui pointent les panneaux vers le soleil avec un angle bien défini, pour exploiter et bénéficier d'un maximum de rayonnement solaire. Ils utilisent des convertisseurs statiques pour alimenter la charge : des onduleurs pour les applications ou les charges de nature alternative AC (connexion au réseau) ou hacheurs pour les applications de nature continue DC.

### 1.3 Energie solaire en Algérie

L'Algérie est considérée comme le plus grand pays d'Afrique et bénéficie d'une bonne situation géographique qui lui permet d'être une puissance énergétique forte et importante, en raison de sa vaste superficie et de la diversité du climat en général. Ces facteurs naturels ont été renforcés par la stratégie de transition vers l'énergie verte, qui fait partie de la stratégie d'investissement de l'État dans le domaine des énergies renouvelables en général et de l'énergie solaire en particulier [20, 21].

La capacité actuelle de production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables est d'environ 686 mégawatts par an, de différents types, et la capacité de production varie comme suit : l'énergie solaire est d'environ 448 mégawatts, l'énergie hydroélectrique est d'environ 228 mégawatts et l'énergie éolienne est d'environ 10 mégawatts [22].

La part de l'énergie solaire dans la production s'élève actuellement à environ 448 mégawatts, soit 3 % de l'énergie électrique totale produite. L'État algérien s'est fixé pour objectif d'augmenter la production d'énergie solaire et de porter son pourcentage à 27 % (environ 15 000 mégawatts) de l'énergie électrique produite d'ici 2035 [23].

## 1.4 Historique de la technologie photovoltaïque

Depuis l'aube des temps, l'homme a recherché de nombreuses sources d'énergie. Après plusieurs années, le développement de la technologie photovoltaïque est passé par plusieurs étapes historiques. Dans le passé, de nombreuses découvertes ont été faites par hasard, en 1839 [24], Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque. Il a été constaté que la conductivité augmente avec l'éclairage après des expériences avec des électrodes métalliques et des électrolytes. Smith a ensuite découvert l'effet photoélectrique du sélénium en 1873 [25].

En 1876, avec son étudiant Richard E. Jour, Adams a découvert que l'éclairage d'une jonction entre le sélénium et le platine avait également un effet photovoltaïque [?]. Ces deux découvertes sont à l'origine de la première construction de cellules solaires de sélénium, intégrées en 1877 [26]. Puis, la première cellule photovoltaïque a été proposée en 1883 avec une puissance aussi faible que 1 % [27]. Après cela en 1941, est construite la première cellule solaire monocristalline en silicium, un des matériaux importants pour la production de cellules solaires. Alors, en 1954 les chercheurs ont conçu le module PV moderne qui nous donne un rendement en 6-10 % [28].

Plus tard, dans les années 1960, plusieurs types de modules photovoltaïques ont été développés sur la base de semi-conducteurs composés tels que le SI polycristallin (PC-SI) et les couches minces [29]. Entre 1970 et 1979, de nombreuses entreprises investissent dans le domaine photovoltaïque [30]. Ainsi, le premier système photovoltaïque destiné aux applications domestiques a été développé en 1973 [31], par Solarex. Puis, en 1975, Solec International et Solar Technology International ont été créées.

En 1980, plusieurs événements importants se sont produits dans le domaine du photovoltaïque, parmi lesquels ARCO Solar qui a été le premier à produire des modules photovoltaïques d'une capacité maximale de plus de 1 MW par an. En 1984, les premiers modules amorphes sont lancés par ARCO Solar.

En 1985, des chercheurs de l'Université de South Wales en Australie ont construit une cellule solaire avec un rendement de plus de 20 % [32].

## 1.5 Types des cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est un composant électronique nécessaire et essentiel dans la composition du panneau solaire (module), c'est l'une des techniques les plus prometteuses pour atteindre les objectifs mondiaux en matière d'énergie renouvelable. La cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène de "l'effet photovoltaïque" pour convertir l'énergie solaire, représentée par le rayonnement solaire, en énergie électrique. Une cellule PV est formée d'une jonction p-n qui permet de séparer spatialement l'électron et le photo-

trou généré grâce à la variation du potentiel électrochimique au sein de la structure [33]. L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en convertissant l'énergie des photons arrivant à la surface de la terre en électricité. Le développement rapide de l'exploitation de cette énergie est dû au taux de conversion élevé, au faible coût et au caractère inoffensif du matériau.

La technologie photovoltaïque est basé sur le silicium comme une matière première. Où, tous les panneaux solaires sont constitués de cellules solaires en silicium.

La technologie photovoltaïque est généralement divisée en quatre générations, Figure. 1.5 montrant les types de cellules appartenant à chaque génération, comme indiqué dans la référence [34].

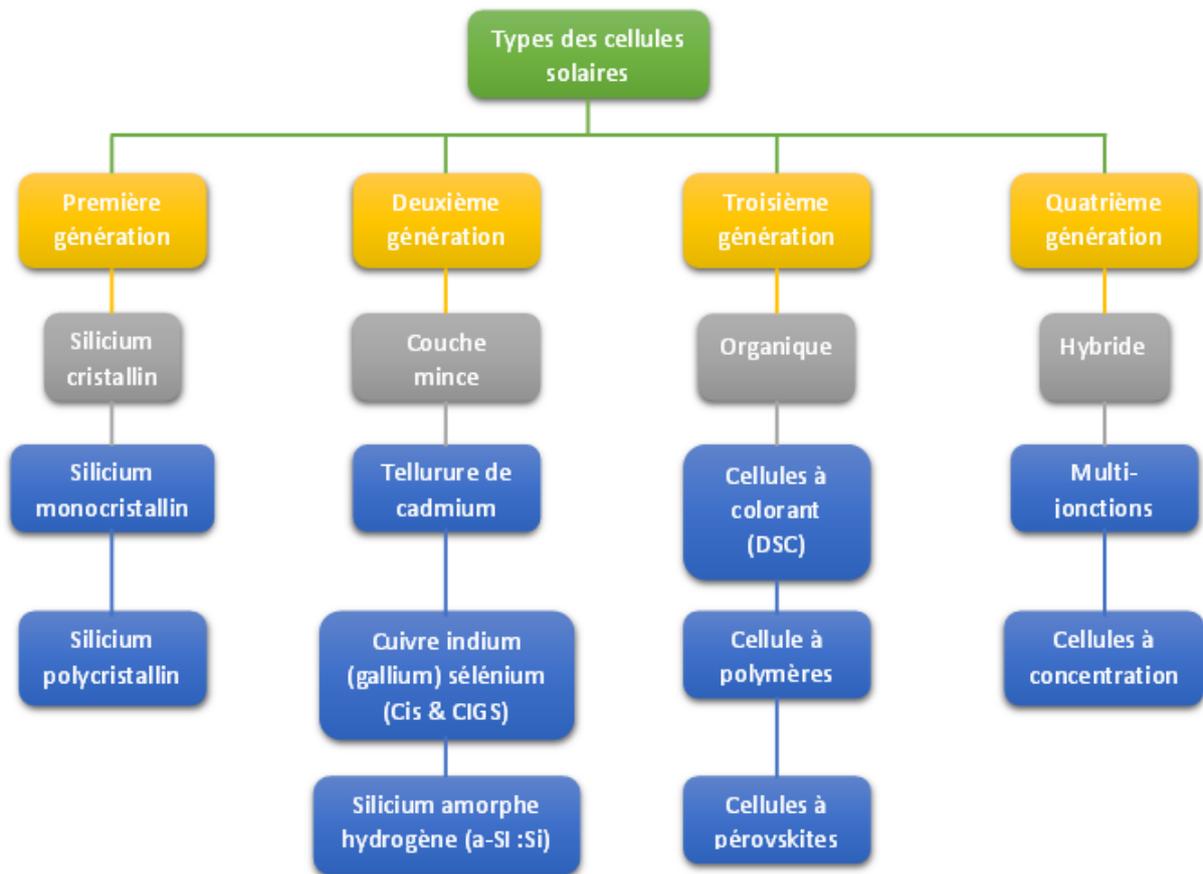


Figure 1.5: Catégories de cellules photovoltaïques

### 1.5.1 Cellules de silicium cristallin

Le silicium cristallin est la cellule la plus utilisée car elle représente la première génération de technologies de cellules solaires qui ont fait l'objet des premières recherches et applications. Il se divise en deux catégories : les cellules au silicium monocristallin et

les cellules au silicium polycristallin. La Figure. 1.6 et la Figure. 1.7 représentent respectivement les deux types de cellules mentionnés précédemment, selon l'auteur dans la référence [35].

### 1.5.1.1 Cellules polycristallins

Les panneaux solaires polycristallins sont parmi les panneaux les plus populaires dans le domaine photovoltaïque. Ils sont constitués de plusieurs cristaux de silicium dans une seule cellule photovoltaïque [36]. Aussi, ils sont fabriqués à partir de nombreux fragments de silicium fondus ensemble. Une cellule est produite à partir d'un mélange de plusieurs cristaux de silicium différents. Les cellules qu'il contient sont de forme carrée, il est bleu clair et a des effets pailletés.

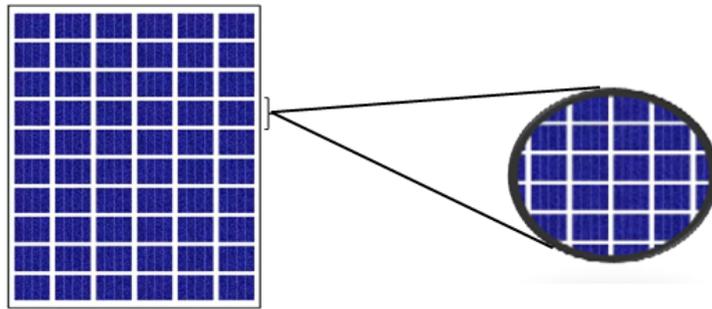


Figure 1.6: Cellules polycristallins

### 1.5.1.2 Cellules monocristallins

Les panneaux solaires monocristallins sont identiques aux panneaux polycristallins, sauf qu'ils sont fabriqués à partir d'un seul cristal de silicium. Ils sont moulés à partir de silicium fondu extrait d'un creuset de quartz. Ils ont une couleur noire typique et la forme de chaque panneau est un carré avec un coin manquant de chaque côté [36].

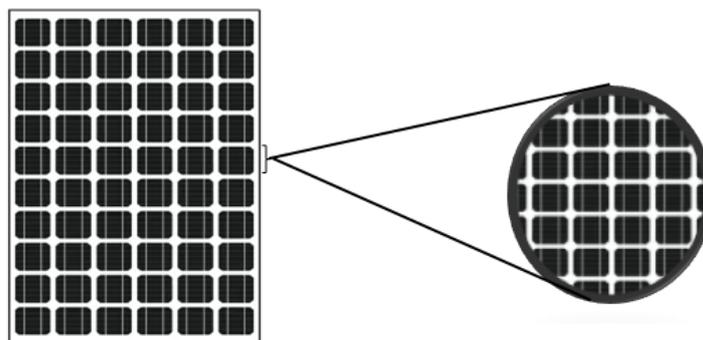


Figure 1.7: Cellules monocristallins

### 1.5.1.3 Différences entre polycristallin et monocristallin

Il est important de noter qu'il existe plusieurs différences entre les deux types de cellules. Par exemple, les cellules polycristallines sont plus écologiques que les panneaux solaires monocristallins, les panneaux solaires polycristallins ont une tolérance à la chaleur inférieure à celle des panneaux monocristallins et les panneaux solaires polycristallins ont un coefficient de température plus élevé que les panneaux monocristallins.

Étant donné qu'un panneau solaire monocristallin est constitué d'un seul cristal, les électrons ont plus d'espace pour se déplacer, ce qui améliore le flux d'électricité. C'est la raison pour laquelle le rendement des panneaux monocristallins est supérieur à celui des panneaux polycristallins.

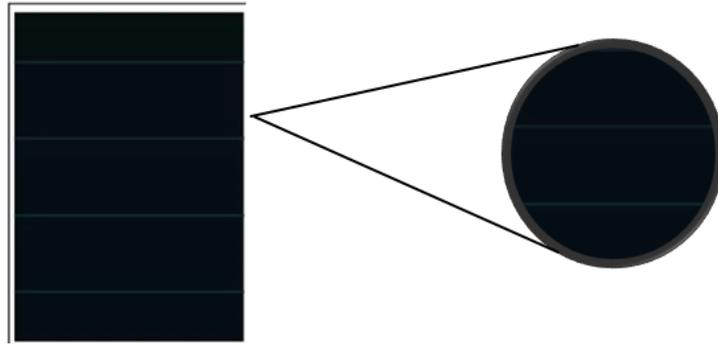
## 1.5.2 Cellules à base de couches minces

Dans la première partie, nous avons traité de la cellule solaire en silicium cristallin. Dans cette section, nous abordons la deuxième génération de cellules photovoltaïques, appelée cellule solaire à couche mince (Thin film solar cell). La cellule solaire à couches minces (CSCM) est fabriquée à l'aide d'un ou plusieurs films minces d'éléments PV sur un substrat en verre, en plastique ou en métal. La Figure. 1.8 représente ce type de cellule selon la référence [35].

Les cellules solaires à couche mince sont disponibles sous de nombreuses formes, mais seules trois d'entre elles sont très populaires. Il s'agit des cellules solaires amorphes, du sélénure de cuivre-indium-gallium (CIGS) et du tellure de cadmium (CdTe) [37]. Le CdTe est plus populaire que les deux autres.

Le prix de ces cellules est l'un des principaux avantages de la technologie des couches minces. Le coût de la technologie des couches minces est inférieur à celui des deux autres types de cellules. En outre, par rapport aux panneaux solaires en silicium cristallin, la procédure de production est plus respectueuse de l'environnement [37]. En fonction du matériau utilisé lors de la fabrication, les panneaux solaires à couche mince ont des apparences et des couleurs différentes. Ils ont généralement un aspect lisse et agréable, semblable à celui du monocristallin.

Le composant photovoltaïque des cellules solaires à couches minces n'est pas très robuste. Il se détériore plus rapidement que le silicium cristallin. Par conséquent, la durée de vie du panneau se réduit. Il sera difficile de prévoir une durée de vie supérieure à 20 ans pour un film à couche mince [38].



**Figure 1.8:** Cellules à base de couches minces

### 1.5.2.1 Cellule solaire en silicium amorphe

Les cellules solaires en silicium amorphe sont les cellules à couche mince les plus développées par rapport leur génération, le silicium amorphe est l'une des technologies photovoltaïques à couche mince les plus respectueuses de l'environnement car elle n'utilise pas de métaux nocifs. Cependant, l'efficacité des panneaux solaires amorphes est faible [39].

Pour les applications intérieures, les cellules solaires en silicium amorphe sont un matériau souhaitable en raison de sa sensibilité et une capacité d'absorption élevée au spectre lumineux des LED blanches et des lampes fluorescentes [40].

Contrairement au panneau cristallin classique, le panneau solaire amorphe continue de produire de l'électricité même lorsqu'une partie de celui-ci est ombragée.

### 1.5.2.2 Cellule solaire d'indium-gallium-sélénide de cuivre

Une cellule solaire en cuivre-indium-gallium-sélénure (ou cellule CIGS, parfois une cellule CI(G)S ou CIS) est une cellule solaire à couche mince. Cette dernière est populaire en raison de son rendement plus élevé et du faible coût des matériaux photoélectriques, le rendement record est de 22,8 % [41]. Elle est fabriquée en déposant une fine couche de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénure sur un support en verre ou en plastique, ainsi que des électrodes à l'avant et à l'arrière pour collecter le courant. Étant donné que le matériau a un coefficient d'absorption élevé, il absorbe fortement la lumière du soleil [42]. D'autre part, Les cellules en CIGS résistent mieux à l'échauffement que les cellules au silicium cristallin, mais moins bien que les cellules au CdTe [40, 43].

### 1.5.2.3 Cellule solaire au tellure de cadmium

De toutes les technologies solaires, le photovoltaïque CdTe est celui qui présente le temps de retour sur investissement le plus rapide, l'impact le plus faible sur le carbone et

la plus faible consommation d'eau. Une réduction plus rapide des émissions de carbone est possible grâce au temps de retour énergétique du CdTe, ce qui permet d'éviter les pénuries d'énergie temporaires [44].

### 1.5.3 Cellules de troisième génération

Au milieu des recherches visant à améliorer l'efficacité des cellules solaires, les cellules de troisième génération attendent d'atteindre l'objectif souhaité. Cela est dû à leur rendement élevé, mais leur problème est leur coût élevé, où des applications utilisent ce type de cellule, notamment les applications spatiales.

#### 1.5.3.1 Cellules photovoltaïques organiques

La cellule solaire organique (OSC), une cellule solaire de troisième génération contenant une couche de polymère organique qui agit comme une couche d'absorption de la lumière, est considérée comme l'une des technologies photovoltaïques (PV) les plus récentes à l'heure actuelle [45].

#### 1.5.3.2 Cellule solaire à pérovskite

La cellule solaire à pérovskite est un type particulier de cellule solaire qui utilise un composé structuré de pérovskite comme couche active pour capter la lumière. Il s'agit principalement d'un matériau hybride organique-inorganique à base d'halogénure de plomb ou d'étain [46].

Les halogénures de plomb méthylammonium, sont un type de matériau pérovskite, peu coûteux et relativement faciles à fabriquer. Les pérovskites sont des matériaux très intéressants pour les cellules solaires à l'état solide en raison de leurs caractéristiques inhérentes, notamment un large spectre d'absorption, une séparation rapide des charges, de longues distances de transport pour les électrons et les trous, une longue durée de vie de séparation des porteurs.

## 1.6 Développement du rendement des panneaux solaires

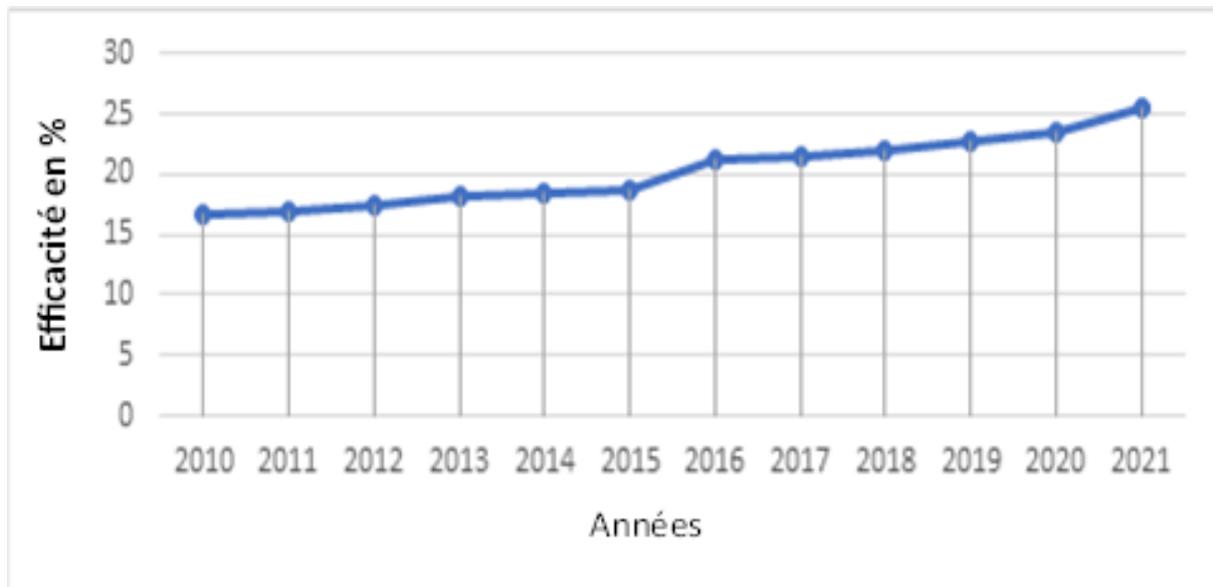
Plusieurs recherches se sont concentrées sur le développement du rendement et l'efficacité des panneaux solaires depuis le premier découvert de l'effet photovoltaïque. Le rendement du panneau solaire est soumis à plusieurs facteurs : le type de matériau semi-conducteur, la technologie de fabrication ... etc.

Le rendement est calculé sur la base de la différence entre la quantité d'énergie produite par le panneau solaire dans des conditions standard et la quantité d'énergie (irradiation) reçue par la surface du module photovoltaïque.

Le tableau ci-dessous répertorie la productivité de certains types de cellules, notamment : cristalline, couches minces et organique d'après la référence [47]. La Figure. 1.9 montre également développement de l'efficacité des modules monocristallins, comme indiqué dans la référence [48].

**Tableau 1.1:** L'efficacité des cellules et modules photovoltaïques

Technologie photovoltaïque		Efficacité de conversion des cellules	Efficacité de conversion des modules
Cristalline	Monocristallin	27.6%	24.4%
	polycristallin	23.3%	20.4%
	GaAs	47.1%	38.9%
Couche mince	CdTe	22.1%	19.5%
	CIGS	23.4%	19.2%
Organique	Perovskite	25.7%	17.9%
	Organique	18.2%	11.7%



**Figure 1.9:** Développement de l'efficacité des modules Monocristallines

## 1.7 Principe de la conversion de l'énergie solaire

La conversion d'énergie solaire en énergie électrique est la partie la plus importante de la chaîne de production de cette énergie. Où, la lumière du soleil (photons) transfère

son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui est une cellule photovoltaïque). L'énergie photovoltaïque est la conversion directe d'énergie solaire en énergie électrique. Lorsque la surface d'un panneau solaire est exposée à la lumière, les cellules solaires captent la lumière du soleil. Par la suite, les cellules solaires génèrent un courant direct en absorbant le rayonnement lumineux par le biais de l'effet photovoltaïque. Il s'agit d'un phénomène physique créé par l'absorption de l'énergie lumineuse [49]. Par conséquent, il produit une différence de potentiel électrique entre deux points du matériau. Les panneaux solaires sont constitués de plusieurs cellules photovoltaïques. Chaque cellule contient des cristaux de silicium qui la font fonctionner comme un dispositif semi-conducteur. Les matériaux semi-conducteurs dans la cellule PV sont dopés pour former une structure P-N. Le silicium du type P (positif) a tendance à abandonner les électrons et à acquérir des trous tandis que le silicium de type n (négatif) accepte les électrons [50].

Lorsque les photons de la lumière du soleil tombent sur la jonction PN (jonction entre les matériaux du type N et du type P), ils transmettent de l'énergie aux électrons afin qu'ils puissent circuler sous forme de courant électrique. Ici, les matériaux de type P sont déficients en électrons tandis que les matériaux de type N ont une abondance d'électrons. Deux électrodes sont connectées aux cellules PV [51]. En conséquence, les électrons se déplacent vers l'électrode négative tandis que les trous se déplacent vers l'électrode positive, la Figure. 1.10 illustre le principe de fonctionnement de la conversion. Un fil conducteur relie l'électrode négative, la charge et l'électrode positive en série pour former un circuit. En conséquence, un courant électrique est généré pour fournir la charge externe. C'est ainsi que l'effet PV fonctionne dans une cellule solaire. La Figure. 1.10 montre le principe de fonctionnement de la conversion tel qu'il est présenté dans la référence [52].

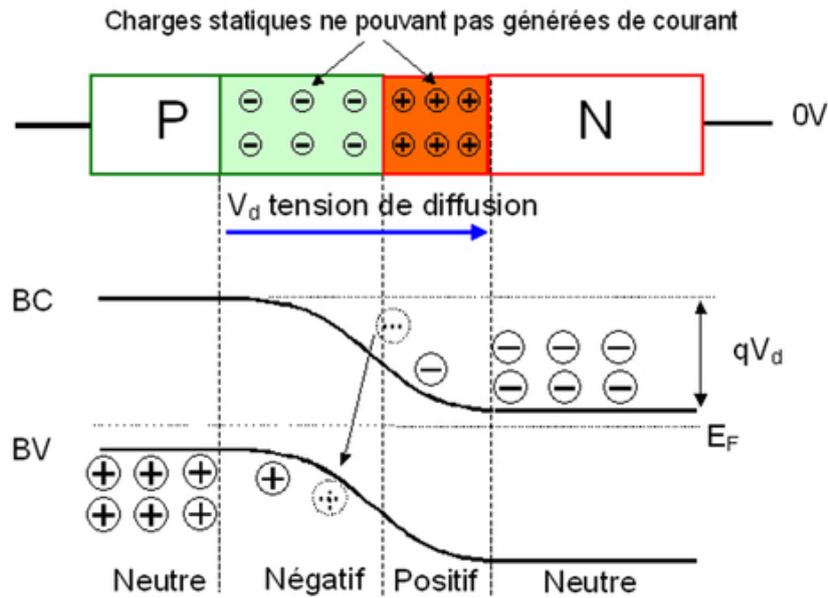


Figure 1.10: Principe de la jonction P-N

## 1.8 Modélisation des panneaux solaires

Les modélisations mathématiques proposées pour représenter les cellules photovoltaïques sont nombreuses. Leur objectif est de déterminer les caractéristiques I-V et P-V, ce qui permet d'analyser et d'évaluer les performances des cellules photovoltaïques. Tous les modèles offrent les avantages importants suivants :

- Compréhension aisée de phénomènes complexes.
- Vulgarisation des propriétés des systèmes.
- Facilité d'utilisation grâce au circuit électrique équivalent.

Le circuit électrique équivalent de la cellule solaire peut être représenté par modèle à diode unique. Il contient quatre éléments principaux comme suit ; une source de courant, une ou deux diodes, une résistance série et une résistance parallèle. La Figure. 1.11 illustre le schéma équivalent d'une cellule solaire.

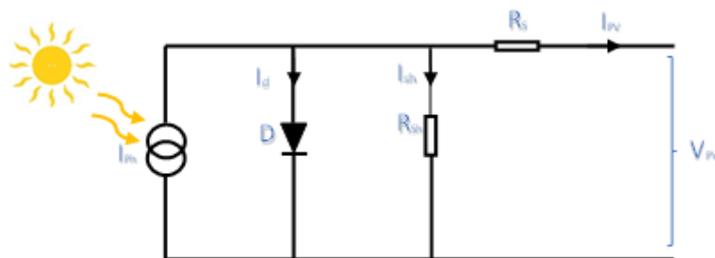


Figure 1.11: Schéma équivalent d'une cellule solaire

Le courant généré par la cellule photovoltaïque s'exprime mathématiquement et est donné par l'équation suivante [26] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.1)$$

Où ; L'expression du courant de diode s'exprime comme suit :

$$I_d = I_0 \left( \exp \frac{V_d}{V_t} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Où ;

$$V_t = \frac{BKT}{q} \quad (1.3)$$

L'expression du courant de saturation inverse de la diode de cellule est la suivante :

$$I_0 = I_{or} \left( \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q * E_g}{BK} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \right) \quad (1.4)$$

Le courant circulant dans la résistance shunt :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} * R_s}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

En substituant les équations (1.2 ; 1.4) dans l'équation (1.1), le courant IPV devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} * R_s}{V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} * R_s}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

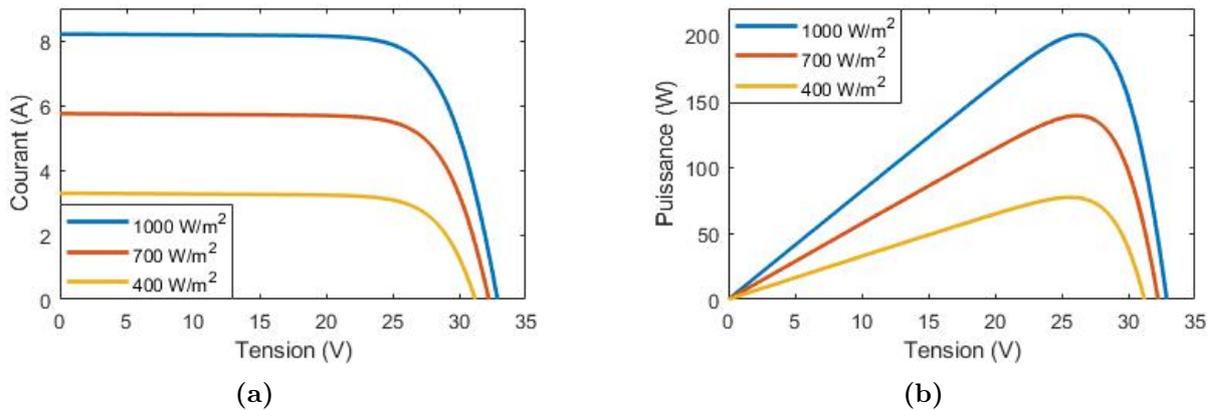
## 1.9 Influence de la température et de l'éclairement

De nombreux facteurs influencent sur l'efficacité des panneaux solaires, notamment les facteurs internes et les facteurs externes. Les principaux facteurs externes qui influencent directement les performances des panneaux solaires sont les conditions météorologiques.

### 1.9.1 Influence de l'éclairement

L'effet de l'éclairement est affecté directement sur les caractéristiques (I-V & P-V) des cellules solaires, en particulier sur le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ). Où, le courant du court-circuit  $I_{sc}$  est directement proportionnel à l'intensité de l'éclairement solaire. D'un autre côté, le courant de court-circuit  $I_{sc}$  dépend totalement et linéairement du niveau d'irradiation ; par conséquent, le courant de puissance maximale est changé lorsque l'irradiation solaire augmente ou diminue. La Figure. 1.12 illustre l'influence de l'éclairement

sur les caractéristiques I-V et P-V.

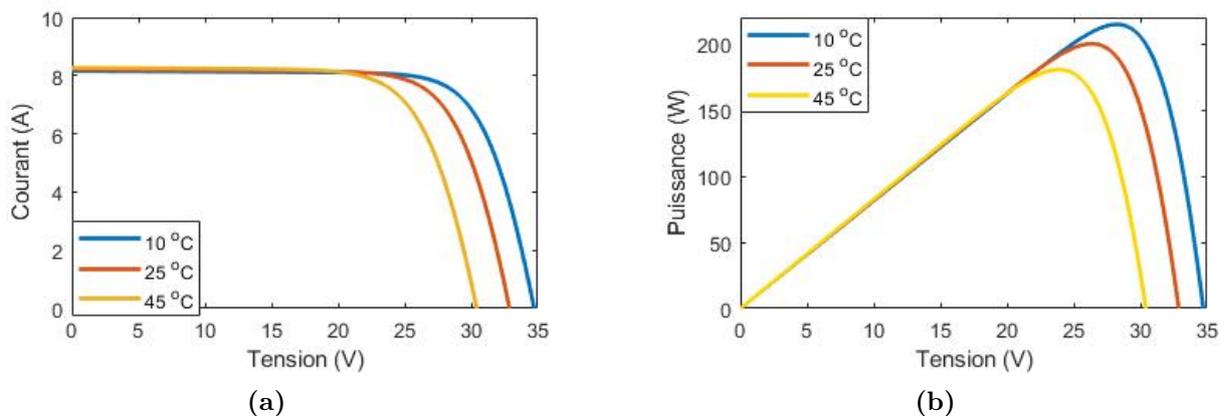


**Figure 1.12:** Influence de l'irradiation sur les caractéristiques I-V (a) et P-V (b)

### 1.9.2 Influence de la température

Le deuxième paramètre important et considérable qui influe sur le comportement des cellules solaires, et les caractéristiques (P-V ; I-V) d'une cellule photovoltaïque est la température des cellules, lorsqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. Par conséquent, l'efficacité de la cellule est directement affectée par la valeur de la température.

Sur la Figure. 1.13 on observe qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de la tension ( $V_{oc}$ ) et une légère augmentation du courant ( $I_{sc}$ ), suivies d'une diminution relative de la puissance maximale du panneau. Dans ce cas, la ventilation et le refroidissement des cellules sont nécessaires pour améliorer le rendement des panneaux photovoltaïques.



**Figure 1.13:** Influence de la température sur les caractéristiques I-V (a) et P-V (b)

## 1.10 Association en série et en parallèle de cellules photovoltaïques

Afin d'obtenir une quantité spécifique d'énergie grâce aux panneaux photovoltaïques, ils peuvent être placés en groupe et connectés en série ou en parallèle.

### 1.10.1 Association en série

Le regroupement en série permet d'augmenter la valeur de la tension de sortie par une expression générale  $U_s = n \cdot U_e$ . Mais, le courant garde la même valeur comme le montre la Figure. 1.15, qui présente les courbes (P-V) et (I-V) qui montrent clairement les changements sur les deux courbes dans le cas de la multiplication des modules en série.

La valeur finale de la tension est proportionnelle à la valeur de  $n$ . La Figure. 1.14 représente la connexion des modules dans ce cas.

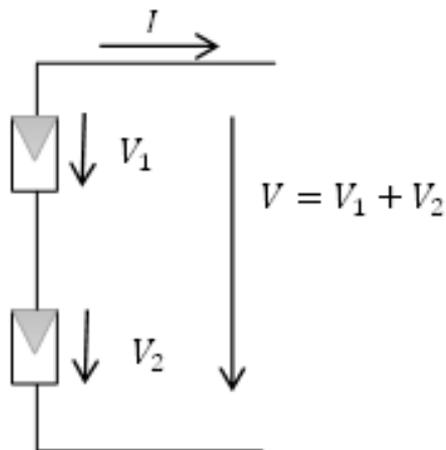


Figure 1.14: Raccordement des modules en série

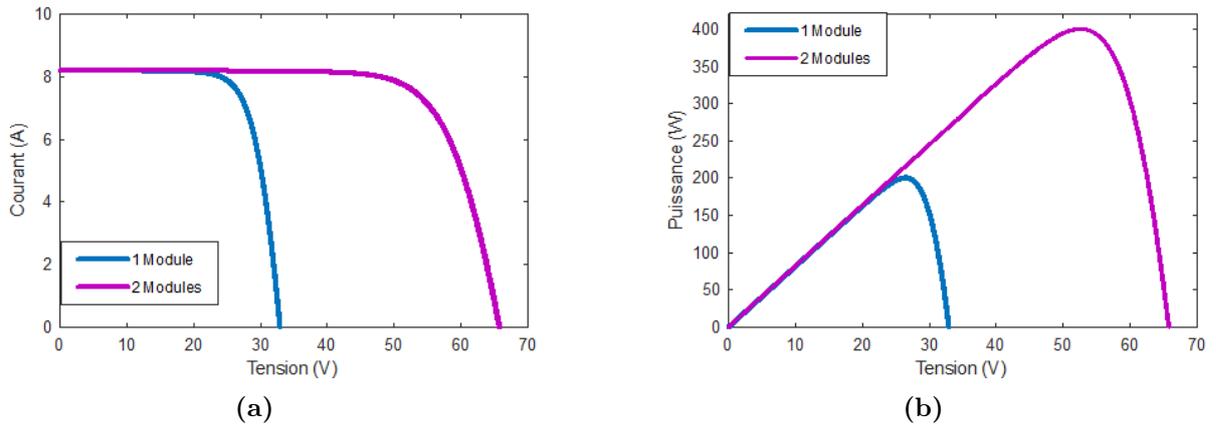


Figure 1.15: Association série des modules

### 1.10.2 Association en parallèle

Les Figure. 1.16 et Figure. 1.17 représentent le groupement en parallèle, dont on peut dire qu'il est l'opposé de l'association en série, car ce groupement permet d'augmenter la valeur du courant de sortie par une expression générale  $I_s = n \cdot I_e$  [53], avec une valeur de tension de sortie fixe comme indiqué dans la Figure. 1.17 (les caractéristiques (I-V) et (P-V)). La Figure. 1.16 explique la connexion en parallèle des modules.

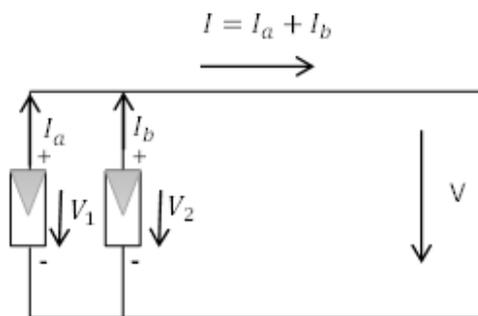


Figure 1.16: Raccordement des modules en parallèle

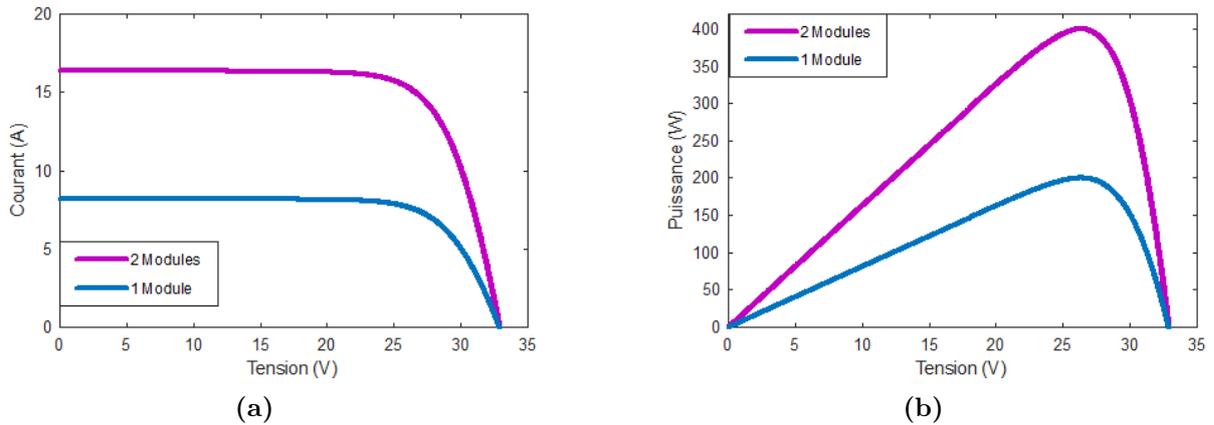


Figure 1.17: Association parallèle des modules

### 1.10.3 Association en série et en parallèle

En général, le groupe série parallèle est le mode le plus pratique car il répond aux besoins des utilisateurs tels que l'interconnexion avec les réseaux électriques, l'alimentation des résidents en sites isolés et diverses applications. La Figure. 1.18 représente la structure générale de l'association en série/parallèle.

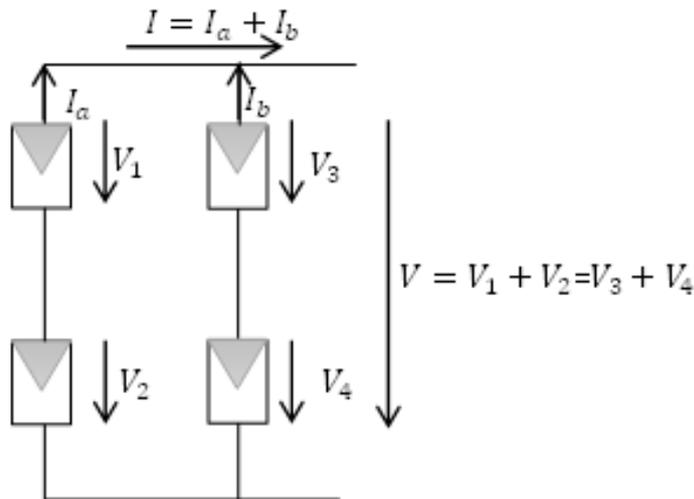


Figure 1.18: Structure générale de l'association série/parallèle

Ce groupement est une combinaison entre l'association série et parallèle. L'association série-parallèle permet d'augmenter la valeur du courant et la tension de sortie pour obtenir la tension, le courant et la puissance demandés. La figure suivante représente l'association série-parallèle pour une string de 2\*2.

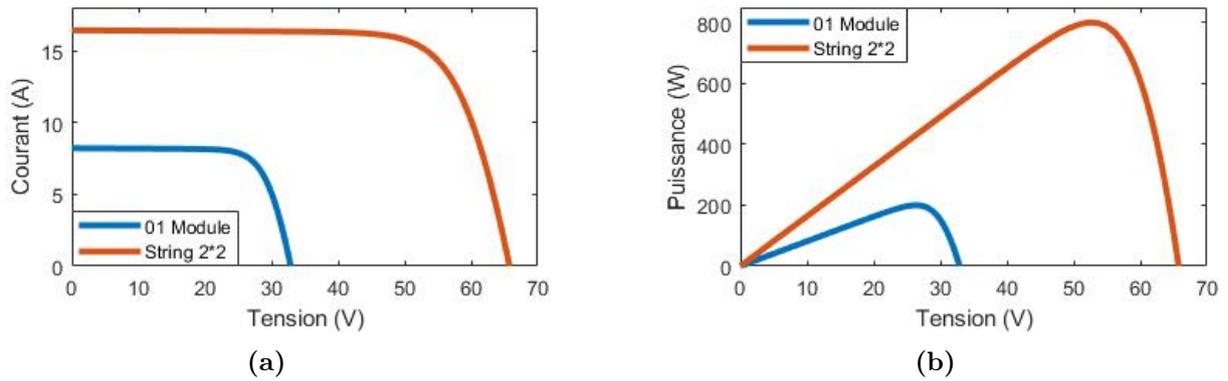


Figure 1.19: Association série parallèle des modules

## 1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné une description générale de la technologie photovoltaïque. Tout d'abord, les sources d'énergies renouvelables les plus importantes et les plus connues ont été mentionnées, puis un aperçu historique de la technologie de l'énergie photovoltaïque a été présenté jusqu'à son développement technologique actuel et l'évolution de son efficacité. Certains types de cellules photovoltaïques commercialisées sont cités, et le principe de conversion et de jonction P-N est expliqué. La cellule photovoltaïque a été modélisée afin de connaître le comportement de cette cellule et de montrer l'effet de l'éclairage et de la température sur les propriétés des panneaux solaires. Les résultats de la simulation montrent l'effet des conditions climatiques sur les panneaux photovoltaïques.

Dans le chapitre suivant, on présentera les éléments liés au panneau solaire pour obtenir un système efficace. Le principe de fonctionnement des convertisseurs statiques et leurs contrôles pour la poursuite du point de puissance maximale seront abordés.

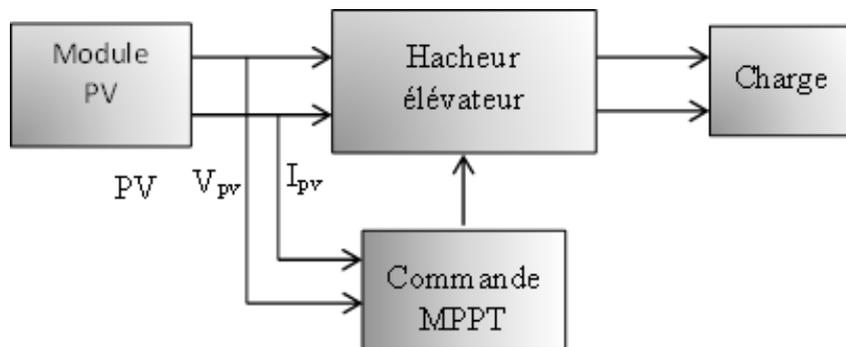
## Chapitre 2

# Poursuite du point de puissance maximale

## 2.1 Introduction

De nombreuses applications techniques contemporaines utilisent la technologie solaire comme source d'énergie. Pour cela, on a abordé dans le chapitre précédant une bref littérature sur la technologie photovoltaïque et spécialement les panneaux solaires. Cependant, l'énergie solaire reçue par le panneau solaire n'est pas pleinement exploitée, car la technologie des panneaux existants ne permet pas d'obtenir des performances élevées et adéquates. En ce sens, pour compenser cette importante perte d'énergie, il est nécessaire d'utiliser des techniques permettant d'extraire le maximum d'énergie solaire de ces panneaux. Afin d'utiliser au mieux cette énergie, un étage d'adaptation contenant des convertisseurs statiques doit être utilisé, ce dernier permettra la mise en œuvre de techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) [54].

Il est important que les systèmes de production photovoltaïque fonctionnent toujours à leur point de puissance maximale, indépendamment des changements climatiques. Cela permet au système de fonctionner de manière très efficace. En d'autres termes, en adaptant l'impédance de la source à l'impédance de la charge, vous pouvez transférer une puissance maximale à la charge. La description générale du système est présentée à la Figure. 2.1.

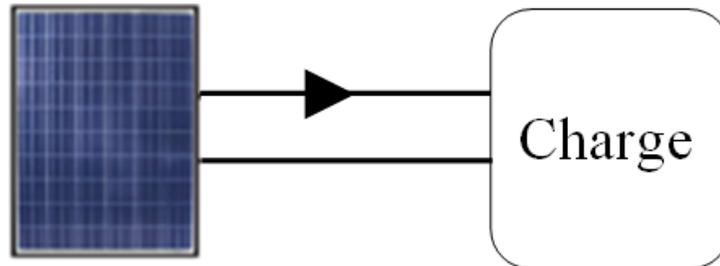


**Figure 2.1:** Description du système photovoltaïque

Pour ce faire, le système MPPT a été mis au point. Ce système surveille les variations de puissance maximales dues aux conditions météorologiques changeantes et permet d'extraire la quantité maximale d'énergie lorsque le panneau solaire fonctionne. Le système MPPT est essentiellement un dispositif électrique placé entre le réseau photovoltaïque et la charge. Ce dispositif est constitué d'un convertisseur de puissance à conversion DC-DC et d'un algorithme de contrôle MPPT, qui permet au système photovoltaïque d'être exploité de manière à transférer le plus d'énergie possible à la charge.

## 2.2 Connection directe

L'architecture la plus simple consiste en un générateur solaire et une charge, qui consomme directement l'énergie produite par le PV. En outre, le coût du système directement connecté est faible, car l'élément de ce système se compose uniquement d'un panneau solaire et d'une charge.



**Figure 2.2:** Connection directe panneau-charge

Cette énergie est fortement influencée par le type de charge, la température et l'intensité du rayonnement. Il convient de noter que lorsqu'un panneau solaire est connecté directement à une charge, il ne transfère qu'environ 30 % de sa puissance maximale. Pour connecter une charge alternative, doit être utilisé un intermédiaire qui est un onduleur [6]. Il est donc nécessaire de connecter un intermédiaire afin d'utiliser tout le potentiel du panneau solaire.

## 2.3 Convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs qui ont révolutionné la technologie électrique et qui s'appuient sur l'électronique de puissance. Les convertisseurs statiques de puissance ont toujours été un élément essentiel de la technologie électronique contemporaine et ont de nombreuses applications diverses, en particulier dans le domaine industriel. Différents types de ces convertisseurs sont utilisés dans de nombreux domaines technologiques et pour différentes applications, en fonction de la nature du courant à utiliser [55]. La Figure. 2.3 résume les différents types de convertisseurs statiques.

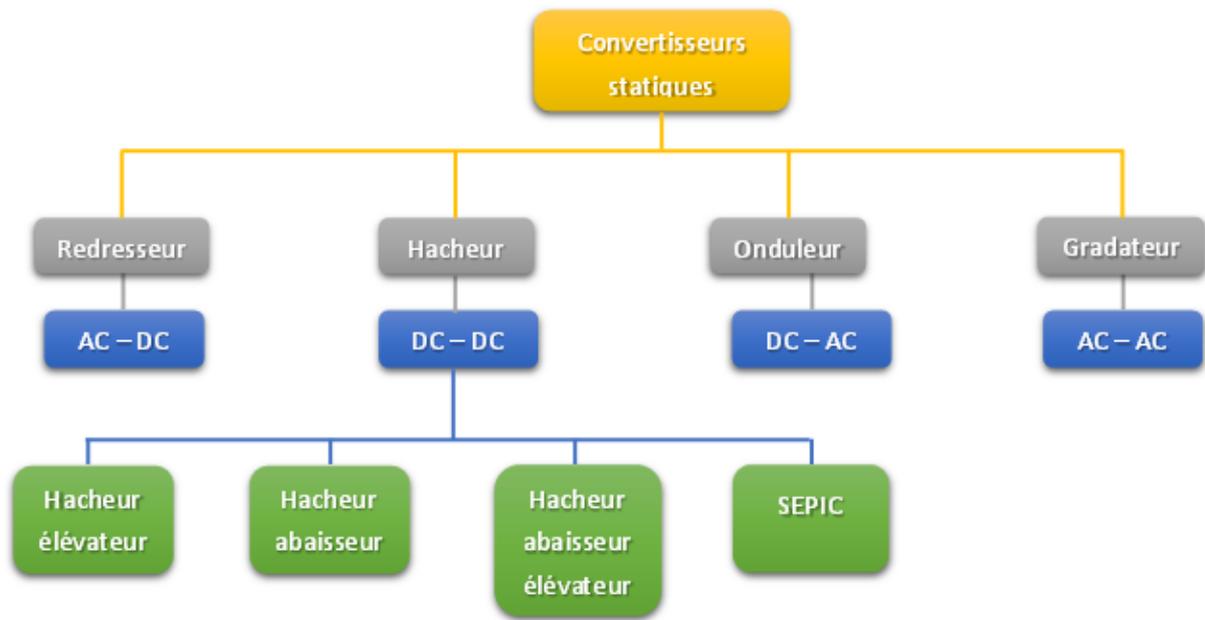


Figure 2.3: Différents types de convertisseurs statiques

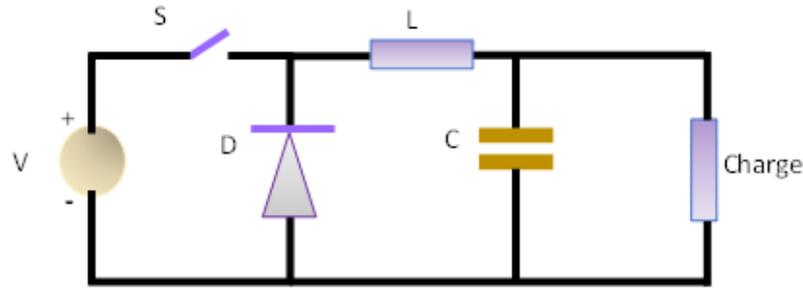
## 2.4 Convertisseurs statiques DC-DC

Dans ce travail, des convertisseurs DC-DC ont été utilisés, pour agir en tant qu'intermédiaires entre le panneau solaire et la charge, et sont autorisés à adapter l'amplitude de la tension d'entrée ou à inverser la polarité. La tension d'entrée est convertie à un niveau inférieur ou supérieur, selon le type de convertisseur. À cette fin, des convertisseurs DC-DC peuvent être utilisés. Ce type de convertisseur permet de maintenir la stabilité de la tension et d'éviter les fluctuations importantes [56].

### 2.4.1 Hacheur abaisseur (Buck converter)

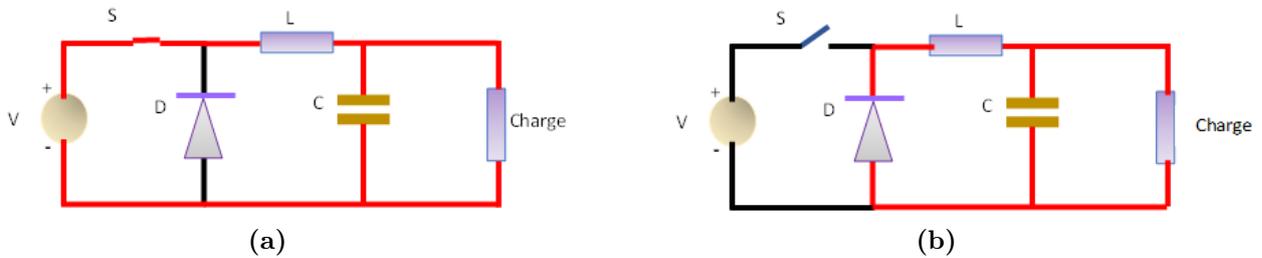
Ce convertisseur fait partie des convertisseurs les plus connus. L'objectif principal d'un convertisseur buck est de modifier la tension de sortie en dessous de la tension d'entrée. De nombreuses applications utilisent ce type de convertisseur, notamment les applications photovoltaïques pour la recharge des batteries, les véhicules électriques [57], les applications des stations spatiales (satellites) et d'autres applications industrielles et domestiques. Il contient des éléments électroniques représentés dans la Figure. 2.4 comme suit : une inductance (L), une diode (D), une capacité (C), switch de commutation (S).

L'interrupteur (S) est contrôlé par un signal modulé en largeur d'impulsion. La bobine joue un rôle important et essentiel dans le fonctionnement du hacheur abaisseur de tension.



**Figure 2.4:** Schéma équivalent d'un hacheur abaisseur (Buck converter)

La bobine ( $L$ ) et le condensateur ( $C$ ) stockent l'énergie pendant que l'interrupteur est fermé, comme le montre la figure 2.5a. L'élément de commutation ( $S$ ) est ouvert et la diode ( $D$ ) est fermée lorsque la tension atteint le niveau souhaité, comme illustré dans la figure 2.5b. Le courant de la diode circule en raison de la force électromotrice auto-induite. L'énergie stockée par la bobine alimente la charge.



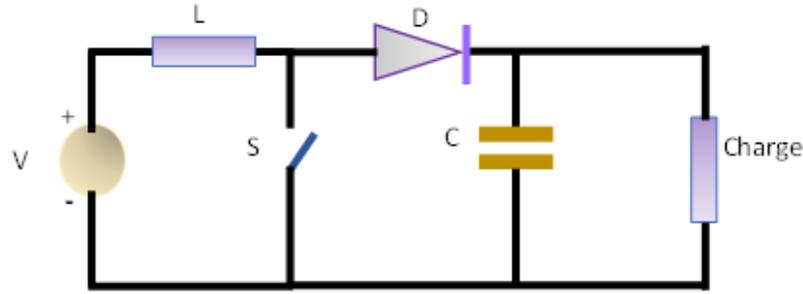
**Figure 2.5:** Séquences de fonctionnement du hacheur abaisseur

## 2.4.2 Hacheur élévateur (Boost Converter)

De nombreuses applications technologiques utilisent le convertisseur élévateur (Boost converter); les applications qui utilisent ce type de convertisseur sont le photovoltaïque, le contrôle adaptatif et la communication... etc.

Dans ce travail, le convertisseur élévateur est utilisé pour booster la tension produite par le panneau solaire afin d'alimenter la charge. Il sert principalement d'intermédiaire de transmission de puissance entre le générateur photovoltaïque (le panneau) et la charge [58].

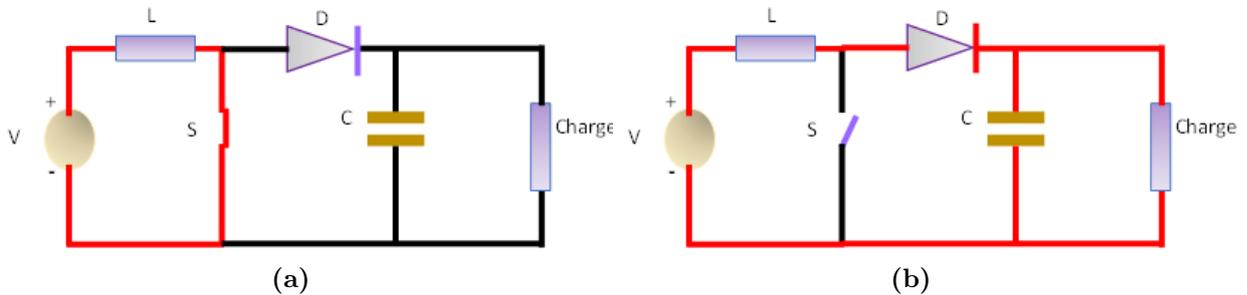
Diverses applications utilisent ce convertisseur, en particulier les applications photovoltaïques, en raison des avantages qu'il présente : rendement élevé, faible coût et simplicité de la structure [59]. Il permet d'augmenter la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée, afin d'alimenter diverses charges avec une tension stable. Ce convertisseur permet d'ajuster le système PV et la charge DC afin de produire la tension la plus élevée possible. Il s'agit de contrôler l'interrupteur par le rapport cyclique (a), L'interrupteur est commandé grâce à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI /PWM) [60].



**Figure 2.6:** Schéma équivalent d'un hacheur élévateur (Boost converter)

Tout en conservant la même valeur de puissance, le convertisseur élévateur peut convertir une tension supérieure à la tension d'entrée avec une diminution du courant. Cependant, la bobine d'induction reçoit presque tout le courant lorsque le commutateur ( $S$ ) est fermé, tandis que la diode ( $D$ ) fermée ne permet pas au courant de charger le condensateur ( $C$ ), comme le montre la Figure 2.7a.

En raison d'un courant électrique plus élevé, la bobine ( $L$ ) accumule beaucoup plus d'énergie sous la forme d'un champ magnétique. Lorsque la tension baisse jusqu'à un certain point, l'interrupteur est fermé, tandis que la diode est ouverte, comme le montre la Figure 2.7b.



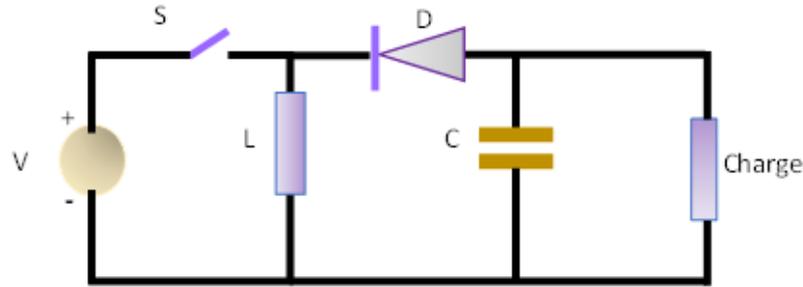
**Figure 2.7:** Séquences de fonctionnement du hacheur élévateur

### 2.4.3 Convertisseurs abaisseur-élévateur (Buck-Boost DC-DC)

La topologie de ce convertisseur est intégrée aux topologies Buck et Boost mentionnées précédemment. Pour générer un niveau de sortie plus ou moins élevé, il peut modifier la tension d'entrée, transformant une tension continue positive à l'entrée en une tension continue négative à la sortie [61]. Ce type de convertisseur est fréquemment utilisé lorsqu'on travaille avec une large gamme de tensions d'entrée.

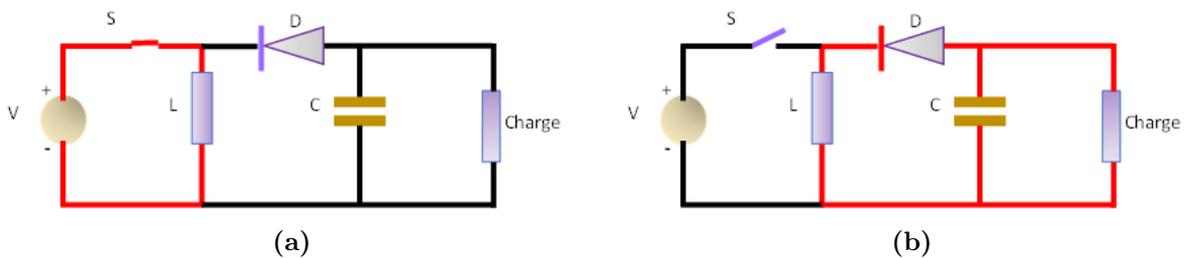
Un convertisseur Buck-Boost est également construit à l'aide des mêmes composants que ceux utilisés dans les convertisseurs couverts précédemment. Dans ce cas, l'inductance est placée en parallèle avec la tension d'entrée et le condensateur de charge. L'interrupteur

ou le transistor est placé entre l'entrée et l'inductance, tandis que la diode est placée entre l'inductance et le condensateur de charge dans le sens inverse, comme le montre la Figure. 2.8. Le convertisseur buck-boost fournit une tension de sortie qui peut être inférieure ou supérieure à la tension d'entrée.



**Figure 2.8:** Schéma équivalent d'un convertisseurs abaisseur- élévateur (Buck-Boost)

Si l'interrupteur est fermé comme indiqué sur la Figure 2.9a, le courant traversant l'inductance et la diode est en état de blocage. Si l'interrupteur est ouvert comme le montre la Figure 2.9b, il décharge l'énergie déjà stockée dans l'inductance. Le circuit de sortie du condensateur est supposé suffisamment élevé pour que la constante de temps d'un circuit RC soit élevée sur l'étage de sortie.



**Figure 2.9:** Séquences de fonctionnement du hacheur abaisseur- élévateur

## 2.5 Caractéristiques importantes

La conception d'un convertisseur statique est soumise à plusieurs paramètres clés, qui prennent en compte le dimensionnement des éléments nécessaires (inductance, capacité, etc.) qui est crucial, ainsi que les autres paramètres énumérés ci-dessous, sont pris en considération pour assurer le bon fonctionnement de l'équipement.

### 2.5.1 Rendement

Le rendement du convertisseur DC-DC, déterminé par le rapport entre la puissance d'entrée et la puissance de sortie, est un élément clé à prendre en considération. Pour garantir que la puissance électrique nécessaire à la charge est fournie sans perte d'énergie, il est recommandé d'avoir un rendement de 90% ou plus.

### 2.5.2 Température

La température ambiante est un paramètre décisif, elle affecte directement la sécurité des convertisseurs dans le cas d'un fonctionnement à pleine charge et réduit leur efficacité, ce problème peut être résolu par l'installation d'un système de refroidissement.

### 2.5.3 Tension d'entrée et de sortie

La stabilité de la tension d'entrée du convertisseur est nécessaire pour assurer une alimentation stable de la charge, la valeur de l'ondulation de la tension doit toujours être une valeur acceptable.

### 2.5.4 Taille, poids et modernité

Les dimensions physiques telles que le poids et la taille sont également importants. D'autre part, les applications liées à ces convertisseurs nécessitent une adaptation aux nouvelles technologies telles que les systèmes embarqués.

## 2.6 Poursuite du point de puissance maximale

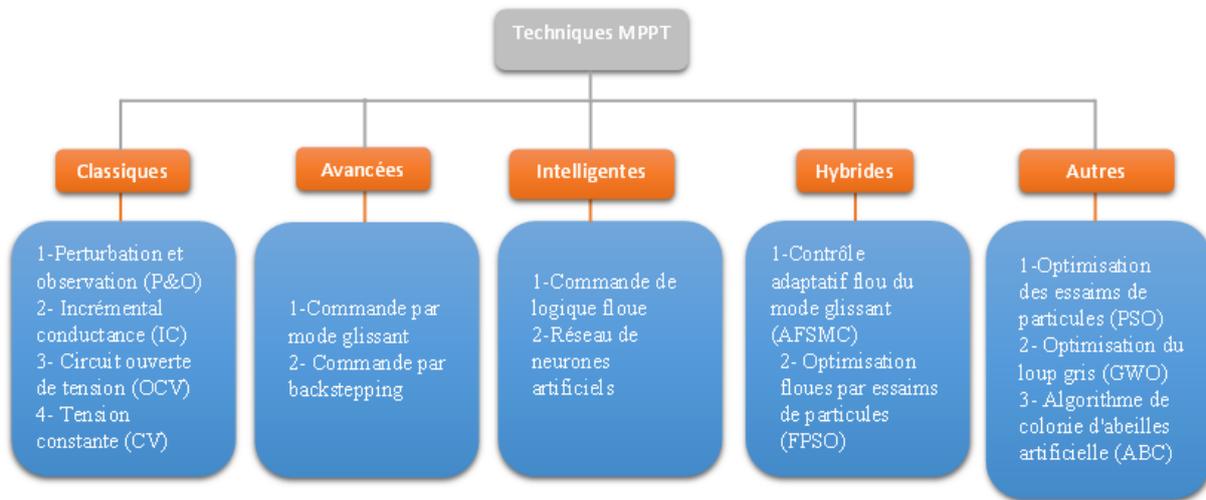
Afin de maximiser l'efficacité de la production d'énergie solaire, plusieurs domaines de recherche se concentrent sur ce sujet, soit l'aspect lié à l'amélioration de l'efficacité des panneaux solaires, soit l'aspect du contrôle. Le premier aspect a été traité dans le premier chapitre. Quant au second aspect, il sera abordé de manière générale dans ce chapitre, où les différents types de MPPT seront présentés.

De nombreuses techniques sont utilisées pour contrôler l'énergie photovoltaïque, telles que la modulation de largeur d'impulsion (MLI), le suivi du point de puissance maximale (MPPT), etc. L'algorithme MPPT est l'une des techniques les plus populaires. L'objectif principal de cette méthode est d'ajuster automatiquement le rapport cyclique ( $a$ ) du convertisseur statique, afin de fonctionner à la valeur idéale de la puissance produite par le panneau PV et d'optimiser sa puissance. Ce dernier fonctionne dans toutes les conditions

atmosphériques, les conditions environnementales et les différents niveaux d'irradiation solaire.

## 2.7 Méthodes MPPT

Il existe plusieurs types de commandes MPPT [62] qui peuvent être appliquées à différents convertisseurs statiques, et elles sont résumées dans la figure suivante :



**Figure 2.10:** Classification des différents types de commandes MPPT

### 2.7.1 Méthodes classiques

Les algorithmes MPPT traditionnels sont les premières techniques utilisées pour déterminer le point de puissance maximale [62]. Malgré les lacunes de ces algorithmes pour un suivi efficace, ils sont toujours utilisés dans les applications industrielles en raison de leur facilité d'utilisation et de leur fiabilité relativement acceptable.

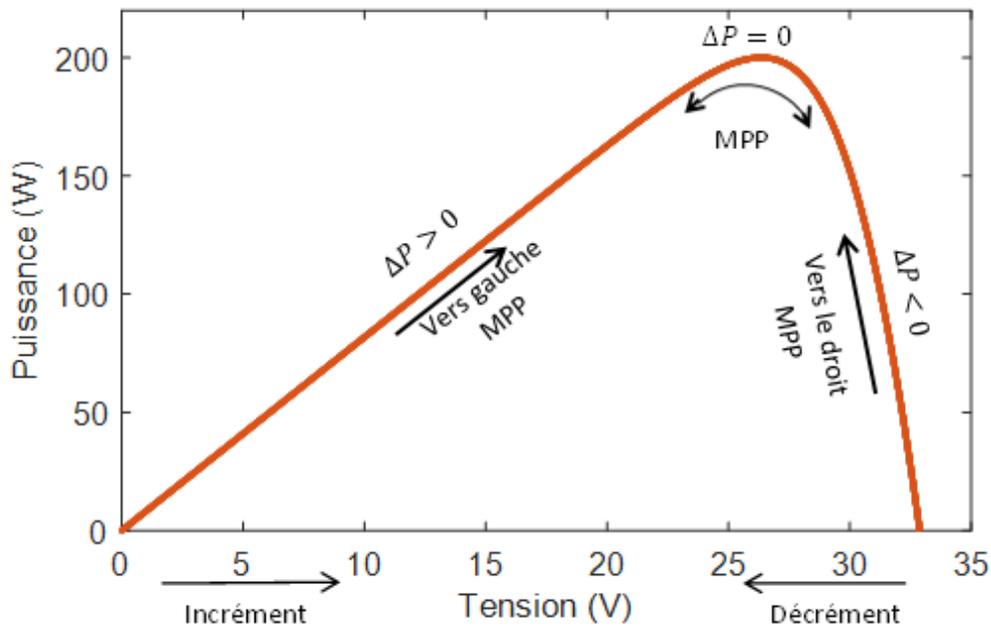
#### 2.7.1.1 Perturbation & observation (P&O)

En raison de la simplicité de sa conception et de sa mise en œuvre, l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) est considéré comme l'approche MPPT la plus populaire.

Les algorithmes P&O fonctionnent en perturbant irrégulièrement la tension ou le courant terminal du générateur (c'est-à-dire en l'augmentant ou en le diminuant) et en comparant la puissance de sortie PV avec celle du cycle de perturbation précédent.

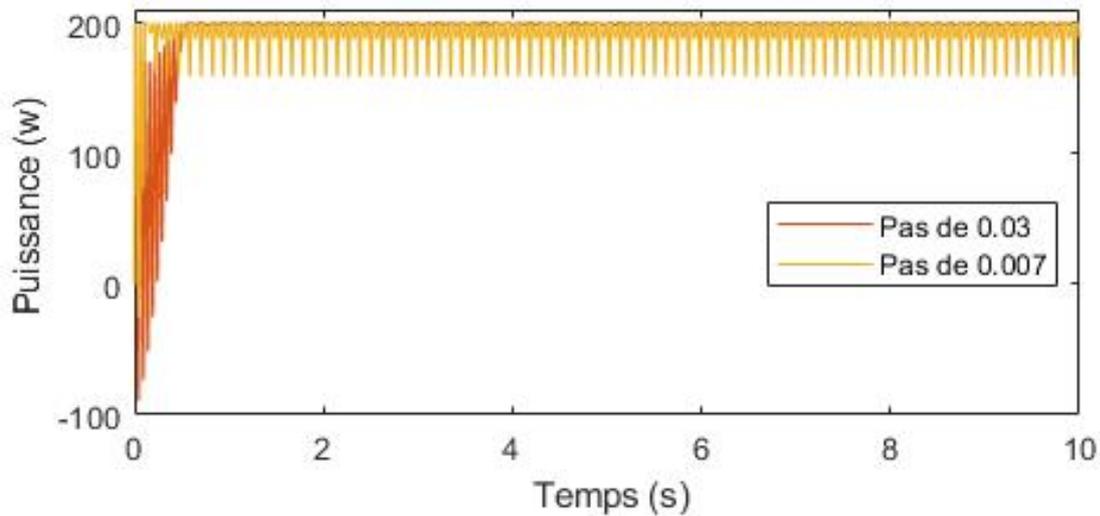
Le système de contrôle déplace le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque dans la direction indiquée si la tension de fonctionnement du générateur pho-

tovoltaïque change et que la puissance augmente ( $dP_{pv}/dV_{pv} > 0$ ); sinon, le point de fonctionnement est déplacé dans l'autre direction. L'algorithme continue à fonctionner de la même manière au cours du cycle de perturbation suivant [54]. Figure. 2.11 explique les étapes de cet algorithme.



**Figure 2.11:** Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O

La principale difficulté de cette méthode réside dans la possibilité de sélectionner une taille de pas appropriée. Une taille de pas plus grand permet un temps de réponse plus rapide mais augmente l'oscillation autour du MPPT. D'autre part, une taille de pas légèrement plus petite augmente l'efficacité mais diminue la convergence.



**Figure 2.12:** Différentes valeurs de pas avec irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et température  $25^\circ\text{C}$

En général, cet algorithme classique dépend fortement des conditions initiales et présente des oscillations autour de la valeur optimale de la puissance [63]. L'inconvénient majeur de cet algorithme est caractérisé par son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement [64].

### 2.7.1.2 Incrementale/Conductance (IC)

La deuxième approche classique est basée sur un contrôleur qui permet de mesurer instantanément les variations de tension et de courant du panneau solaire, afin d'avoir toujours un état stable au point de puissance maximale, grâce au fonctionnement continu de l'équation suivante :  $dP/dV = 0$ . Sinon, l'algorithme recherche le point de fonctionnement par ajustement de la tension pour lequel la conductance est égale à la conductance incrémentale. Cette technique prend en entrée la conductance incrémentale ( $dI/dV$ ) du panneau photovoltaïque afin de déterminer le signe de la variation de la puissance par rapport à la tension ( $dP/dV$ ).

Cette technique présente certains inconvénients, notamment des oscillations à proximité du point de puissance maximale et des réactions retardées du système en cas de changement des conditions météorologiques [65].

## 2.7.2 Méthode intelligente

Les méthodes classiques se caractérisent par plusieurs inconvénients. Plusieurs solutions ont été proposées afin d'améliorer la réponse de suivi et de maximiser l'efficacité de la production d'énergie photovoltaïque pour toute distribution donnée des niveaux

de rayonnement solaire ainsi que pour toute température ambiante [66]. Par conséquent, dans cette partie, on discute des techniques d'intelligence qui donnent des résultats plus efficaces avec une très grande précision.

### 2.7.2.1 Commande par logique floue

La technique de la logique floue est considérée comme une méthode basée sur l'intelligence artificielle, elle a été découverte par Lotfi Zadah [67], et que nous appelons la méthode linguistique ; l'ensemble des règles permet une description linguistique des variables à contrôler et se base sur la connaissance du processus. L'utilisation de cette technique dans le domaine photovoltaïque, et en particulier pour le contrôle MPPT, donne de bons résultats. Cependant, les points essentiels de cette technique se divisent en deux : la vitesse de convergence et la précision du suivi du point de puissance maximale. Cependant, un problème majeur est que cette méthode est incapable de se généraliser facilement, car elle ne répond qu'à ce qui est écrit dans sa base de règles, elle n'est pas non plus robuste par rapport aux changements topologiques du système, de tels changements nécessiteraient des modifications de la base de règles on peut conclure que le système flou avec de bonnes performances n'est pas une tâche facile. [68]. De plus, la recherche des fonctions d'appartenance et des règles appropriées est souvent un processus épuisant, sans parler de la nécessité de faire appel à un expert pour déterminer les règles logiques d'inférence.

L'architecture générale d'un système basé sur la logique floue est présentée dans Figure. 2.13. Le contrôleur flou est configuré en quatre étapes, à savoir : fuzzification, base de connaissances floues, Engine différences floues et la défuzzification.

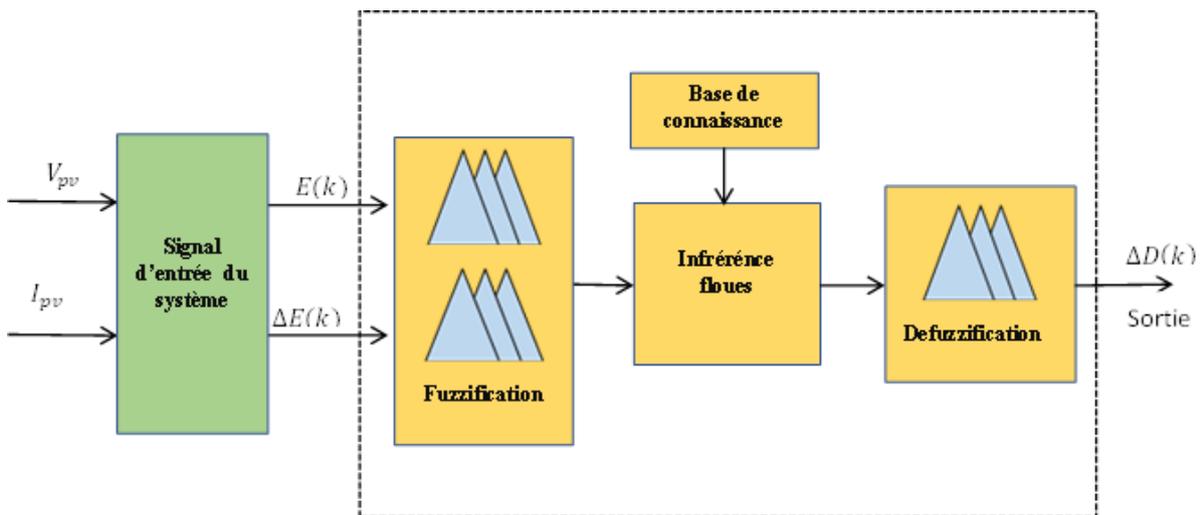


Figure 2.13: Structure générale d'un contrôleur MPPT flou

### 2.7.2.2 Réseau de neurone artificielle (RNA)

La technique des réseaux neuronaux artificiels est un algorithme de nature biologique, qui est appliqué pour résoudre des problèmes linéaires et non linéaires. La méthode MPPT est considérée comme l'une des recherches qui a grandement bénéficié de cette technique afin d'obtenir des résultats satisfaisants et plus pratiques.

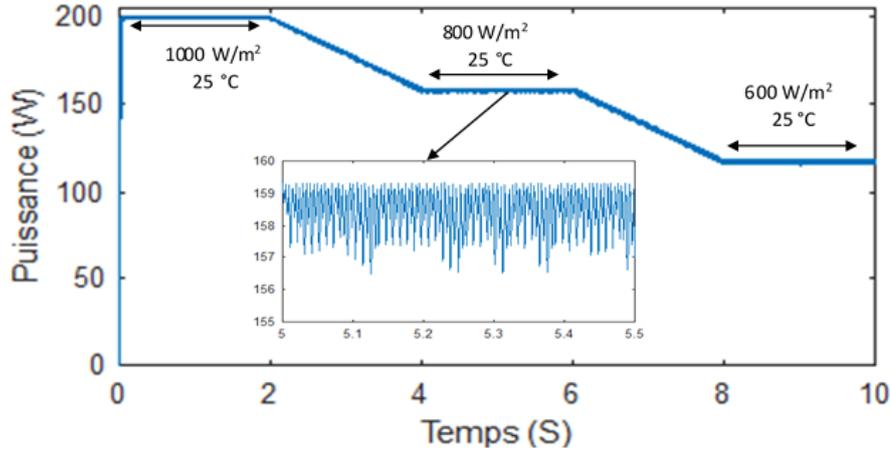
Ces applications RNA ne nécessitent aucune connaissance approfondie du système ou de la modélisation mathématique. Elles peuvent donc résoudre des problèmes beaucoup plus complexes en cartographiant correctement les entrées-sorties du système [69]. En raison du processus d'apprentissage inhérent et de la structure biologique des neurones, l'application de l'RNA au MPPT donne de bons résultats. Un graphe orienté peut être utilisé pour décrire un RNA dans sa forme la plus simple.

### 2.7.2.3 Commande par mode glissant

La commande par mode glissant (SMC), une commande non linéaire, est une technique essentielle et cruciale pour un contrôle fiable et efficace permettant de suivre rapidement le MPP. Un système d'ordre supérieur peut devenir un système de premier ordre grâce à cette stratégie [70]. La conception d'un contrôleur à mode glissant apporte une réponse logique à la question de la préservation de la stabilité et de la cohérence des performances face à l'incertitude de la modélisation. D'autre part, la capacité à quantifier les compromis entre la modélisation et les performances peut profiter à l'ensemble du processus de conception. Les trois modes utilisés pour caractériser l'avancement du processus en mode glissant sont les suivants : la traçabilité, l'atteignabilité et le contrôle équivalent [71].

Le principal avantage de cette technique est son indépendance par rapport à la taille ou au type de panneau photovoltaïque. En particulier, cette approche non linéaire présente une nature robuste, suit efficacement le MPP et réduit également l'ondulation causée par le convertisseur [70]. D'autre part, dans le cas de l'application de ce contrôle pour le contrôle MPPT, il y a trois inconvénients principaux : le phénomène de bavardage, la fréquence de commutation variable et l'erreur en régime permanent dans la tension de sortie.

La Figure. 2.14 illustre différents niveaux d'éclairement (100, 800 et 600 W/m<sup>2</sup>), à une température de 25°C. Le zoom est présente l'inconvénient majeur de ce type de commande.



**Figure 2.14:** Résultat de simulation d'un MPPT utilisant la SMC

La conception de la commande repose sur deux étapes importantes : premièrement, le choix de la surface de glissement  $s(x) = 0$  qui détermine la trajectoire que la commande doit suivre, deuxièmement, la détermination des lois de commande qui permettent de maintenir et de stabiliser cette commande sur la surface de glissement [71].

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (2.1)$$

La surface de glissement est donnée par :

$$s = \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = V_{pv} + I_{pv} \frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.2)$$

La détermination de la loi de contrôle est donnée comme suit :

$$U = U_{eq} + U_n \quad (2.3)$$

Le contrôle équivalent a été suggéré pour la première fois par Slotine-Li et est déterminé par la condition suivante :

$$\dot{S} = \left[ \frac{ds}{dx} \right]^T \dot{X} = \left[ \frac{ds}{dx} \right]^T (A.X + B(x)u + d) = 0 \quad (2.4)$$

Nous considérons  $d=0$ , pour simplifier le calcul, le contrôle équivalent devient :

$$U_{eq} = \frac{\left[ \frac{ds}{dx} \right]^T (A.X)}{\left[ \frac{ds}{dx} \right]^T b(x)} \quad (2.5)$$

La commande de commutation peut être une fonction linéaire de la surface de glissement,

elle est donnée par :

$$U_n = -k \operatorname{sgn}(s) \quad (2.6)$$

$K$  : une constante positive déterminée par la structure.

Le contrôleur SMC est donc :

$$U = \frac{\left[\frac{ds}{dx}\right]^T (A.X)}{\left[\frac{ds}{dx}\right]^T b(x)} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (2.7)$$

Étude de stabilisation :

On a choisi d'utiliser une fonction, à savoir Lyapunov, donnée par :

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.8)$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V} = S * \dot{S}, S < 0, \forall S \neq 0 \quad (2.9)$$

### 2.7.3 Méthode hybride

Les performances des techniques classiques ne permettent pas de suivre la MPP dans des situations anormales telles que le changement climatique.

Cela a conduit à la conception de techniques plus efficaces pour surmonter ce problème. Toutefois, ces méthodologies avancées se sont également heurtées à de multiples problèmes. Il est donc nécessaire de concevoir une technique hybride plus efficace qui atténue tous les inconvénients. Comme le montre clairement la section sur les techniques d'optimisation, ces méthodes souffrent d'une charge de calcul plus élevée en raison du processus de calcul mathématique nécessaire à l'exécution du mécanisme de suivi [72].

#### 2.7.3.1 Méthode P&o optimisée par PSO

La méthode P&O est principalement utilisée en raison de la simplicité de son algorithme et de sa plus grande efficacité de suivi. Dans cette méthodologie également, le LMPP est d'abord détecté par la méthode P&O, puis le GMPP final est obtenu à l'aide de la méthode PSO.

Il s'agit d'un algorithme combiné qui associe les algorithmes d'optimisation par essaims de particules (PSO) et les algorithmes de perturbation et d'observation (P&O), qui ont été expliqués précédemment. Lors de l'exécution du MPPT à l'aide de l'optimisation par essaim de particules (PSO), la position de chaque particule est mise à jour de manière à

ce que toutes les particules gravitent lentement et régulièrement vers le point de puissance maximale [73]. Il faut plus de temps pour que toutes les parties atteignent la MPP, c'est pourquoi, afin de réduire le temps de recherche, l'algorithme P&O est lancé avec le point de départ comme la meilleure position de particule dans l'algorithme PSO. La méthode P&O est un algorithme prometteur qui converge vers la GMPP, si le point de départ de la recherche est plus proche de la GMPP. Il est donc proposé de balayer la courbe PV d'abord avec la méthode PSO, puis d'utiliser la méthode P&O [74].

### 2.7.3.2 Commande adaptative par mode glissant

Il existe une autre technique MPPT appelée contrôle adaptatif du mode de glissant. Ce contrôleur combine le concept de mode glissant et la stratégie de contrôle flou pour concevoir un contrôleur de mode glissant adaptatif. L'approche floue adaptative sera utilisée pour générer des gains de commutation adaptatifs. Les références [75–77] donnent plus d'explications et de détails sur cette combinaison intelligente. La conception du contrôleur proposé est basée sur deux étapes importantes. La première étape consiste à choisir la surface de glissement  $s(x) = 0$  qui détermine la trajectoire que la commande doit suivre. Dans ce cas, elle est déterminée comme suit :

$$s = \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.10)$$

La deuxième étape consiste à déterminer les lois de contrôle qui permettent de maintenir et de stabiliser ce contrôle sur la surface de glissement, comme l'indique la relation suivante :

$$U_{afsmc} = -k_{fzz} \cdot \text{sgn}(s) \quad (2.11)$$

Où u-FSMC représente la loi de commande par mode glissant modifiée par la logique floue et  $k_{fzz}$  représente le gain flou de la commande développée.

La Figure. 2.15 illustre le schéma équivalent de la commande AFSMC, qui contient les éléments de la commande SMC avec la logique floue.

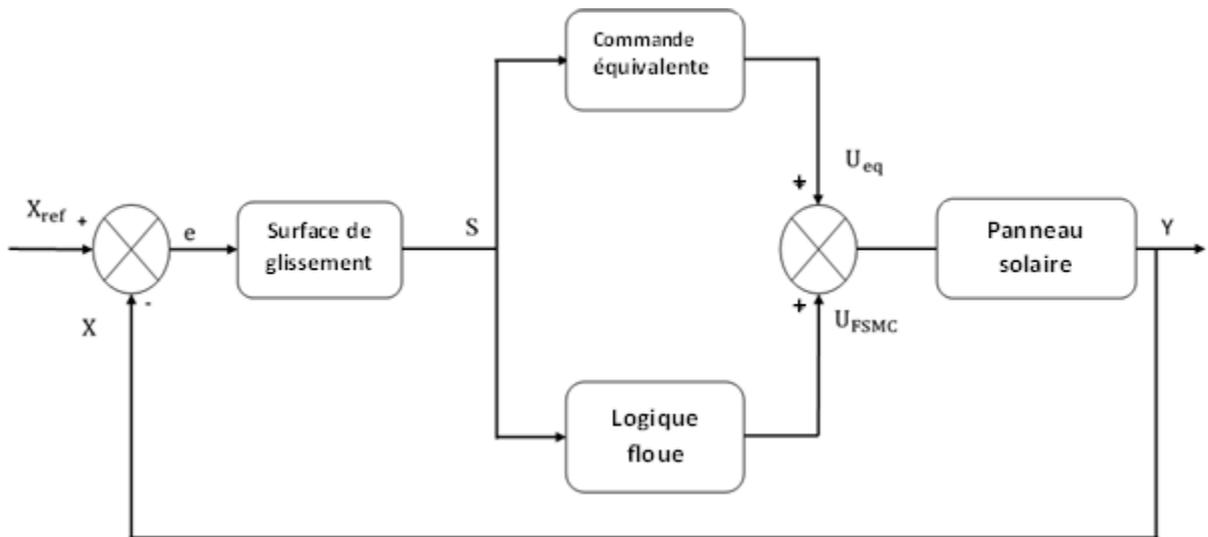


Figure 2.15: Schéma équivalent de la commande AFSMC

## 2.7.4 Autres méthodes

Cette méthode utilisée afin de rechercher des sources de nourriture ou de choisir l'itinéraire optimal, pour d'atteindre les lieux de nourriture. Le comportement de certaines espèces dans la nature tourne autour du travail d'équipe et de la coopération afin d'augmenter leurs chances de survie. Toutefois, pour recueillir des informations sur ce système, les parties intéressées utilisent généralement une combinaison de leurs propres expériences, des connaissances des membres de ce groupe, de leur propre historique d'apprentissage, ainsi que de leur propre apprentissage social ou collectif. Ce type de comportement social permet une transmission rapide des informations et des réponses plus rapides. [78]. Ces algorithmes ont été appliqués et transférés au domaine du contrôle des panneaux photovoltaïques afin d'améliorer les commandes de suivi du point de puissance maximale.

### 2.7.4.1 Optimisation par Essaim de Particules

L'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) est également bio-inspiré et s'inspire des essaims d'oiseaux et des essaims de poissons. Le processus de recherche de la réponse optimale nécessite une ou plusieurs hypothèses communiquées par les membres de l'essaim.

Pour appliquer cet algorithme au contrôle MPPT, chaque panneau ou module photovoltaïque est considéré comme une molécule dans ce bioprocessus, et le MPP est considéré comme le résultat souhaité à suivre. Par conséquent, chaque module PV sert d'esclave à un seul module maître, et chaque module communique avec son contrôleur maître pour suivre le MPP nécessaire. Il prend en compte le nombre d'essaims individuels, qui remplacent les solutions individuelles et poursuivent leur mouvement dans la zone de recherche. Il suit

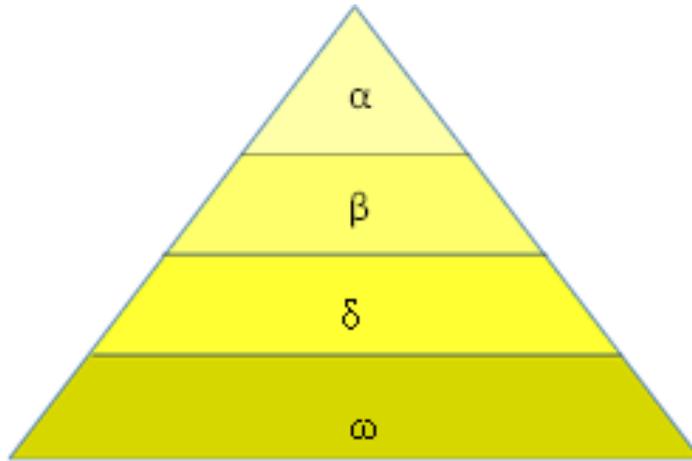
sa propre trajectoire ainsi que celle des particules voisines [79].

Comme tous les algorithmes, il présente également un certain nombre de problèmes. Les principaux inconvénients de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) sont qu'il est facile de tomber dans l'optimum dans un espace à haute dimension et que le taux de convergence est faible dans le processus itératif [80].

#### 2.7.4.2 Optimisation du loup gris

Les loups gris préfèrent vivre en groupes et sont considérés comme étant au sommet de la chaîne alimentaire dans la nature. Cela nécessite des méthodes et des procédures de chasse.

Cet algorithme a été proposé par Mirjalili et al [81]. L'algorithme est basé sur la structure sociale du loup gris et sur ses méthodes de chasse. Pour imiter une structure de direction, les membres de la meute ont été divisés en quatre types de loups gris : alpha ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), delta ( $\delta$ ) et oméga ( $\omega$ ).



**Figure 2.16:** Hiérarchie sociale du loup gris

La solution alpha ( $\alpha$ ) est la mieux adaptée pour simuler quantitativement la hiérarchie sociale des loups lors de la construction d'un GWO. Par conséquent, beta ( $\beta$ ) et delta ( $\delta$ ), respectivement, sont les noms des deuxième et troisième meilleures solutions. Les autres solutions possibles sont oméga ( $\omega$ ). La chasse à la proie, la poursuite de la proie, l'encerclement de la proie et l'attaque de la proie sont les éléments de base de l'algorithme GWO qui sont mis en œuvre pour concevoir le GWO.

Pour le nombre de loups gris, c'est-à-dire les rapports cycliques, le contrôleur mesure  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  à travers des capteurs et calcule la puissance de sortie. Il convient de noter que lorsque les loups trouvent le MPP, leurs vecteurs de coefficients corrélés deviennent presque égaux à zéro [82].

### 2.7.4.3 Algorithme de colonie d'abeilles artificielles

La méthode de recherche de colonies d'abeilles artificielles est bien utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour trouver le point optimal en utilisant la fonction d'activation correcte. Son efficacité est proche de 99,99 L'ABC a l'avantage d'utiliser moins de paramètres de contrôle. Les principaux inconvénients de cet algorithme sont la poursuite lente, la complexité et la poursuite du point maximum local (LMPP) qui peut être affectée par paramètres de contrôle. L'algorithme imite le comportement intelligent de recherche de nourriture des essaims d'abeilles. Il s'agit d'un algorithme d'optimisation stochastique très simple et très puissant. L'algorithme ABC se compose de trois groupes d'abeilles : les ouvrières, les spectateurs et les exploratrices. Chaque groupe a une tâche différente dans le processus d'amélioration [83].

Les abeilles ouvrières exploitent les sources de nourriture et renvoient à la ruche les données relatives à la source de nourriture. Elle partagent ces données avec les abeilles spectatrices. [84]. Par conséquent, les bonnes sources de nourriture attirent plus d'abeilles spectatrices que les mauvaises. Lorsqu'une source de nourriture est entièrement exploitée, toutes les abeilles ouvrières associées abandonnent la source de nourriture et deviennent des éclaireuses. Les abeilles éclaireuses recherchent de nouvelles sources de nourriture. On peut considérer que les abeilles ouvrières et spectatrices remplissent une fonction d'exploitation, tandis que les abeilles éclaireuses remplissent une fonction d'exploration [85] [86].

## 2.8 Résultats de simulation

Les résultats ont été appliqués et validés à l'aide de MATLAB/Simulink, afin de tester les différentes techniques MPPT. La figure ci-dessous présente les différentes parties du système PV, le générateur photovoltaïque (module), le convertisseur DC-DC (hacheur élévateur (Boost)) avec contrôle MPPT et la charge.

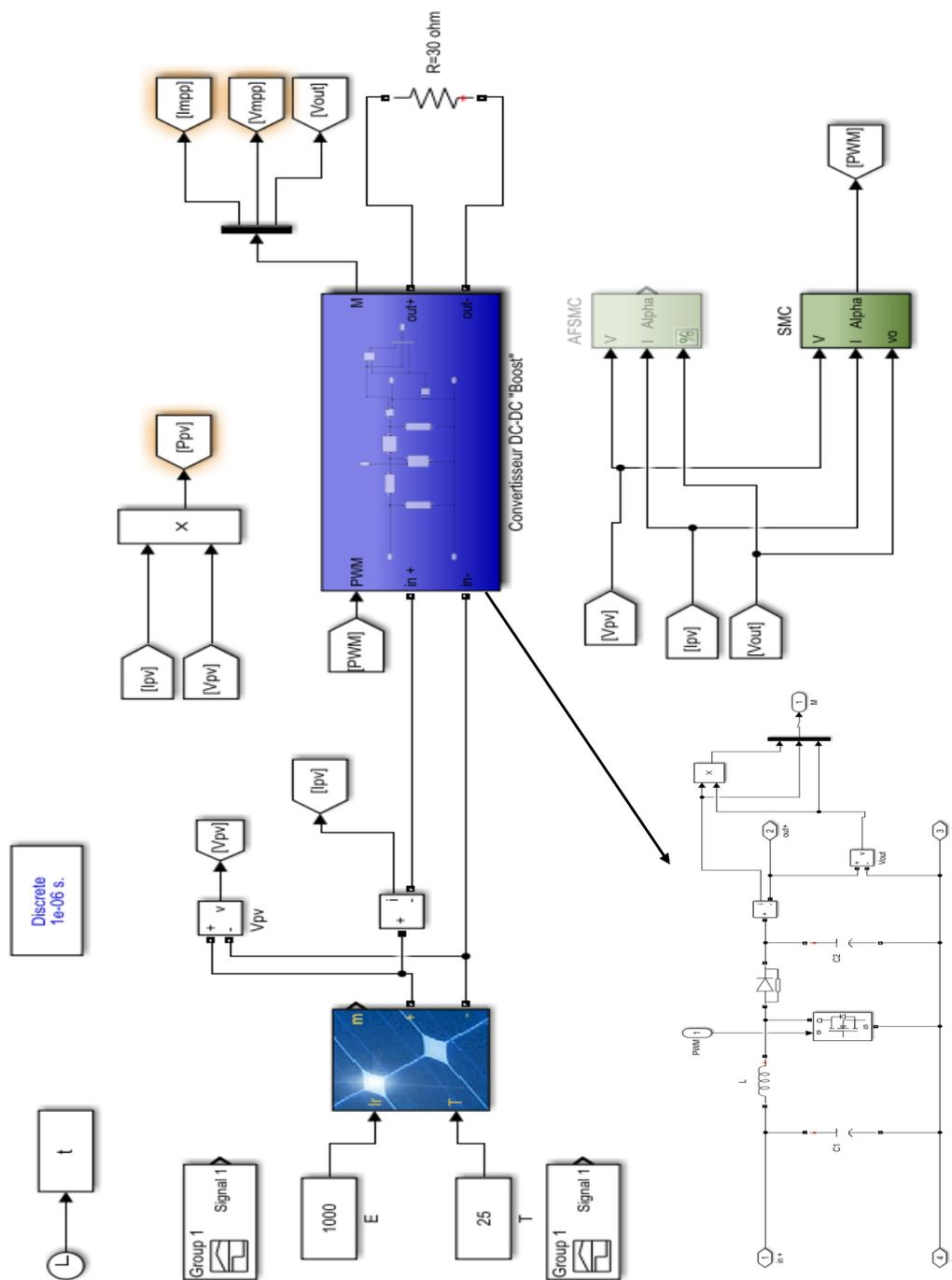
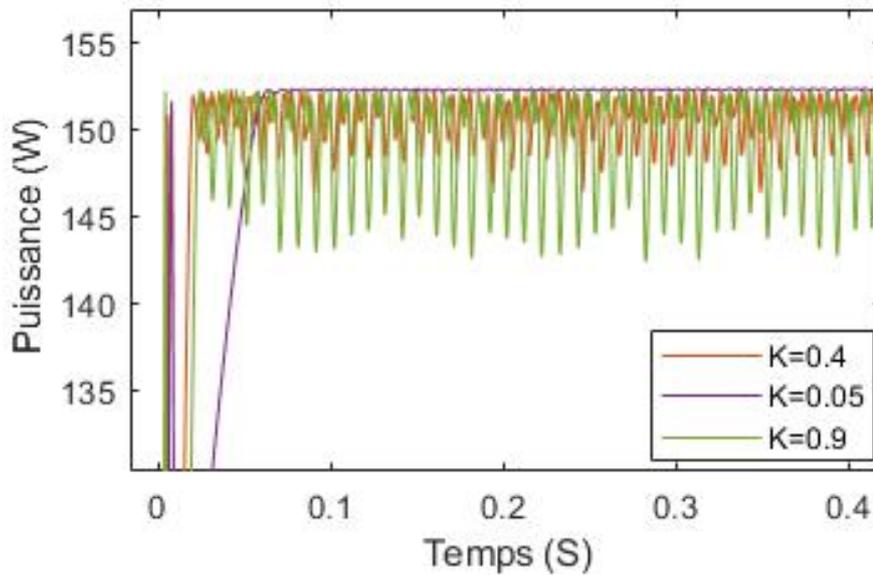


Figure 2.17: Schéma bloc présentant les différentes parties du système photovoltaïque

Dans la commande par mode glissant, le point le plus important est le choix de la valeur du gain ( $k$ ). Il existe deux possibilités pour choisir la valeur du gain ( $k$ ). Dans le cas premier,  $k$  est grand, nous obtenons une convergence rapide mais avec de grandes oscillations. D'autre part, pour une petite valeur de gain ( $k$ ), la convergence est très lente mais avec une valeur de précision élevée. La figure suivante illustre les différentes valeurs de ( $k$ ) avec leurs avantages et inconvénients.



**Figure 2.18:** Différentes valeurs de gain ( $k$ )

Il existe de nombreux algorithmes, tels que P&O, FLC, ACO et PSO, pour obtenir la plus grande quantité d'énergie générée par le panneau solaire. L'approche utilisée par ces algorithmes, que certains chercheurs ont mis au point, varie en fonction de la puissance souhaitée, où chaque approche présente des avantages distincts.

Parmi les critères de classification de l'efficacité des méthodes MPPT, on trouve la complexité de l'exécution ou de la mise en œuvre de la commande, le temps de réponse, la rapidité, la présence ou non d'oscillations (fluctuations) autour du MPP et le degré d'efficacité, etc.

**Tableau 2.1:** Étude comparative avec les travaux de recherche existants dans la littérature

Méthode MPPT	Méthode de commande	Temps de réponse	Vitesse de suivi	Oscillation	Efficacité du suivi (précision)
SMC [87]	Simple	Élevé	Très élevée	Élevée	Élevée
P&O	Simple	Faible	Faible	Élevée	Faible
FLC [68]	Simple	Moyen	Lente	Moyenne	Élevée
ACO [88]	Complexe	Moyen	Élevée	Faible	Élevée
PSO [89]	Complexe	Moyen	Élevée	Faible	Élevée
La méthode proposée	Simple	Élevé	Très élevée	Faible	Élevée

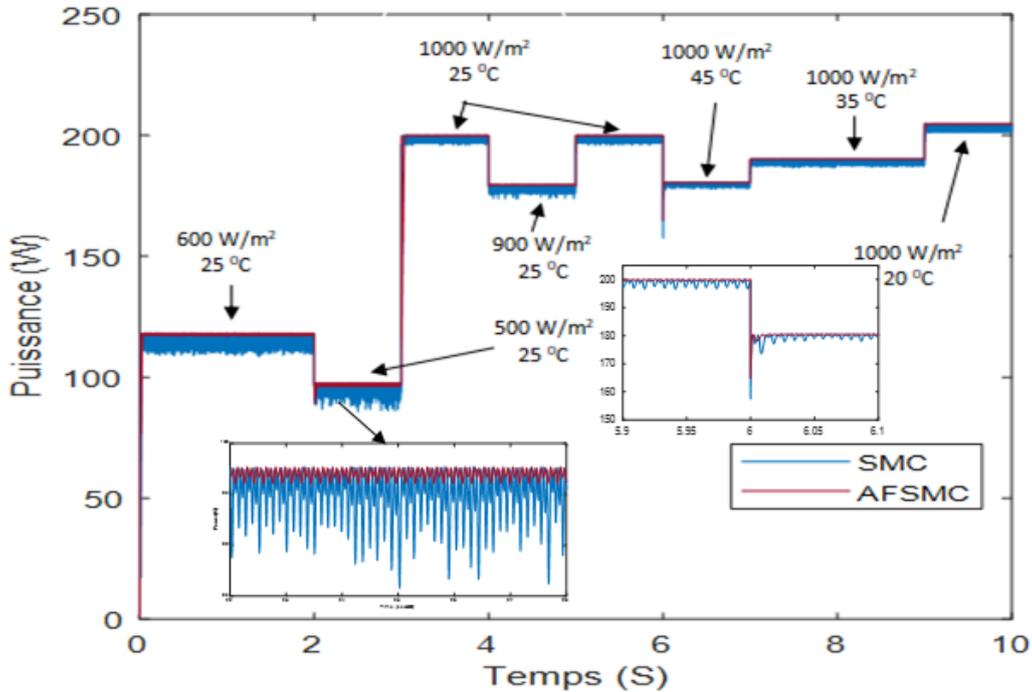
Le tableau résume une évaluation entre les méthodes MPPT. Cependant, la référence [87] propose une méthode appelée SMC pour suivre rapidement le point de puissance maximale. La méthode proposée donne de bons résultats et offre une grande efficacité de suivi pour les générateurs photovoltaïques, ainsi qu'un temps de réponse rapide à un changement soudain des conditions climatiques (rayonnement solaire et température). Le principal problème de cette méthode est le niveau d'oscillation (phénomène de chattering).

Ensuite, dans la référence [68], les chercheurs proposent une méthode basée sur la logique floue pour surmonter les problèmes rencontrés dans la méthode traditionnelle (P&O). Parmi ces lacunes constatées dans la méthode traditionnelle, on retrouve les grandes oscillations, notamment à l'heure du changement climatique. Les résultats de simulation utilisés dans l'article [68] prouvent la supériorité de la méthode de la logique floue en termes de temps de stabilité et d'oscillations au point de fonctionnement. Le principal problème de la méthode de la logique floue réside dans les règles utilisées car elles dépendent de l'expérience humaine.

Il existe une autre méthode basée sur l'algorithme de la colonie de fourmis qui a été suggérée par la référence [88]. Le principe de cette méthode est basé sur le comportement des fourmis à la recherche de nourriture. Les résultats obtenus se sont avérés prometteurs pour le suivi du point de puissance maximale. Cette méthode est considérée comme l'une des plus difficiles dans ses lois. La référence [89] propose une méthode appelée optimisation par essaim particulaire. Cette méthode a été testée dans plusieurs conditions d'ombrage partiel. Cet algorithme s'est avéré être une méthode très rapide et précise. Cette méthode, comme les précédentes, est assez compliquée. Le tableau 1 présente une comparaison entre certaines méthodes MPPT.

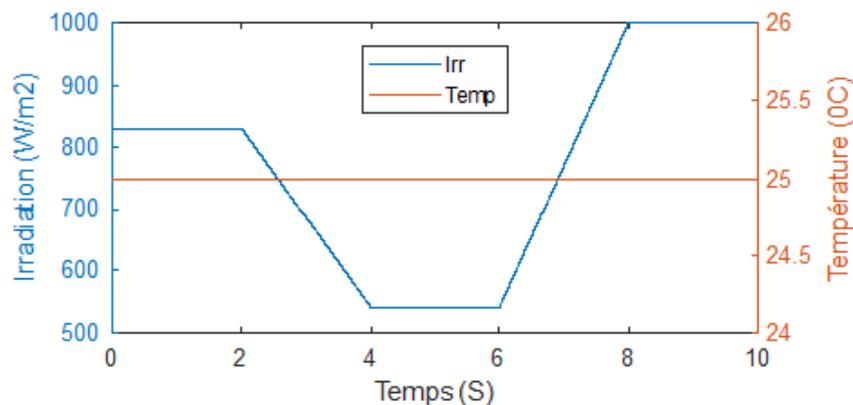
L'un des contrôles les meilleurs et les plus fiables pour obtenir le point de puissance maximale du système photovoltaïque dans diverses conditions ou changements climatiques

est le contrôle par mode glissant. Malgré cela, le phénomène de "chattering" pose toujours un problème majeur aux chercheurs.

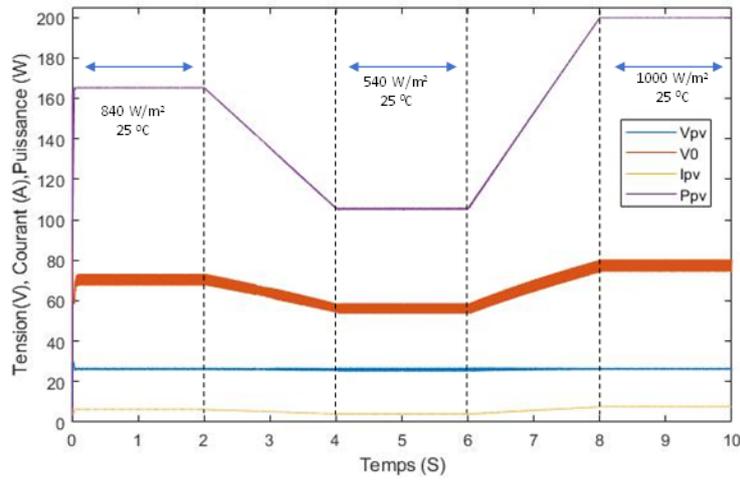


**Figure 2.19:** Comparaison entre la méthode SMC et la méthode AFSCM

Les résultats obtenus dans la Figure. 2.19 montrent que la méthode AFSCM est très robuste et que son temps de réponse est très court par rapport à la méthode SMC. On note la présence du phénomène de "chattering" dans la méthode SMC. L'AFSCM est une bonne méthode pour surmonter ce phénomène.

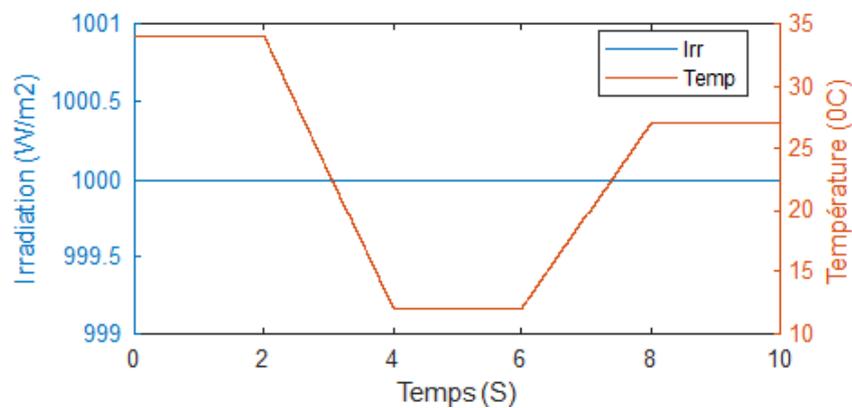


**Figure 2.20:** Scénario de changement des valeurs d'irradiation sans changement de la valeur de la température



**Figure 2.21:** Test de performance en cas de changement des valeurs d'irradiation

Plusieurs tests ont été réalisés pour évaluer les performances de la technique AFSCM en la comparant à la technique SMC, comme le montre la Figure. 2.19. Ces courbes montrent la puissance, la tension et le courant du panneau photovoltaïque ainsi que la tension entre les bornes de charge. La Figure. 2.21 représente l'effet du rayonnement sur la puissance, la tension et le courant du panneau solaire. La Figure. 2.23 représente l'effet de la température sur ces grandeurs, tandis que la Figure. 2.24 représente l'effet de la variation de la valeur de la charge sur le rapport cyclique. Ces courbes montrent que la tension est moins affectée par les variations de rayonnement que le courant. Les formes des courbes de tension d'entrée et de sortie montrent que le convertisseur est un convertisseur élévateur de tension. La conclusion est que l'AFSCM est plus performant en termes de performances statiques et dynamiques.



**Figure 2.22:** Scénario de modification des valeurs de température sans modification de la valeur d'irradiation

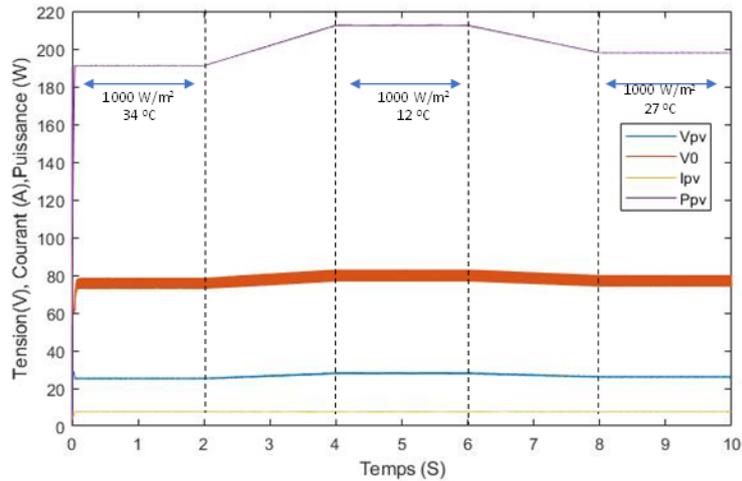


Figure 2.23: Test de performance en cas de changement des valeurs de température

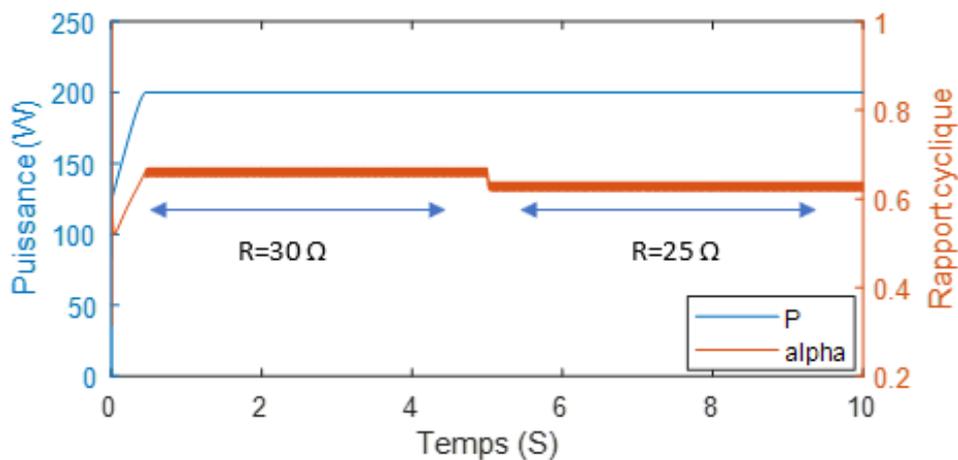


Figure 2.24: Test de variation de la valeur de charge

## 2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, les types de convertisseurs statiques ont été présentés ainsi que leurs séquences de fonctionnement, puis les commandes de suivi (MPPT) ont été traitées et les différentes méthodes utilisées ont été présentées : classique, intelligente, par l'optimisation et hybride.

L'importance de ces méthodes réside dans le contrôle du convertisseur DC-DC afin d'obtenir une extraction optimale de l'énergie produite par le panneau solaire. La plupart des techniques MPPT utilisées diffèrent en termes de temps de réponse et de précision. D'après ce qui a été dit précédemment dans ce chapitre, on considère que les méthodes hybrides ont donné de bons résultats.

Les panneaux solaires sont sujets à de nombreux défauts et pannes. Dans le chapitre suivant, on abordera les défauts de fonctionnement associés aux systèmes photovoltaïques, leur impact sur la stabilité du système et les méthodes pour les détecter.

## Chapitre 3

# Défauts associés aux systèmes photovoltaïques

## 3.1 Introduction

L'identification, la détection et la localisation des défauts est un domaine intéressant dans divers domaines technologiques, en particulier dans les domaines de l'énergie et de l'exploitation des ressources d'énergies renouvelables. Afin d'assurer la sécurité énergétique et la continuité de l'approvisionnement, le domaine des énergies renouvelables en général, de différents types, bénéficie de ce développement dans les aspects d'exploitation et de diagnostic. Ceci est dû à la grande variété d'utilisations des centrales photovoltaïques, qui est un bon indicateur de la tendance claire d'investissement dans les énergies renouvelables et respectueuses de l'environnement [3].

Les chapitres précédents ont présenté les différents types de modules photovoltaïques, avec leur productivité en fonction de la technologie de fabrication, puis les différentes techniques de contrôle afin d'obtenir la plus grande quantité possible d'énergie produite. Les conditions météorologiques affectent l'efficacité du système photovoltaïque, mais cet effet ne peut être que temporaire, et il peut également être éliminé lorsque la cause du défaut est éliminée. En revanche, les défauts qui apparaissent dans les panneaux photovoltaïques sont l'inverse de l'effet des conditions météorologiques. Ils ont un effet permanent et peuvent se développer, peut-être progressivement. Ils peuvent avoir un impact important et peuvent même entraîner des brûlures et des dommages à ces panneaux. Dans ce chapitre, les différents défauts qui peuvent apparaître dans un système photovoltaïque seront présentés.

## 3.2 Terminologie du diagnostic

La première étape de ce chapitre consiste à établir une nomenclature cohérente pour les concepts de base, ce qui est important étant donné la variété et l'abondance des expressions rencontrées dans le domaine de la détection des défauts [90]. Dans cette section, on présentera une variété de significations et de termes utilisés dans le domaine du diagnostic des défauts.

Les termes ci-dessous sont basés sur le comité technique SAFEPROCESS de la fédération internationale de contrôle automatique de l'IFAC (International Federation of Automatic Control) [27].

- Défaut : toute variation d'au moins une caractéristique observée par rapport à la caractéristique de référence requise, correspondant à l'état de fonctionnement normal et normalisé du système surveillé.

- Défaillance : se produit lorsqu'un système physique n'est pas en mesure de remplir sa fonction principale ou l'une de ses fonctions. Un défaut peut résulter d'une défaillance.

Toutefois, la défaillance n'est pas toujours le résultat d'un défaut. En d'autres termes, il s'agit d'une perte inévitable de la capacité d'un système à remplir une fonction nécessaire dans des circonstances de fonctionnement particulières.

- Perturbation : une entrée influençant un système qui provoque un changement momentané par rapport à son état normal.
- Anomalie : un écart entre les performances du système physique et les caractéristiques du système de référence requis.
- Symptôme : manifestation anormale causée par un ou plusieurs défauts, chaque défaut caractérisé par des symptômes peut être différent de l'autre.

### 3.3 Classifications des défauts dans les systèmes

La classification des types de défauts les plus influents dans le système photovoltaïque est très importante, et l'identification de ces défauts est nécessaire, car les défauts ont des effets sur la performance requise et la durée de vie du système photovoltaïque.

Il existe plusieurs catégories différentes pour classer les défauts dans le domaine photovoltaïque. Les auteurs de [91] classent les défauts en fonction de leur durée ; qu'il soit temporaire ou permanent, un problème temporaire peut être résolu manuellement ou automatiquement pour une période prédéfinie, par exemple un défaut d'ombrage.

Il existe d'autres classifications présentées par les auteurs dans [92] où ces défauts sont classés en trois types : physiques, environnementaux et électriques. Premièrement, les défauts physiques peuvent être internes ou externes et comprennent généralement les dommages, les fissures et la détérioration des modules photovoltaïques. En outre, la défaillance des systèmes photovoltaïques peut être causée par l'effet du vieillissement, qui est également un phénomène physique. Deuxièmement : les défauts environnementaux comprennent l'accumulation de saletés et de poussières, l'ombrage temporaire, etc. Les défauts environnementaux permanents comprennent l'ombrage permanent dû à une mauvaise sélection de l'emplacement des panneaux. Les défauts de points chauds dans les modules PV peuvent être causés par un ombrage permanent ou temporaire. Troisièmement, les défauts de circuit ouvert, de ligne à ligne et de mise à la terre sont des exemples de défauts électriques qui peuvent affecter les modules PV, les réseaux ou les systèmes entiers. Le fait de couper des fils dans une ou plusieurs branches d'un circuit PV entraîne des défauts de circuit ouvert.

D'autres classifications ont été adoptées, comme celles présentées par les auteurs dans les références suivantes : [93, 94] .

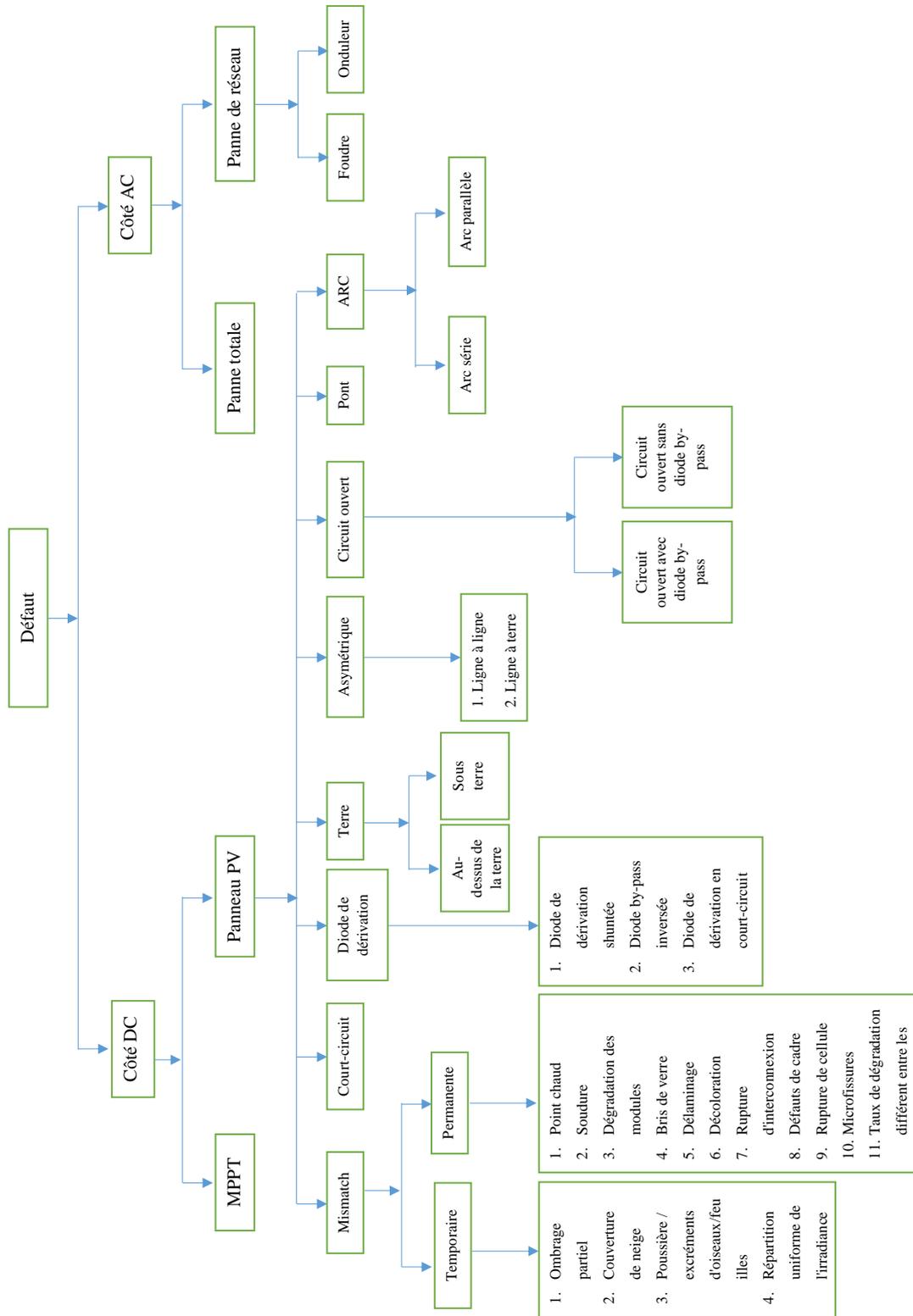


Figure 3.1: Classification des différents types des défauts Pv

La figure suivante représente les caractéristiques P-V et I-V des différents défauts liés au module PV, les caractéristiques du panneau solaire sain sont comparées à celles d'autres panneaux, afin de montrer les différences qui se produisent après que les panneaux ont été affectés par différents défauts.

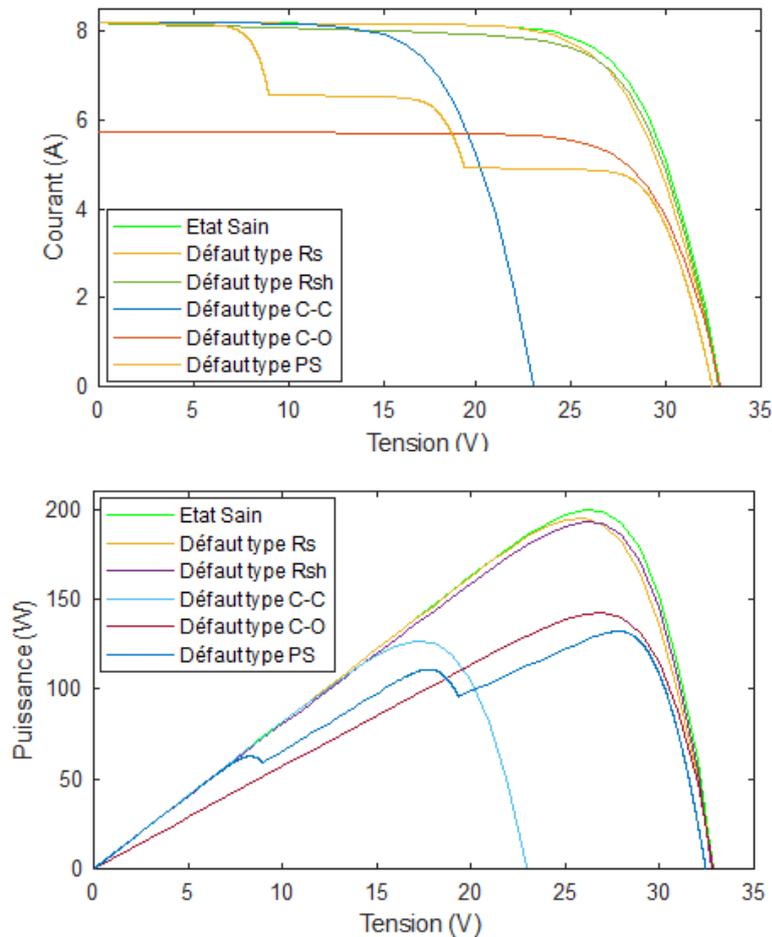


Figure 3.2: Caractéristiques I-V & P-V des différents types des défauts PV

### 3.3.1 Défaut de point chaud

Le défaut de point chaud est un défaut fréquent, en général causé par plusieurs facteurs : ombrage partiel, problème de fabrication du panneau...etc. Mais la cause principale est liée à l'inégalité entre les cellules en série, lorsque la cellule solaire a un courant faible par rapport aux autres cellules, ce dernier provoque un courant de court-circuit élevé. Par conséquent, les centrales et les champs solaires peuvent être gravement endommagés par le problème du point chaud [95].

Toutefois, dans le cas d'une cellule ombragée dans une chaîne, le courant circulant vers les autres bonnes cellules diminue, car le courant global est limité par la mauvaise

cellule. Ces dernières génèrent des tensions plus élevées qui peuvent souvent inverser la polarisation de la cellule ombragée, ce qui entraîne une importante dissipation d'énergie dans la cellule défectueuse. Par conséquent, une perte de puissance intense dans un espace restreint provoque une surchauffe localisée, ou "points chauds", qui a des répercussions dommageables, notamment la fissuration de la cellule ou du verre, la fusion des soudures ou la dégradation des cellules solaires.

### 3.3.2 Dégradation

La dégradation des performances des panneaux solaires est due à différentes causes, telles que des conditions naturelles dures (zones sahariennes et zones très humides). Cette dégradation peut se traduire par plusieurs défauts qui influencent directement les caractéristiques du panneau.

La plupart des problèmes de dégradation peuvent être identifiés par une augmentation des résistances équivalentes en série des modules PV qui se dégradent dans le réseau PV. Une dégradation importante d'un module PV peut entraîner un court-circuit du système PV [96].

Les principales causes de dégradation :

- Augmentation du  $R_s$  due à une diminution de l'adhérence du contact ou à la corrosion (généralement causée par la vapeur d'eau) ;
- Diminution de la  $R_{sh}$  due directement au processus de fabrication (jonction p-n) ;
- Détérioration du revêtement antireflet.

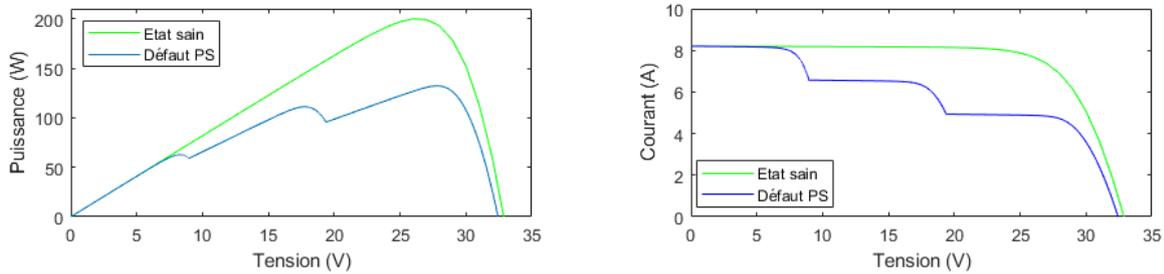
### 3.3.3 Ombrage partiel

L'ombrage est également un problème grave pour les panneaux photovoltaïques et doit être pris en compte lors de la conception. La principale conséquence de l'ombrage est une réduction de la puissance générée par le panneau solaire. La perte de puissance dépend de la taille de l'ombre et de la façon dont elle tombe sur les modules photovoltaïques [97].

Un module photovoltaïque est une chaîne de cellules connectées en série, où toutes les cellules conduisent la même quantité de courant [98]. Lors d'un événement d'ombrage, même s'il y a peu d'ombrage, ces cellules doivent également transporter le même courant que les autres cellules recevant la lumière du soleil. En conséquence, les cellules ombragées peuvent devenir polarisées en sens inverse. Dans ce cas, les cellules ombragées se comportent comme des charges et dissipent l'énergie des cellules pleinement éclairées [99].

L'ombrage partiel déforme les courbes I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) des modules photovoltaïques. Le défaut de l'ombrage partiel peut déplacer le point de fonc-

tionnement vers une nouvelle position sur la courbe I-V, comme le montre Figure. 3.3.

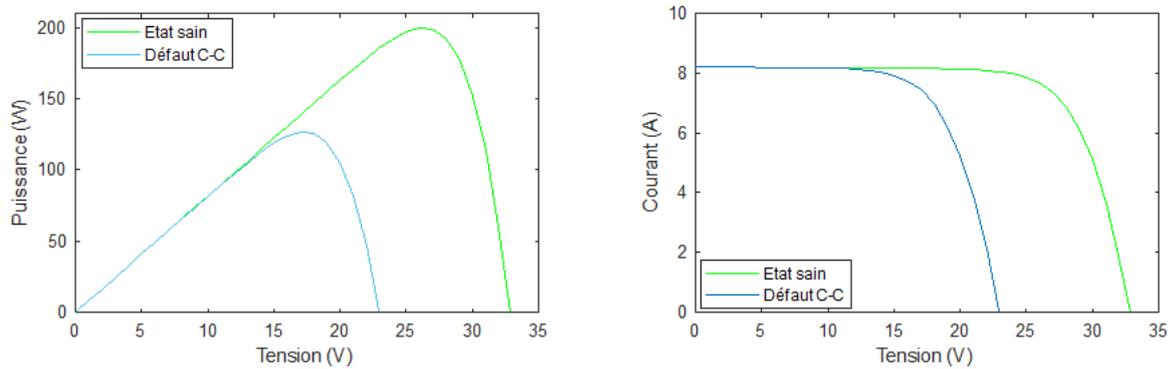


**Figure 3.3:** Caractéristiques I-V & P-V durant l'ombrage partiel

En raison de la nature des propriétés électriques des cellules solaires, celles-ci ne conviennent pas à une installation dans des zones ombragées [100]. Par conséquent, quelques ombres peuvent réduire de manière significative les performances de l'ensemble du système photovoltaïque. Si l'on considère les petites installations photovoltaïques, où il n'y a que peu ou pas de connexions parallèles, une petite partie de l'ombrage peut entraîner une perte d'énergie importante ou provoquer l'effondrement de l'ensemble du système [101]. En plus des pertes de puissance, le panneau peut être endommagé de façon permanente lorsqu'une cellule photovoltaïque atteint la tension de claquage [102]. D'autre part, la panne d'un point chaud (hotspot) est reconnue lorsqu'une partie de la cellule ou du module photovoltaïque indique une température plus élevée que son environnement. Dans les cas les plus graves, cette situation peut créer des risques d'incendies [103].

### 3.3.4 Défaut de court-circuit

Le défaut de court-circuit (C-C) est l'un des défauts les plus courants dans les systèmes photovoltaïques, il peut être classé parmi les défauts les plus dangereux qui peuvent se produire dans les systèmes photovoltaïques [104]. Par conséquent, ce défaut entraîne une diminution de l'efficacité du panneau photovoltaïque. Les auteurs de la référence [104] ont fourni une explication à la défaillance du court-circuit. La Figure. 3.5 montre les caractéristiques P-V et I-V du panneau sain et lors d'un défaut de courant de court-circuit, où l'on observe une diminution de la tension en circuit ouvert, tandis que le courant de court-circuit conserve la même valeur.



**Figure 3.4:** Caractéristiques P-V et I-V du panneau photovoltaïque en bon état et avec le défaut (C-C)

### 3.3.5 Défaut de mise à la terre

Un défaut de mise à la terre est une connexion inattendue entre un circuit électrique et la terre. Dans un système photovoltaïque, elle est généralement causée par une détérioration de l'isolation protectrice des conducteurs porteurs de courant. Il peut y avoir d'autres raisons à ce défaut, notamment la corrosion, des fils cassés ou de mauvais fils [105]. Pour protéger les systèmes photovoltaïques de plus de 50 V, le code national de l'électricité (NEC) exige l'installation de dispositifs de détection et d'interruption des défauts à la terre (GFDI) [106]. Même avec les dispositifs GFDI, le défaut de mise à la terre peut ne pas être détecté lorsque l'irradiation d'entrée est insuffisante ou que le courant de défaut de mise à la terre est inférieur au seuil de déclenchement des dispositifs GFDI. Dans [107], les auteurs ont proposé la méthode de réflectométrie temporelle à spectre étalé (SSTDR) pour détecter les défauts à la terre.

### 3.3.6 Défaut d'arc

Dans les systèmes électriques, le défaut d'arc est un problème majeur pour diverses installations. Généralement, il est généré par le déclenchement d'une charge de forte puissance sur une installation en service, ce dernière entraînant des accidents plus graves. Les causes possibles de ce défaut sont les mouvements de serrage, les vibrations et le vieillissement de l'isolation combinés à la pollution et à l'humidité.

Pour les systèmes photovoltaïques, il peut s'installer en série ou en parallèle. Les arcs en série sont généralement observés au niveau de la boîte de jonction, de la connexion des câbles entre les modules et même à l'intérieur d'un module [108]. Lorsque deux conducteurs parallèles de tensions différentes sont mis en contact, des arcs parallèles peuvent se produire [109].

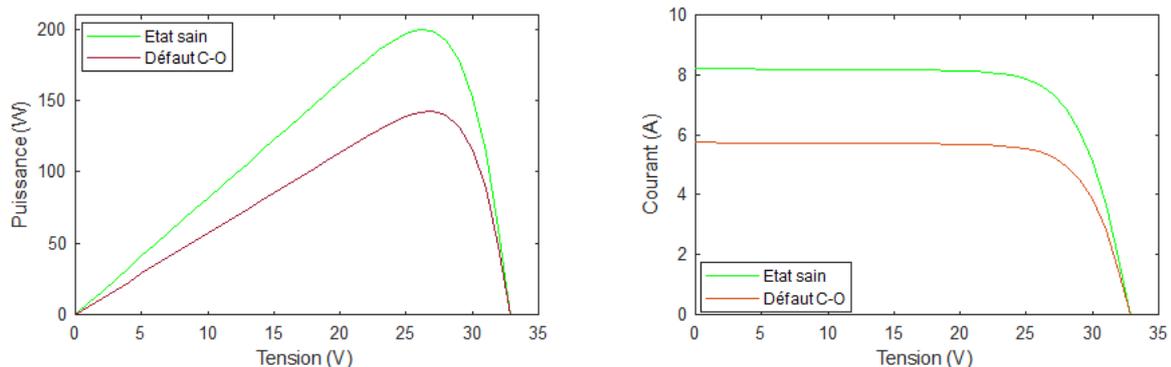
### 3.3.7 Défaut de ligne à ligne

Dans un réseau électrique, un défaut ligne à ligne se caractérise par un court-circuit involontaire entre deux sites de potentiel différents. Dans le cas d'un système photovoltaïque, ce défaut peut se manifester soit entre des modules appartenant à la même chaîne, soit par des chaînes adjacentes [110].

Les causes de ce type de défaut sont diverses : défaillance de l'isolation du câble, court-circuit accidentel entre les conducteurs porteurs de courant, mauvaise isolation entre les connecteurs de câble dans la boîte à câbles DC et dommages mécaniques [111].

### 3.3.8 Défaut de circuit ouvert

Un défaut de circuit ouvert (C-O) est une déconnexion accidentelle d'un conducteur porteur de courant. Où, la tension à la sortie de chaque cellule est la même, en supposant que toutes les cellules du panneau solaire ont les mêmes spécifications techniques et qu'elles sont toutes soumises aux mêmes conditions de rayonnement solaire et de température. Ainsi, les caractéristiques ont été comparées à un générateur sans aucune déconnexion dans des conditions normales [112], ce qui signifie qu'en cas de défaut en circuit ouvert, on observe une diminution du courant de court-circuit, ce qui a un effet direct sur la puissance maximale, tandis que la valeur de la tension ouverte reste presque la même [98].



**Figure 3.5:** Caractéristiques P-V et I-V du panneau photovoltaïque en bon état et avec le défaut

### 3.3.9 Défaut de la diode de by-pass

Les diodes de dérivation et de blocage (BBD) sont essentielles pour tenir compte des pertes de puissance, réduire l'effet de l'ombrage sur un module et maintenir les performances des systèmes photovoltaïques [111]. Les diodes de dérivation (BpD) sont principalement utilisées pour protéger les panneaux photovoltaïques de la tension inverse, tandis

que les diodes de blocage (BkD) sont utilisées pour protéger les panneaux du courant inverse, qui peut causer des problèmes tels que le défaut de point chaud ou d'autres défauts qui provoquent l'inversion de la polarisation du module [113].

Les diodes de by-pass sont connectées à l'extérieur et en antiparallèle avec chaque cellule photovoltaïque pour fournir un chemin électrique alternatif au courant généré. En effet, celui-ci ne peut pas traverser la cellule lorsqu'elle est ombragée. Cela préserve les performances de la chaîne en limitant la tension de polarisation inverse générée à travers toute cellule partiellement ombragée et réduit donc la puissance électrique qui peut être dissipée par la cellule [27].

### 3.3.10 Défauts dans la boîte de jonction

La boîte de jonction PV est un composant déjà monté sur le module pour faciliter la connexion des modules. Lors de l'expédition ou de l'installation, par exemple, ce composant peut être soumis à des chocs physiques.

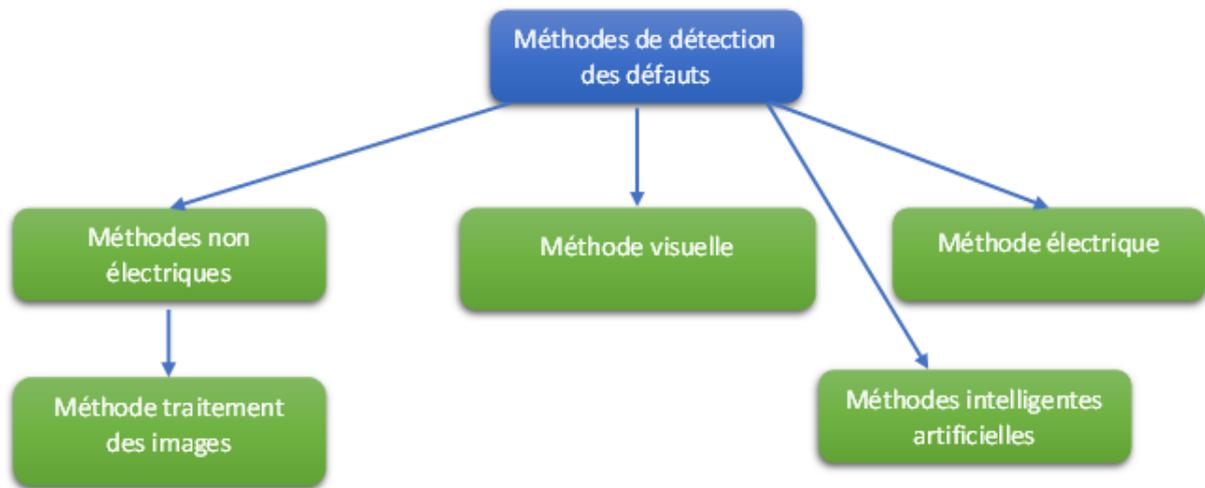
D'autres variables, telles que la corrosion et les connexions défectueuses, peuvent également contribuer au problème de la boîte de jonction. Tout cela peut réduire le rendement. En l'absence de lumière solaire, la boîte de jonction utilise des diodes de dérivation pour maintenir le courant dans la bonne direction et l'empêcher de retourner vers les panneaux [114].

### 3.3.11 Défaut de MPPT

La nécessité des techniques MPPT est mentionnée à la section 2.6. Son absence ou sa défaillance entraîne une baisse de la tension de sortie, ce qui a un impact direct sur la puissance de sortie, c'est-à-dire sur l'efficacité des panneaux solaires.

## 3.4 Méthodes de détection des défauts

Les méthodes de détection des défauts du système PV permettent de déterminer et d'identifier les différents types de défauts et leur emplacement dans le système PV. Par conséquent, l'application correcte de ces méthodes se traduit inévitablement par une prolongation de la durée de vie du système, un renforcement de sa fiabilité et la garantie d'un fonctionnement sûr. Pour éviter d'autres conséquences et défaillances, les procédures doivent également être rapides pour détecter l'évolution des problèmes. Ce qui entraîne des coûts de maintenance réduits, une production d'énergie élevée tout en respectant les lignes de sécurité.



**Figure 3.6:** Diagramme des différentes méthodes de détection des défauts

### 3.4.1 Méthode visuelle

La méthode d'inspection visuelle pour la détection des défauts dans le domaine photovoltaïque est principalement basée des humains, généralement effectuée régulièrement, et dépend des capacités de chaque inspecteur. Les types de défauts qui peuvent être observés par cette méthode sont des défauts liés au comportement externe ou à des changements mécaniques apparaissant à la surface des panneaux. Parmi ces défauts, on peut citer le verre fissuré, la décoloration du verre, la délamination, les bulles et la mauvaise connexion des câbles sur la boîte de jonction ou la corrosion des interconnexions [115]. Malgré les efforts déployés pour découvrir les défauts, ils restent limités et n'atteignent pas les objectifs souhaités. Pour cela, plusieurs recherches abordent des techniques avancées pour identifier et localiser les différents types de défauts.

### 3.4.2 Méthodes non électriques

Pour évaluer les paramètres découverts par des mesures électriques, il est nécessaire de détacher les cellules et en particulier les modules du reste de l'appareil et de les mesurer indépendamment, généralement dans un laboratoire. Dans le cas d'installations moins accessibles, cette méthode peut prendre beaucoup de temps et s'avérer coûteuse lorsqu'elle est utilisée avec des modules photovoltaïques. Toute approche permettant de détecter les défauts sans démontage devrait être utilisée [111].

### 3.4.2.1 Méthode thermique

La détection des défauts par imagerie thermique ou infrarouge (IR) est l'une des méthodes les plus avancées dans le domaine de la photovoltaïque, qui utilise des caméras infrarouges pour surveiller le fonctionnement du panneau solaire.

Différentes méthodes, telles que des dispositifs fixes ou mobiles, sont utilisées pour collecter des données sur le système photovoltaïque. On utilise des outils mobiles tels que des caméras montées sur des drones ou des outils fixes tels que des caméras montées sur des supports placés à différents endroits sur le terrain. Les critères les plus importants permettant de différencier ces outils sont la précision et le temps de réponse [116].

Ce type de diagnostic est conçu pour les champs de terre, afin de découvrir les défauts qui produisent des températures comme les points chauds dus à des courts-circuits internes, les défaillances du câblage des interconnexions ou des modules, la modification de la valeur de la résistance en série, les diodes de dérivation défectueuses, la non-concordance des cellules et les fissures cellulaires.

### 3.4.2.2 Inspection par ultrasons

L'application de cette technique est basée sur la propagation d'ondes ultrasonores à la surface du panneau, ce qui permet de séparer la détection des défauts en deux étapes, avant ou après l'installation des panneaux photovoltaïques [117].

Cette approche est principalement utilisée pour trouver et localiser les fractures, les vides et les structures stratifiées détachées lors de la production de panneaux. Elle peut également être utilisée pour trouver des défauts en service, tels que des cellules non sécurisées et des fissures de détérioration des modules.

La méthode de transmission et la méthode d'écho-pulsation sont les deux types de techniques de contrôle par ultrasons. Dans la première méthode de transmission, les informations sur la position x-y des défauts sont enregistrées par une mesure de l'atténuation du signal ultrasonique traversant un échantillon de test. Cette technique permet de détecter les défauts et de mesurer leur taille.

Dans la seconde méthode, plus courante, les impulsions ultrasoniques réfléchies par les défauts sont mesurées, ce qui donne des informations sur la taille des défauts ainsi que sur leur position x-y et leur valeur dans l'axe z. Cette procédure permet d'identifier les raisons de la détérioration des modules et fournit des informations techniques aux fabricants afin qu'ils puissent augmenter la fiabilité de leurs produits.

### 3.4.2.3 Imagerie par électroluminescence

La méthode d'imagerie par électroluminescence (ELI) est utilisée pour détecter les défauts dans une cellule photovoltaïque par la méthodologie du type de contact, après la fabrication de la cellule.

Cette méthode permet de détecter certains défauts, tels que les microfissures et l'identification des cellules solaires dont le rendement de conversion varie en raison d'une augmentation de la résistance en série de la cellule et/ou d'une diminution de la résistance en parallèle de la cellule. [118]

Elle fonctionne sur le principe de la détection du rayonnement électroluminescent émis par les porteurs de charge recombinés lors du processus de recombinaison radiative.

### 3.4.2.4 Tests de thermographie

La méthode d'essai par thermographie permet d'examiner les pertes d'énergie causées par les zones chaudes. Cette méthode est différente de l'approche infrarouge. Elle est basée sur l'utilisation d'une alimentation et d'un dispositif d'excitation avec des capacités de verrouillage pour délivrer un courant pulsé au module PV avec une modulation différente. Les cellules dont les shunts sont endommagés voient leur température augmenter sous l'effet du courant injecté [119]. L'un des principaux avantages de cette technique est qu'elle permet de prédire correctement la zone endommagée sans contact direct avec le module [120].

## 3.4.3 Méthode électrique

La détection des défauts basée sur les paramètres électriques (courant, tension et puissance) est connue sous le nom de méthode électrique. Elle est généralement utilisée pour spécifier le type de défaut, car les méthodes non électriques peuvent détecter l'existence d'un défaut, mais il est difficile d'identifier le type. Plusieurs types basés sur cette méthode sont décrits dans la littérature.

### 3.4.3.1 Méthode d'analyse des caractéristiques I-V

La méthode de mesure électrique I-V est utilisée pour identifier les différents défauts liés aux caractéristiques électriques, en utilisant les données de sortie du module photovoltaïque. Les signaux nécessaires sont fournis par le module et peuvent être mesurés à partir de la boîte de jonction, qui recueille les données reçues par un seul module ou groupe de modules, ces dernières étant représentées par la tension et le courant de sortie [121]. Ces

données sont évaluées par un système contenant un microcontrôleur qui surveille, supervise et contrôle les courbes I-V en effectuant une comparaison en temps réel entre les données mesurées et les données enregistrées au niveau de la base de données.

L'analyse I-V génère des caractéristiques supplémentaires, telles que la durée, l'amplitude,...etc., pour la puissance ou l'énergie produite. Les nombreux défauts considérés partagent les mêmes caractéristiques spécifiées [122].

### 3.4.3.2 Méthode d'analyse de perte de puissance

La méthode de détection des défauts de perte de puissance est très connue, principalement utilisée pour détecter plusieurs types de défauts (court-circuit, ombrage, etc.), et le principe de cette méthode se concentre sur la comparaison entre la puissance de référence et la puissance instantanément fournie par le module photovoltaïque. Les auteurs mettent en évidence les détails de cette méthode dans la référence [123].

### 3.4.3.3 Méthode d'analyse des données climatiques

La technique de détection des défauts basée sur l'analyse des données climatiques (température, éclairage, etc.) est réalisée sur les données disponibles du système. Par conséquent, un ensemble particulier d'instruments (capteurs) et d'architectures de surveillance (dispositifs d'acquisition de données et configurations) sont nécessaires pour permettre l'application d'un certain nombre d'algorithmes de détection et de classification des défauts afin de diagnostiquer avec précision les défauts basés sur l'analyse des paramètres électriques [124].

## 3.4.4 Méthodes basées sur des techniques d'intelligence artificielle

La performance, le rendement et l'efficacité des panneaux photovoltaïques varient en fonction d'un certain nombre de facteurs, notamment les conditions climatiques externes et les défauts liés aux modules. Les méthodes traditionnelles de détection des défauts se caractérisent par un coût élevé et une faible efficacité. Il est donc difficile d'identifier et de détecter les défauts. Pour cela, les techniques d'apprentissage automatique peuvent utiliser un ensemble spécifique de données pour apprendre automatiquement et détecter les défauts de manière simple [125].

La détection et la classification des défauts à l'aide de différentes techniques d'apprentissage automatique ont fait l'objet de nombreuses recherches. Les plus importantes de ces techniques sont la logique floue, les réseaux neuronaux, etc.

#### 3.4.4.1 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) comptent parmi les techniques d'intelligence artificielle les plus populaires et ont été utilisés principalement pour résoudre un large éventail de problèmes. Les algorithmes génétiques sont considérés comme des optimiseurs de fonctions, basés sur le principe de l'évolution par l'application de modèles informatiques. Cette évolution aboutit à une méthode hautement optimisée, basée sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique.

L'algorithme génétique est utilisé pour détecter les lacunes d'autres algorithmes afin d'améliorer leur efficacité - par exemple, les auteurs [126] proposent une étude pour améliorer l'RNA avec AG. Les étapes nécessaires à l'application de cette méthode sont les suivantes : Initialisation, évaluation, sélection, croisement et mutation [127].

### 3.5 Conclusion

Dans cette partie de la thèse, un certain nombre de points ont été identifiés. Tout d'abord, un rappel a été fait sur la terminologie du diagnostic de défauts. Ensuite, on présente les fameux défauts relatifs aux systèmes photovoltaïques et enfin les techniques de détection de ces défauts.

Dans le chapitre suivant, l'approche de diagnostic intelligent est présentée pour détecter les défauts qui peuvent apparaître dans le système solaire.

## Chapitre 4

# Détection des défauts dans les systèmes photovoltaïques

## 4.1 Introduction

Dans les deux premiers chapitres, les différentes parties du système photovoltaïque et leurs principes de fonctionnement ont été présentés, ainsi que les différents convertisseurs statiques généralement utilisés dans le système photovoltaïque. Plusieurs types de contrôles MPPT ont également été présentés. Une technique a été proposée pour obtenir un système plus efficace en appliquant une technique hybride entre le contrôle par mode glissant et la technique de la logique floue. Dans le chapitre précédent, les différents défauts associés au module photovoltaïque et les différentes techniques utilisées pour la détection des défauts ont été abordés. Enfin, dans ce chapitre, on propose deux techniques de diagnostic des défauts du module photovoltaïque, toutes deux basées sur des techniques d'intelligence artificielle.

La première technique utilise la technique des réseaux neuronaux artificiels (RNA ou ANN) pour détecter le pourcentage d'ombrage partiel du panneau photovoltaïque. La seconde technique est basée sur la technique des réseaux neuronaux flous (fuzzy-neural) et est utilisée pour détecter de nombreux défauts. Les résultats de la simulation sont obtenus avec le logiciel Matlab-Simulink.

## 4.2 Détection des défauts d'ombrage partiel à l'aide d'une technique de réseau neuronal artificiel

### 4.2.1 Réseau de neurones artificiels

Les nouvelles technologies s'appuient fortement sur les réseaux de neurones artificiels. Le domaine de l'intelligence artificielle se développe rapidement et de nombreuses recherches sont menées sur les réseaux neuronaux artificiels. Depuis les années 1980, les réseaux neuronaux artificiels sont devenus un sujet populaire dans le domaine de l'intelligence artificielle. Il développe un modèle simple, composant différents réseaux basés sur des connexions [128]. Il se compose de trois couches principales : La couche d'entrée, la couche cachée et la couche de sortie, comme le montre la Figure. 4.1.

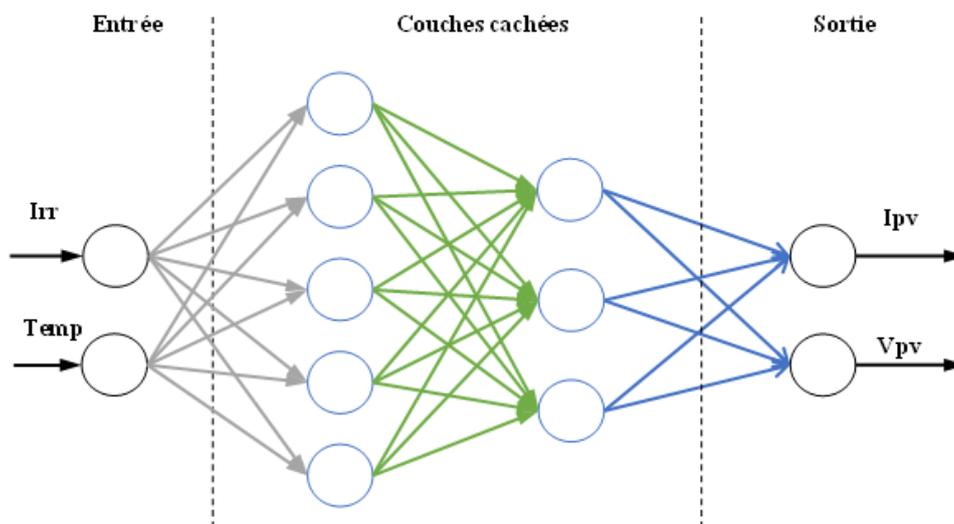
Parmi les problèmes du réseau neuronal artificiel, on cite le choix du nombre de couches cachées avec le nombre de neurones formant ces couches. Il n'existe pas de règles exactes pour déterminer le nombre de couches cachées dans un réseau donné, ni le nombre de neurones dans chaque couche. Il appartient à l'utilisateur de les fixer généralement après plusieurs tests [129]. En effet, il s'agit de ne pas exagérer dans l'augmentation de leur nombre pour ne pas rendre leur apprentissage et leur mise en œuvre plus complexes et leur coût plus élevé. Les RNA ont été utilisés avec succès pour résoudre des problèmes

complexes dans divers domaines d'application tels que la reconnaissance des formes, l'identification, la classification, la parole, la vision et les systèmes de contrôle [129]. Parmi les méthodes RNA, nous citons les méthodes les plus courantes : Feed-forward Back Propagation (FFBP) [130] et General Regression Neural Network GRNN [131]. Le RNA est un modèle basé sur des neurones interconnectés qui créent des résultats en traitant des informations basées sur les données d'entrée. La relation entre l'entrée et la sortie est basée sur le poids des neurones et les données d'entrée pour lesquelles les neurones doivent être formés au système [132].

## 4.2.2 Simulation du modèle de panneau par RNA

Un réseau neuronal de régression général (GRNN) est défini comme un réseau neuronal probabiliste qui est certainement utile pour la prédiction et la comparaison des performances [133]. Le GRNN est un nouveau type de réseau neuronal proposé par Specht en 1991 [132].

Le GRNN est constitué de différentes couches : deux entrées et deux sorties entre lesquelles se trouvent une ou plusieurs couches cachées dont les sorties ne sont pas observables. Ces couches sont basées sur une unité de traitement (neurones) interconnectée par des liens pondérés de type feed-forward [133, 134]. Ils appliquent ensuite le résultat à une fonction non linéaire appelée fonction d'activation, qui est généralement basée sur la fonction sigmoïde.



**Figure 4.1:** Structure du modèle PV basé sur RNA

La modélisation et la simulation du panneau photovoltaïque par le RNA se compose des entrées qui sont le rayonnement solaire ( $I_{rr}$ ) et la température ( $T$ ). La sortie est

représentée par le courant ( $I_{pv}$ ) et la tension générée ( $V_{pv}$ ). Les entrées et les sorties de ce modèle sont fixées au départ, mais le nombre de couches cachées et les neurones au sein de ces couches sont optimisés au cours du processus d'apprentissage sur la base d'une bonne performance MSE (erreur quadratique moyenne (Mean squared error)). Une base de données a été créée dans la section de prétraitement et de validation des données afin d'assurer l'apprentissage correct de notre modèle RNA.

Les résultats de la simulation du modèle développé sont donnés par la Figure. 4.2. Cette figure montre la valeur de la puissance de sortie pour une température constante et plusieurs valeurs d'éclairement égales comme suit ( $25^{\circ}\text{C}$ , 400, 600, 800 et  $1000\text{ W/m}^2$ ). On constate que la puissance estimée par le modèle RNA développé suit parfaitement sa référence déterminée par la puissance de sortie du PV.

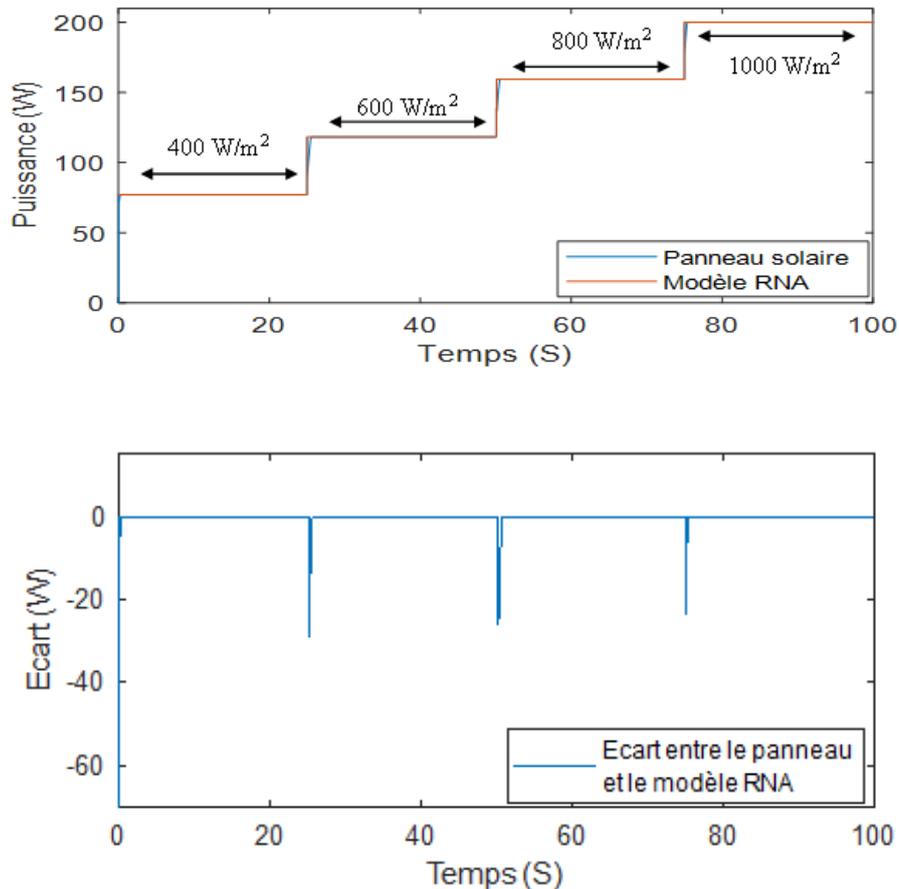


Figure 4.2: Comparaison entre le panneau photovoltaïque et le modèle RNA

### 4.2.3 Description du système de diagnostic

La Figure. 4.3 montre le diagramme général de la méthode de contrôle et de détection des défauts du système photovoltaïque. Le système étudié consiste en une charge résistive ;

le convertisseur DC-DC de type parallèle et le contrôle MPPT (déjà étudiés dans le chapitre 02). La détection et le calcul du pourcentage d'ombrage partiel sont effectués par la méthode résiduelle en comparant les grandeurs des quantités suivantes : courant, tension et puissance des panneaux solaires du système réel avec les quantités du modèle intelligent basé sur le modèle RNA.

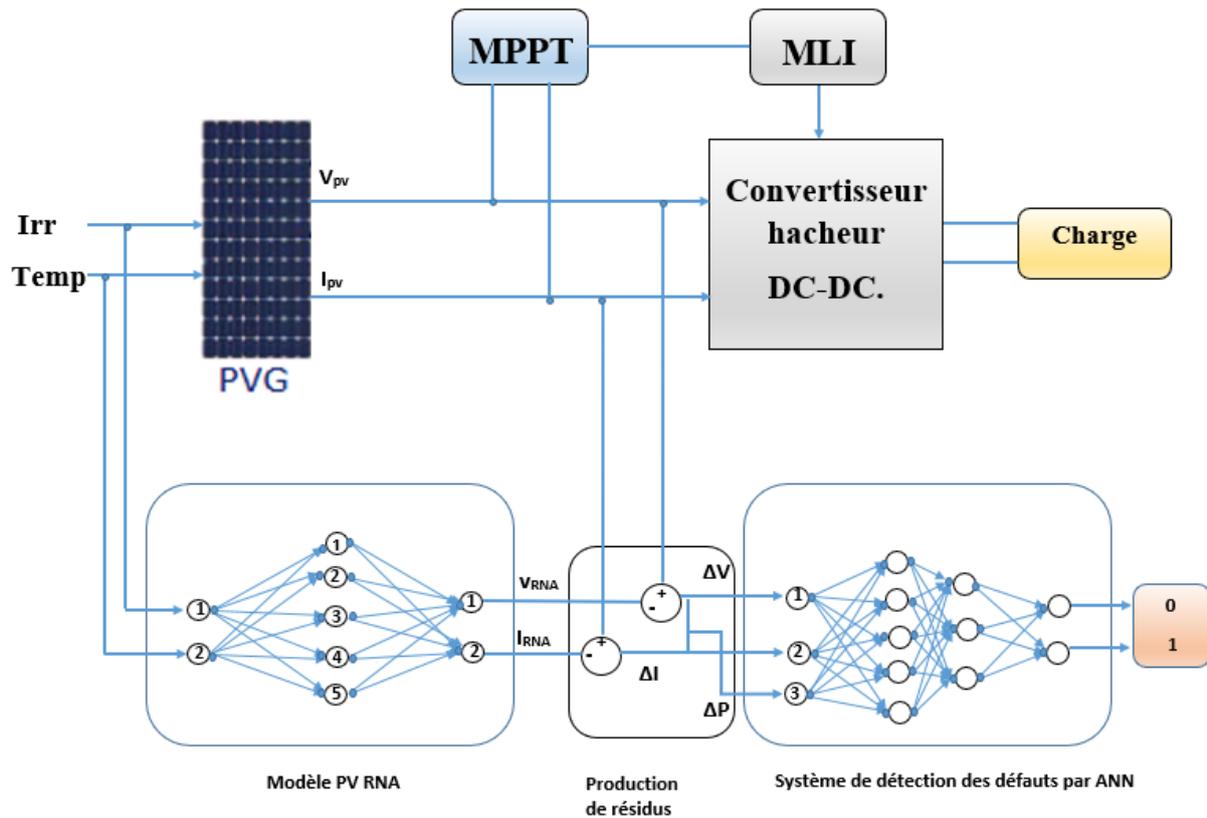


Figure 4.3: Structure générale du système de diagnostic proposé

Avec :

PVG : générateur photovoltaïque ;

MLI : modulation de largeur d'impulsion ;

Irr : irradiation solaire ;

Temp : température ambiante ;

$\Delta V$  : différence de tension mesurée entre le système réel et le modèle RNA proposé ;

$\Delta I$  : différence du courant mesuré entre le système réel et le modèle RNA proposé.

### 4.3 Méthode proposée

Une méthode basée sur la technique du RNA a été appliquée pour simuler le modèle de panneau solaire dans MATLAB/Simulink afin d'obtenir les mêmes résultats du panneau solaire sous différents changements de température et d'intensité du rayonnement solaire. Les différentes étapes mises en œuvre pour la procédure proposée sont illustrées à la Figure. 4.5. En ce qui concerne la phase d'apprentissage, il existe deux variables importantes, à savoir la température et l'intensité du rayonnement solaire, appliquées dans plusieurs situations différentes, où ces deux variables sont nécessaires pour piloter l'apprentissage du modèle RNA. Une fois formé et affiné, un RNA peut être utilisé comme un panneau photovoltaïque sans défaut. Après cette étape, une évaluation de la précision des résultats doit être effectuée. Pour évaluer la précision de la méthode proposée, on a comparé le résultat du panneau réel avec le résultat du modèle RNA dont les résultats obtenus sont présentés dans la Figure. 4.2. La technique proposée a pour but d'identifier un changement de tension, de courant et de puissance entre les modules photovoltaïques et le modèle RNA, et tente donc de vérifier la différence de tension, de courant et de puissance entre le modèle RNA sain et les modules photovoltaïques défectueux afin de détecter et de calculer le pourcentage de défaut.

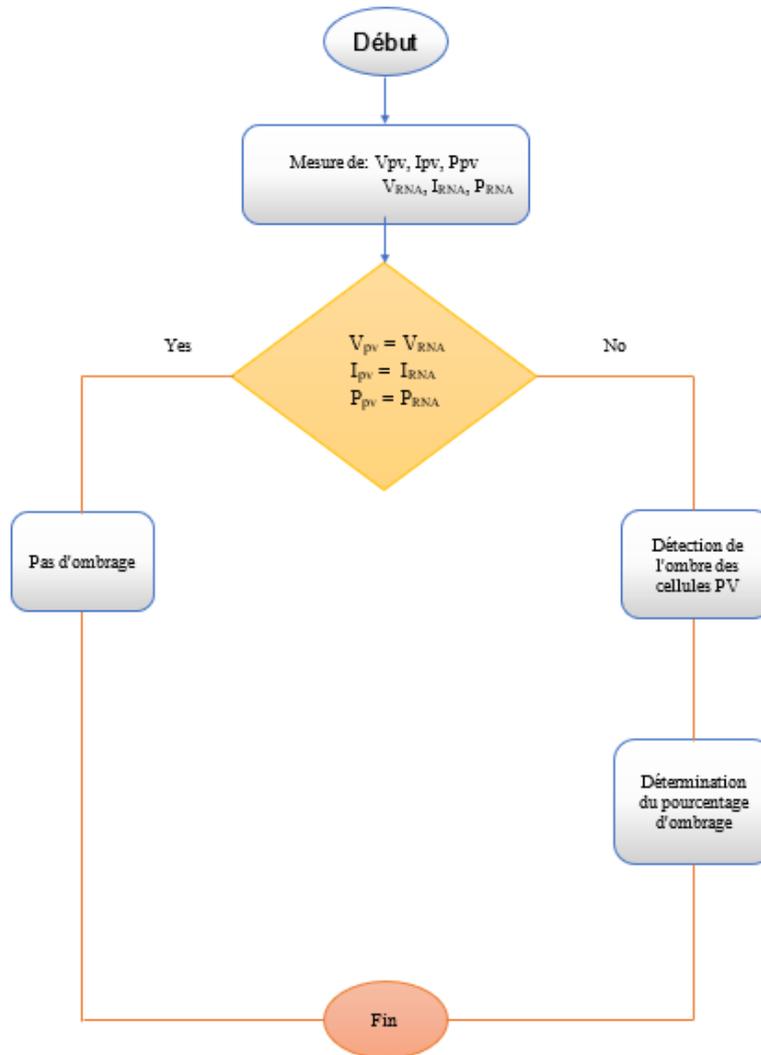


Figure 4.4: Organigramme général du système de diagnostic proposé

### 4.3.1 Création de résidus

La première étape d'une procédure de FDI (Fault Detection and Isolation) est la création des résidus [135]. En effet, c'est un indicateur de la défaillance du système. Dans le cas des observateurs, les résidus représentent l'écart entre la sortie réelle et la sortie estimée. En d'autres termes, c'est l'erreur d'estimation [135]. Pour générer les résidus, le module PV développé par RNA a été comparé au module défectueux (PV), puis les valeurs d'erreur maximales et la moyenne de ces valeurs ont été calculées pour les grandeurs suivantes du courant, de la tension et de la puissance. Pour cette application, quatre niveaux d'ombrage partiel ont été choisis. Les indicateurs de défaut utilisés sont : la tension, le courant et la puissance du système PV. Ces quantités peuvent être déterminées comme suit :

$$\Delta I = I_{mpp} - I_{RNA} \quad (4.1)$$

$$\Delta V = V_{mpp} - V_{RNA} \quad (4.2)$$

$$\Delta P = P_{mpp} - P_{RNA} \quad (4.3)$$

Où :

$V_{mpp}$  : La tension de sortie au MPP du générateur PV ;

$I_{mpp}$  : Le courant de sortie au MPP du générateur PV ;

$V_{RNA}$  : La tension du modèle observateur RNA ;

$I_{RNA}$  : Le courant du modèle observateur RNA.

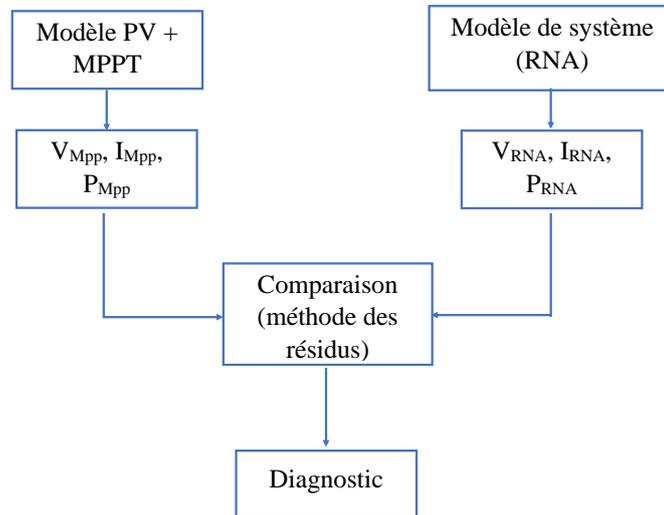


Figure 4.5: Schéma de la procédure de diagnostic

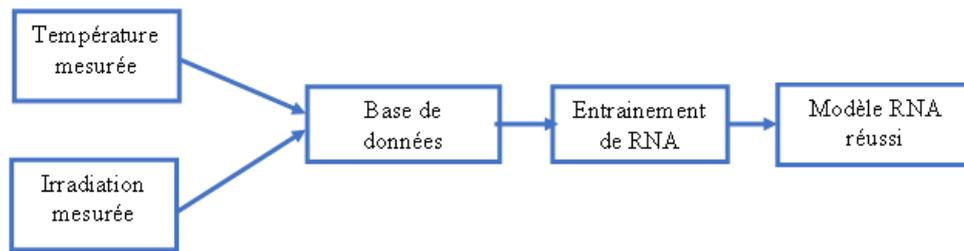
### 4.3.2 Prétraitement et validation des données

En ce qui concerne l'entraînement des réseaux neuronaux et l'analyse des erreurs de prédiction, les données des valeurs d'entrée doivent toujours être validées pour obtenir de bons résultats. En effet, l'utilisation de données non fiables indique généralement une augmentation de l'erreur de prédiction [136].

Lors de l'entraînement du réseau neuronal et de l'analyse de l'erreur de prédiction, les valeurs d'entrée doivent être cohérentes avec celles émises par le panneau solaire, sinon le système indiquera une erreur de prédiction importante.

Pour ce faire, la valeur du rayonnement solaire est réglée et modifiée à chaque fois (le degré de rayonnement change de 1000 à 10  $W/m^2$ ) et la température est modifiée

entre différentes valeurs de 50 °C à 0 °C. Ce processus est répété plusieurs fois pour obtenir une base de données qui nous permet de créer un modèle de panneau solaire. Ce dernier se compose de deux entrées et de deux sorties. Les deux entrées sont l'irradiation solaire et la température. Les deux sorties sont le courant et la tension du panneau solaire neuronal développé. La fiabilité des données mesurées reste à vérifier [137]. Les données mesurées ne sont pas toutes fiables si elles présentent des états extrêmes, qu'il s'agisse de la température ou de l'irradiation solaire, ou si elles sont incorrectes [136]. Les données non fiables ne doivent pas être prises en compte par le réseau neuronal, ni pour l'apprentissage ni pour la prévision de la puissance générée par le panneau photovoltaïque.



**Figure 4.6:** Organigramme du modèle photovoltaïque par RNA

Dans cette partie du diagnostic, l'objectif est de comparer en temps réel la puissance mesurée et celle obtenue par le modèle RNA. La plupart des dégradations des modules PV influencent directement la puissance produite par les panneaux. Notre stratégie de diagnostic consiste à contrôler la puissance produite. À cet égard, on mesure la tension et le courant en temps réel et on calcule la puissance produite par le système PV. Ces données capturées sont comparées aux résultats de la simulation. La détection des défauts sera déterminée en fixant un seuil normal et un seuil de défaillance. Dans cette section, chaque valeur résiduelle est générée à l'aide de la méthode de diagnostic basée sur un modèle.

### 4.3.3 Architecture du système de diagnostic de défaut proposé

Parmi les différentes formes de RNA, les réseaux neuronaux de rétro-propagation et de régression générale sont proposés dans cette recherche. Afin de vérifier les performances de la méthode proposée pour la détection des défauts d'ombrage partiel du réseau photovoltaïque, un système photovoltaïque comprenant une unité de détection des défauts est modélisé sur MATLAB/Simulink. Comme le montre la Figure. 4.7, l'architecture de réseau utilisée est constituée de :

- 3 neurones dans la couche d'entrée ;
- 5 et 3 neurones dans la première et la deuxième couche cachée respectivement ;

- 2 neurones dans la couche de sortie.

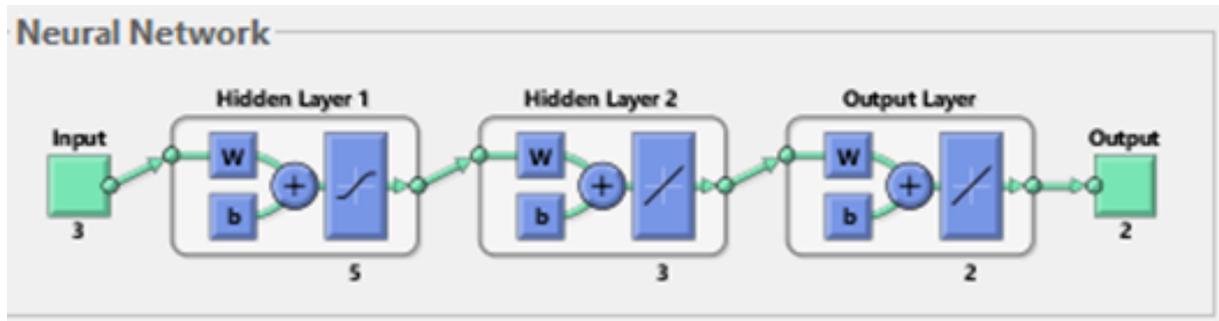


Figure 4.7: Diagramme du réseau neuronal pour le diagnostic des défauts d'ombrage

Les paramètres d'entrée sont les résidus (tension, courant et puissance) extraits par le générateur photovoltaïque et le module RNA (observateur), le système de diagnostic convertissant ces valeurs en systèmes binaires (0 ou 1), comme le montre la Figure. 4.8.

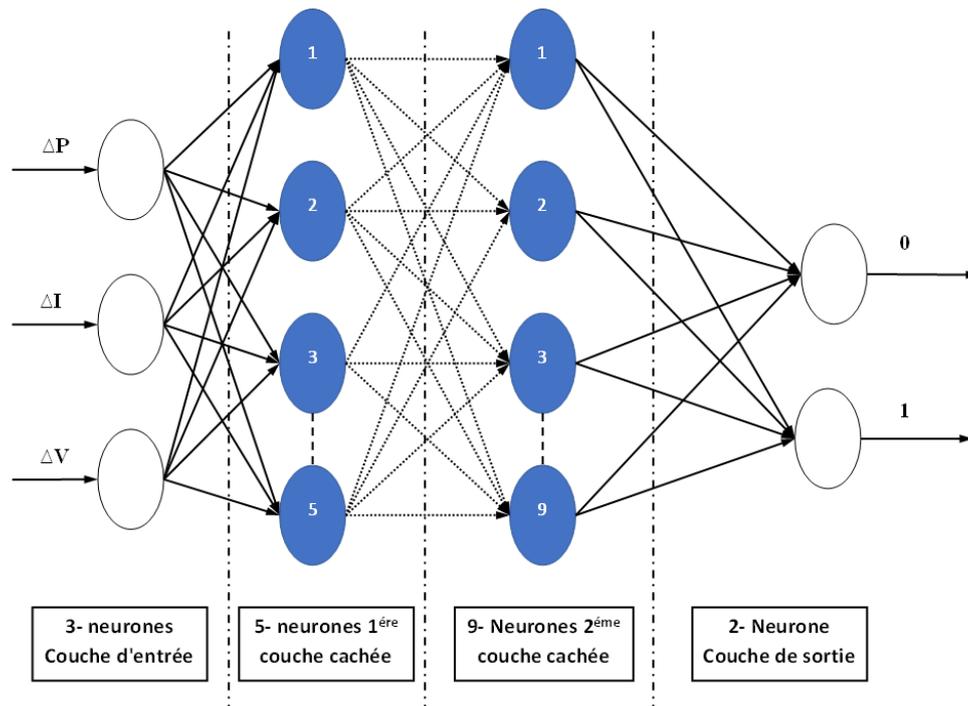
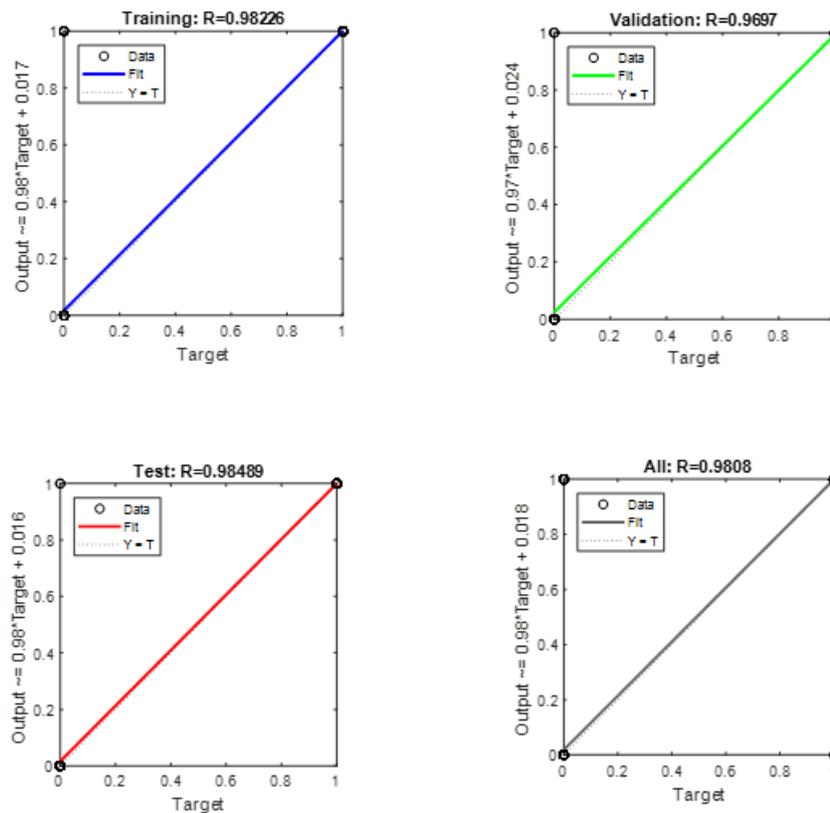


Figure 4.8: Architecture proposée pour le système de diagnostic des défauts

Pour obtenir un réseau neuronal artificiel efficace et performant, et pour compléter le processus d'apprentissage, un ensemble de données cibles d'entrée et de sortie est nécessaire. Les données de l'entraînement pour ce travail ont été divisées en trois parties, dont 65 % sont utilisées pour la formation (training), 20 % pour la validation et 15 % pour les tests. Pour minimiser les erreurs de performance du réseau, les poids et les biais du réseau sont modifiés de manière itérative au cours du processus d'apprentissage basé sur l'erreur

quadratique moyenne (EQM) ou MSE(en anglais). Le paramètre R est la corrélation entre la sortie de l'objectif et la sortie prédite par le réseau. La valeur idéale de R est égale à un. Il est évident que les points sont presque situés sur l'axe de la meilleure régression, ce qui signifie que les deux réseaux prédisent très bien la relation cyclique pour l'ensemble des données d'apprentissage.



**Figure 4.9:** Présentation du paramètre de corrélation R

L'apprentissage est achevé après 1000 itérations avec une erreur quadratique moyenne égale à 0.0041012. On trouve une valeur d'erreur très proche de zéro, ce qui explique que l'apprentissage est réussi.

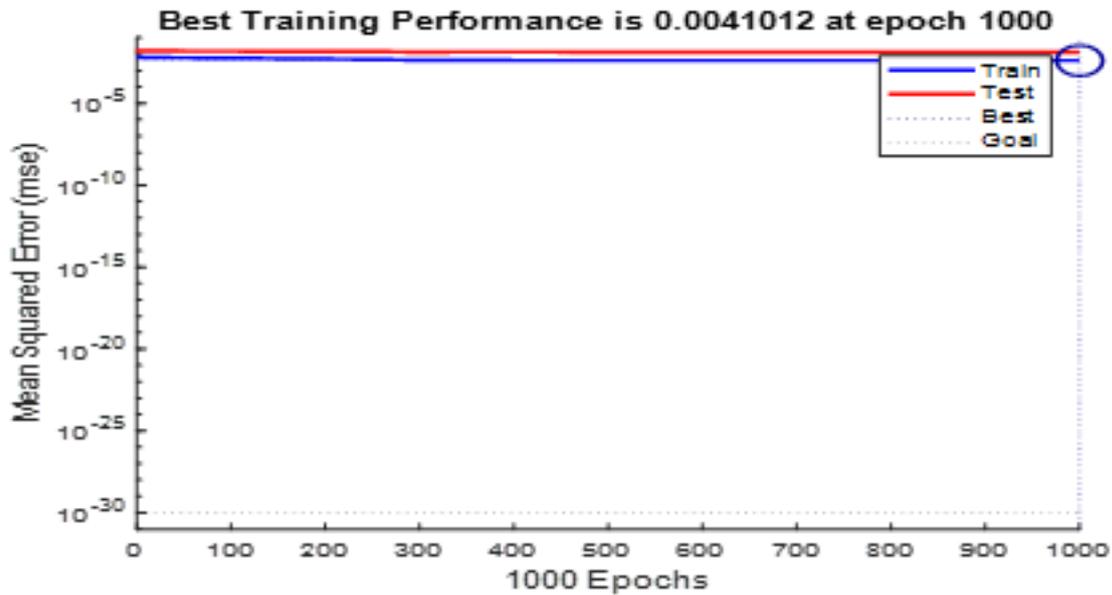


Figure 4.10: Performance du système de détection neuronal proposé

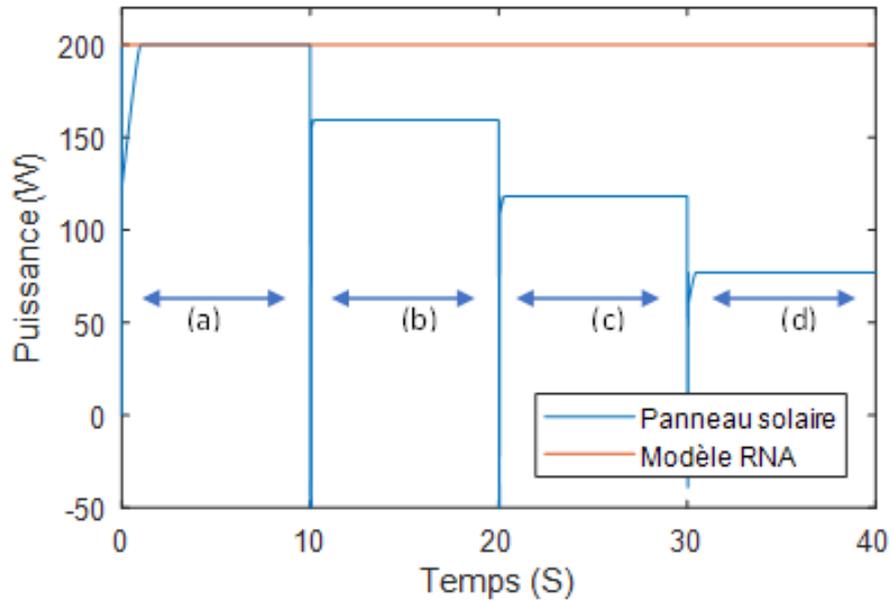
#### 4.3.4 Phase de détection

En fonctionnement normal, les mesures des variables  $I_{MPP}$  et  $V_{MPP}$  sont cohérentes avec les mesures liées à la simulation  $I_{RNA}$  et  $V_{RNA}$  (extraites par le modèle de réseau neuronal), la sortie résiduelle étant dans ce cas égale à zéro. En revanche, en cas de modification de l'intensité de l'irradiation (défauts d'ombrage), on observe que la résultante du résidu est différente de zéro. On en conclut que la détection dépend de la sortie résiduelle. Une fois ces conditions remplies, le système commence à détecter les défauts.

#### 4.3.5 Phase de classification

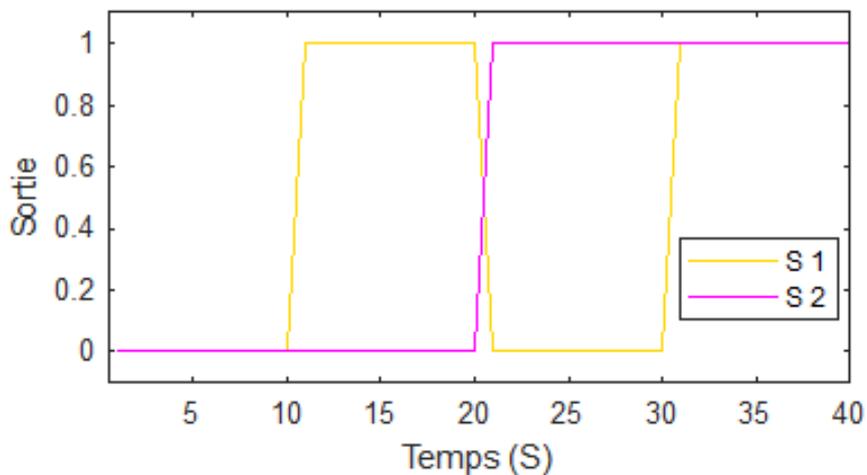
Dans des conditions climatiques variables, le générateur photovoltaïque subit généralement un ombrage dynamique. Le système prend les variables  $I_{MPP}$  et  $V_{MPP}$  comme points de référence. Le signal résiduel est généré en temps réel en comparant la puissance instantanée mesurée et les résultats de simulation du modèle RNA sur MATLAB. Pour la détection des défauts, une solution simple consiste à comparer le niveau résiduel à un seuil prédéfini au-delà duquel la présence d'un défaut est confirmée.

La Figure. 4.11 montre la puissance de sortie du panneau solaire avec différentes catégories d'ombrage et la puissance de sortie du module sain (modèle RNA). Le système de détection des défauts basé sur le résultat résiduel consiste à générer des signaux qui expriment chaque cas d'ombrage partiel, comme le montre la Figure. 4.11.



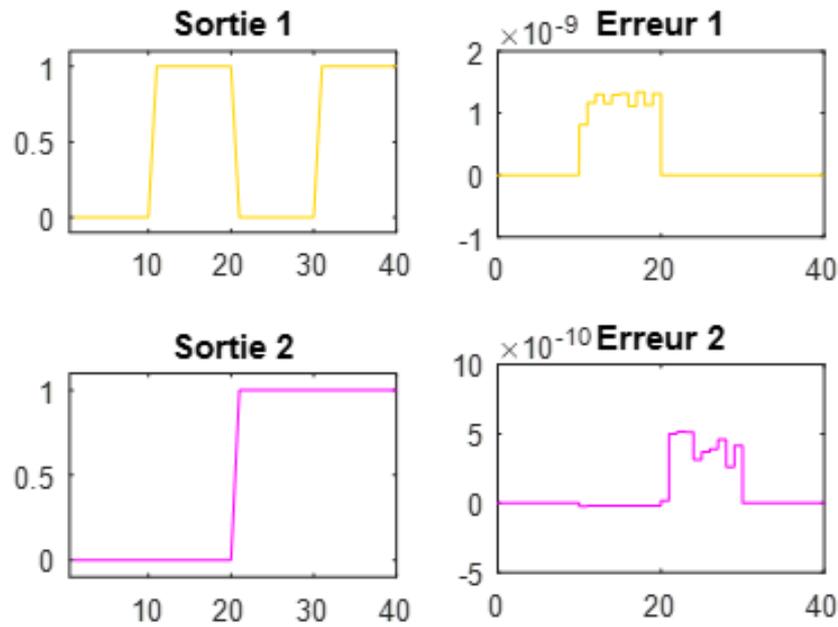
**Figure 4.11:** Résultats de la simulation pour quatre pourcentages d'ombrages partiels différents : (a) 0%, (b) 20%, (c) 40% et (d) 60% d'ombrage, avec Irr égal à 1000 W/m<sup>2</sup> et T= 25 °C

Comme l'illustre la Figure. 4.12, dans le premier cas, la sortie du système de détection indique une paire de valeurs [0 0] qui indique que le système est sain (pas de défaut (0 %)). Dans le deuxième cas, une paire de valeurs [1 0] indique que le pourcentage d'ombrage est de 20 % (présence du défaut). Le troisième cas indique [0 1], ce qui signifie que le pourcentage d'ombrage est de 40 % (présence du défaut). Enfin, le quatrième cas [1 1] exprime un pourcentage d'ombrage de 60 % (présence du défaut).



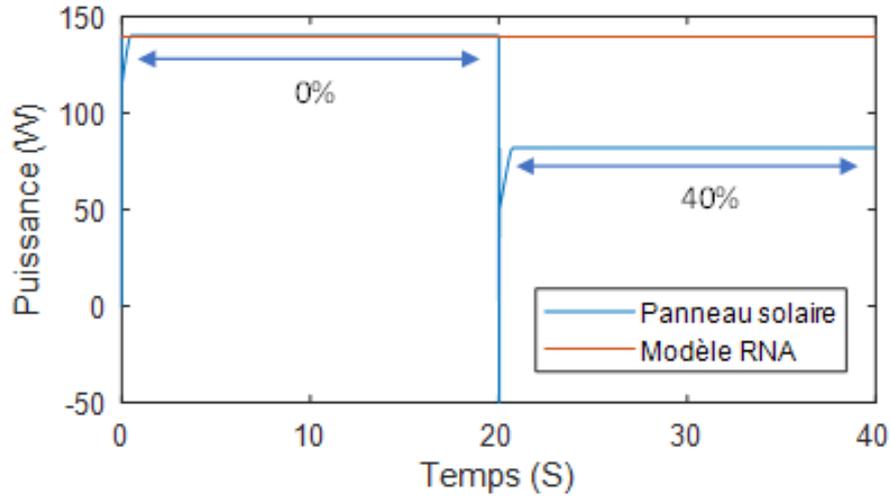
**Figure 4.12:** Divers signes pour un certain pourcentage des ombrages partiels : (a) 0% ombrage, (b) 20% ombrage, (c) 40% ombrage et (d) 60% ombrage

La Figure. 4.13 montre les signaux de sortie Out 1 (sortie) et Out 2 du système de détection proposé ainsi que les erreurs d'apprentissage Erreur 1 (E1) et Erreur 2 (E2) qui sont des valeurs très faibles de l'ordre de  $10^{-9}$ . Ces résultats confirment que le RNA a appris la présence de séquences de défauts et qu'il a pu générer correctement les sorties souhaitées.

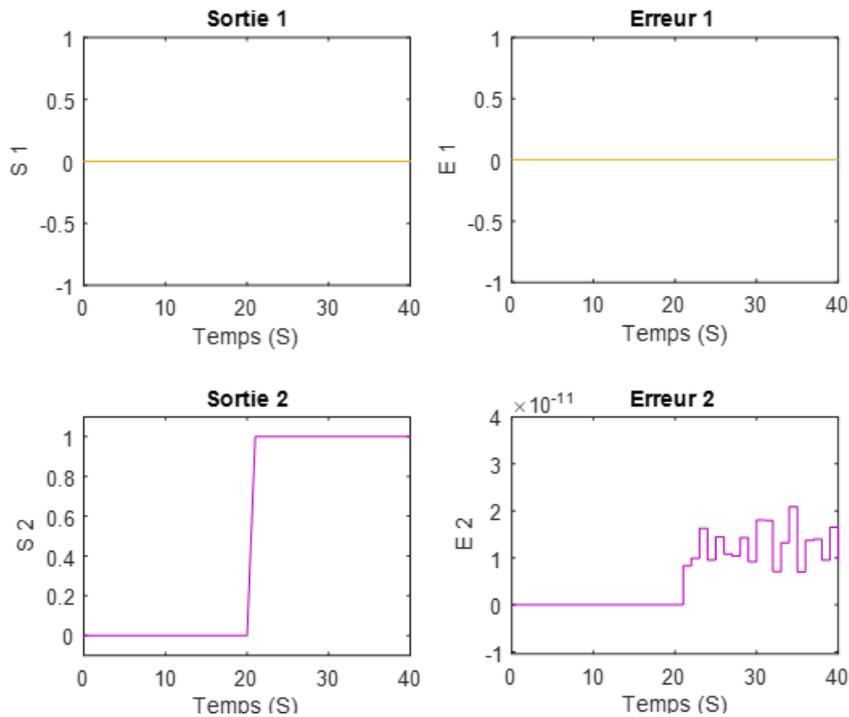


**Figure 4.13:** Valeurs de sortie 1 et de sortie 2 lors du premier test

Pour évaluer les performances du système de détection et s'assurer de sa fiabilité, plusieurs tests ont été effectués sur plusieurs échantillons de cas qui n'étaient pas présents lors de la formation. Ces tests (ces bases de données composées de séquences différentes de celle de l'entraînement) ont donné des résultats satisfaisants avec une grande précision. Les différents résultats des tests effectués sont indiqués sur les Figure. 4.14, Figure. 4.16 et Figure. 4.18, et les erreurs d'apprentissage sont illustrées successivement dans les Figure. 4.15, Figure. 4.17 et Figure. 4.19. La Figure. 4.14 représente deux catégories d'ombrage 0% et 40% avec les conditions climatiques suivantes : un éclairement de  $723 \text{ W/m}^2$  et une température de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le système de détection indique les paires de valeurs suivantes  $[0 \ 0]$  et  $[0 \ 1]$ , qui sont illustrées dans la Figure. 4.15.

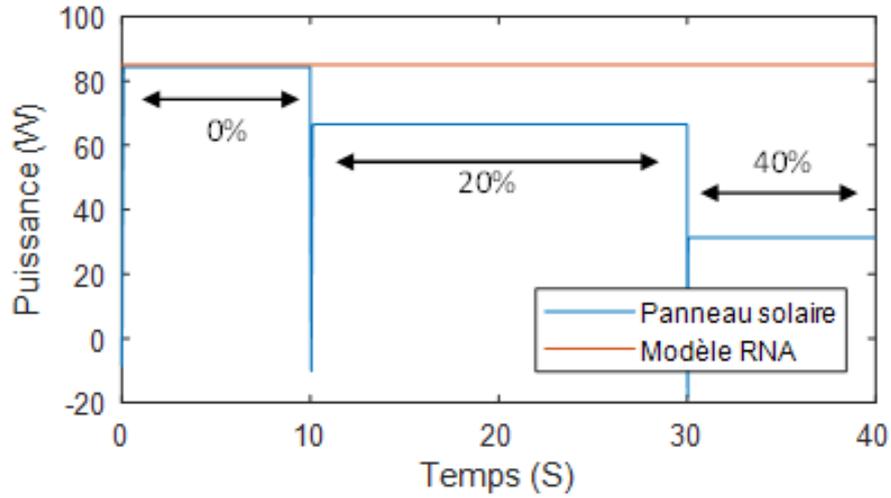


**Figure 4.14:** Simulation des cas de défauts pour 0% d'ombrage et 40% d'ombrage, avec : Irr de référence égal à  $723 \text{ W/m}^2$  et  $30 \text{ }^\circ\text{C}$

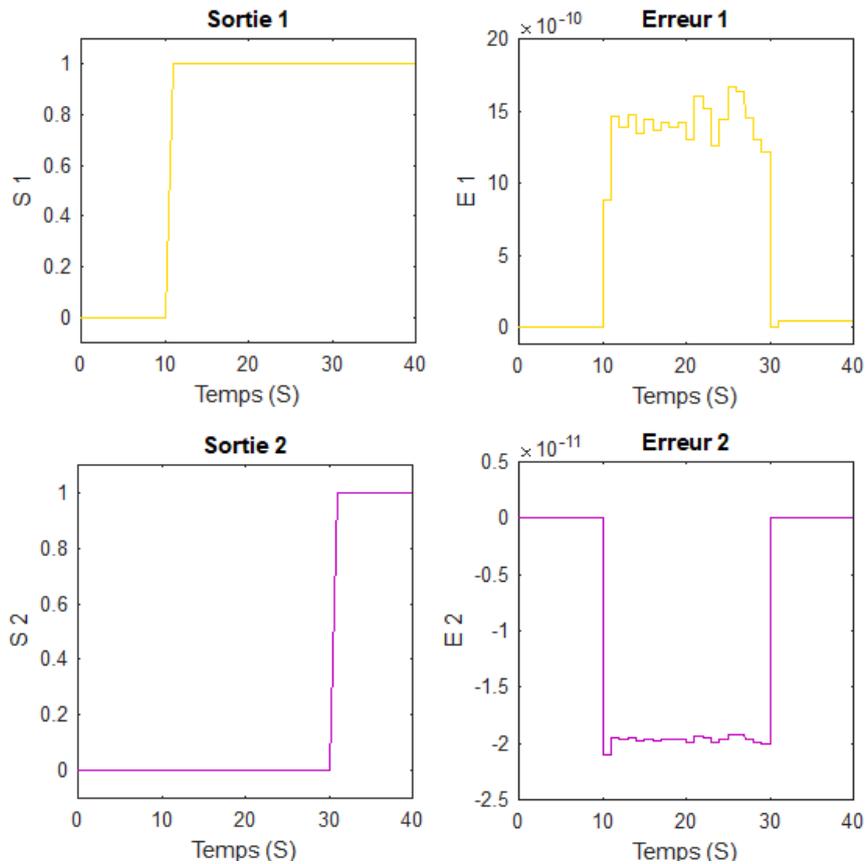


**Figure 4.15:** Erreurs pour les valeurs de la sortie 1 et de la sortie 2 dans le 2ème test

La Figure. 4.16 représente trois catégories d'ombrage 0%, 20% et 40% avec les conditions climatiques suivantes : un éclairement de  $457 \text{ W/m}^2$  et une température de  $35^\circ\text{C}$ . Le système de détection indique les valeurs suivantes :  $[0 \ 0]$ ,  $[1 \ 0]$  et  $[0 \ 1]$  comme le montre la Figure. 4.17.



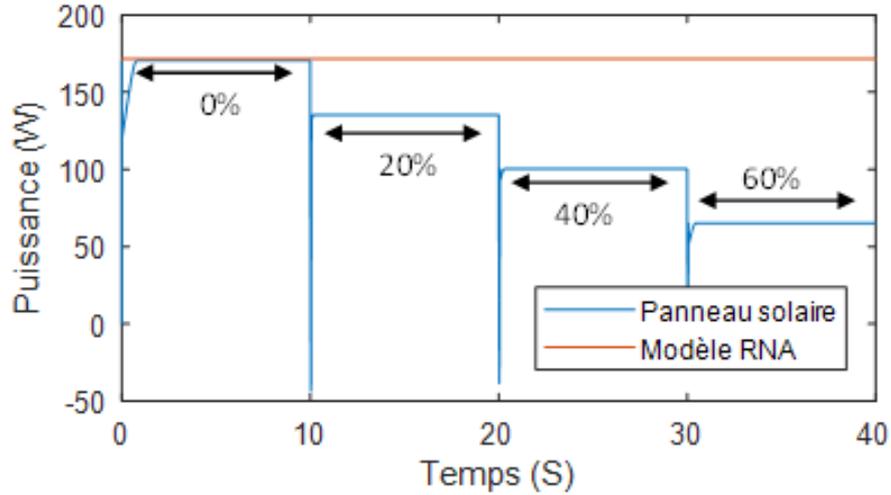
**Figure 4.16:** Simulation des cas de défauts pour (0, 20 et 40%) avec : Irr de référence égal à  $457 \text{ W/m}^2$  et  $35 \text{ }^\circ\text{C}$



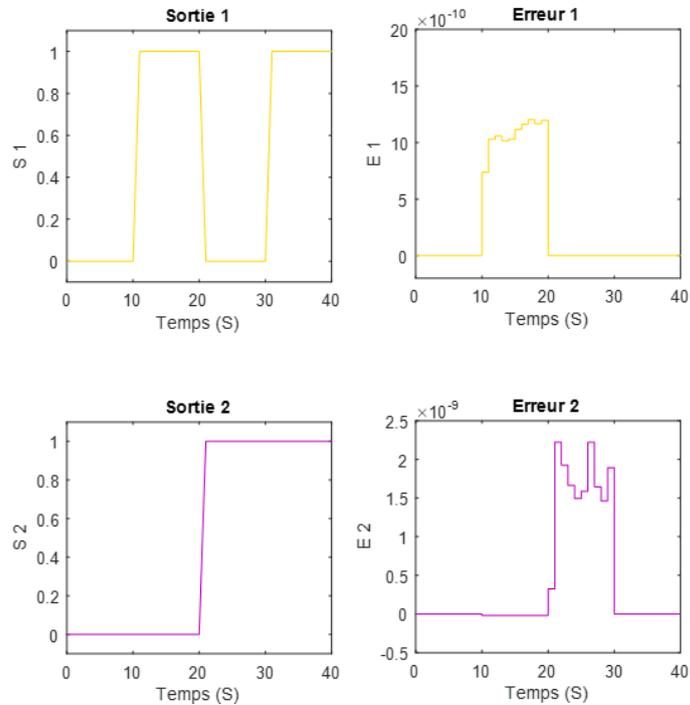
**Figure 4.17:** Erreurs pour les valeurs de la sortie 1 et de la sortie 2 dans le 3ème test

Finalement, la Figure. 4.18 représente quatre catégories d'ombrage 0%, 20%, 40%

et 60% avec les conditions climatiques suivantes : un éclairement de  $862 \text{ W/m}^2$  et une température de  $27^\circ\text{C}$ . Le système de détection indique les signaux de sortie [0 0], [1 0], [0 1] et [1 1] qui sont illustrés à la Figure. 4.19.



**Figure 4.18:** Simulation des défauts pour quatre cas différents d'ombrage partiel (0, 20, 40, 60%), avec : Irr de référence égal à  $862 \text{ W/m}^2$  et  $27^\circ\text{C}$



**Figure 4.19:** Erreurs pour les valeurs de la sortie 1 et de la sortie 2 dans le 4ème test

**Tableau 4.1:** Étude comparative avec les travaux de recherche existants dans la littérature

Références	Détection automatique	Méthodes artérielles utilisées	Détection des défauts en temps réel	Détection du existence de pourcentage d'ombrage	Estimation de la puissance du modèle RNA	MPPT basé sur une méthode intelligente
[5]	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non
[138]	Non	Non	Non	Oui	Non	Non
[139]	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui
[140]	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui
[141]	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui
[102]	Non	Non	Non	Non	Non	Non
[101]	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non
La méthode proposée	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Le tableau montre la comparaison entre les caractéristiques de la méthode proposée et les méthodes précédentes. Ensuite, le tableau propose plusieurs critères de comparaison entre les différentes méthodes, tels que la détection automatique, la détection en temps réel, l'utilisation de MPPT basée sur une méthode d'intelligence artificielle, etc. Les méthodes citées dans le tableau présentent de nombreux avantages et inconvénients, par contre la méthode proposée offre tous les avantages mentionnés dans le tableau. Le prototype proposé est moins coûteux et nécessite peu d'équipement pour la détection des défauts en temps réel, ce qui est un très bon avantage pour les concepteurs. En outre, la stratégie proposée peut également réduire les coûts de maintenance et améliorer l'efficacité des systèmes de conversion photovoltaïque.

**Tableau 4.2:** Nouvelles techniques de diagnostic dans un système photovoltaïque et résultats attendus

Références et années	Méthode proposée	Résultats souhaités
[142] 2022	Cet article propose une méthode de diagnostic prédictif des défauts dans les panneaux solaires. Cette méthode est basée sur l'isolation paramétrique par l'analyse des courbes Voc (tension de circuit ouvert) et Isc (courant de court-circuit)	Détection en ligne via un paramètre prédictif des symptômes. Cette méthode est peu coûteuse.
[143] 2022	Dans ce travail, différentes approches d'apprentissage automatique et d'apprentissage d'ensemble sont évaluées pour le diagnostic des défaillances des systèmes photovoltaïques.	Certains défauts présentant une caractéristique difficile à diagnostiquer peuvent être diagnostiqués et classés.
[144] 2021	Cet article propose une méthode pour déterminer les défauts et les changements survenant dans la production d'énergie photovoltaïque. Cette méthode est basée sur l'utilisation de données uniquement sans l'utilisation de matériaux ou de modèles supplémentaires.	Il s'agit d'une méthode simple qui peut être facilement mise en œuvre dans les systèmes photovoltaïques. Diagnostic des changements indésirables même en présence d'un faible rayonnement. N'utilisez pas de capteurs de rayonnement et de température.
[145] 2021	Cet article propose une méthode de diagnostic automatique des défauts du panneau photovoltaïque.	La méthode proposée est conçue pour être mise en œuvre dans les zones difficiles d'accès et vise à minimiser la maintenance corrective.
[146] 2021	Il présente une méthode basée sur la comparaison des paramètres du système photovoltaïque entre eux.	Identifier avec précision l'état d'ombrage partiel du panneau. Algorithme simple.
[147] 2021	Cet article porte sur la détection des défauts d'ombrage partiels à l'aide de l'analyse des composantes principales des sommets (VPCA).	L'avantage de cette méthode est qu'elle réduit les fausses alertes concernant la présence d'un défaut d'ombrage.
[148] 2020	Une méthode basée sur la courbe (I-V) a été utilisée pour diagnostiquer le défaut d'ombrage partiel. Des variables spécifiques sont également utilisées pour déterminer le type de défaut.	Une bonne méthode pour identifier les défauts différenciés et les conditions partiellement ombragées. Une méthode simple qui peut être utilisée avec les algorithmes MPPT traditionnels tels que la méthode P & O.
La méthode proposée	Ce travail propose un algorithme intelligent pour détecter et identifier les défauts d'ombrage dans un système PV.	Détection en ligne et en temps réel. Diagnostic des défauts d'ombrage et calcul de son pourcentage dans toutes les conditions climatiques. Une méthode très simple à mettre en œuvre.

## 4.4 Détection des défauts dans le panneau photovoltaïque à l'aide de la technique des Neuro-Flous (ANFIS)

### 4.4.1 Introduction

ANFIS est une technique qui combine la logique floue et les réseaux neuronaux, l'une basée sur des systèmes neurobiologiques et l'autre sur des systèmes d'apprentissage flous similaires à la logique (linguistique) humaine. Cette combinaison (hybride) crée un système intelligent très efficace en maximisant les points forts de chaque élément et en minimisant la nécessité de traiter chaque problème de ces techniques individuellement. Les systèmes flous bénéficient des capacités d'apprentissage computationnel des réseaux neuronaux pour expliquer et représenter le système. Le fait est que ces deux techniques combinées fonctionnent mieux lorsqu'elles sont associées et se complètent les unes les autres.

Les premières études sur les systèmes neuro-flous ont été réalisées par Jang, Lin et Lee en 1991, Berenji en 1992, Nauck en 1993, etc. Le contrôle des processus représente la majorité des applications initiales dans plusieurs domaines. Son utilisation s'est progressivement étendue à plusieurs branches, notamment la classification des données, l'analyse des données, la détection des défauts et l'aide à la décision [149].

Le principe des réseaux neuronaux flous stipule que les poids et les biais appliqués aux informations transmises à un neurone avant de les traiter à l'aide de fonctions mathématiques sont représentés sous forme de nombres flous. Il est également possible de représenter les entrées par des nombres flous.

### 4.4.2 Architecture d'un réseau de neurones flous

ANFIS est une méthode d'auto-paramétrage d'un système d'inférence floue, qui contient cinq (05) couches divisées en deux types : nœuds adaptatifs ou fixes, spécifiés par des nœuds carrés et circulaires dans l'ordre, les cinq couches sont représentées sur la référence [150].

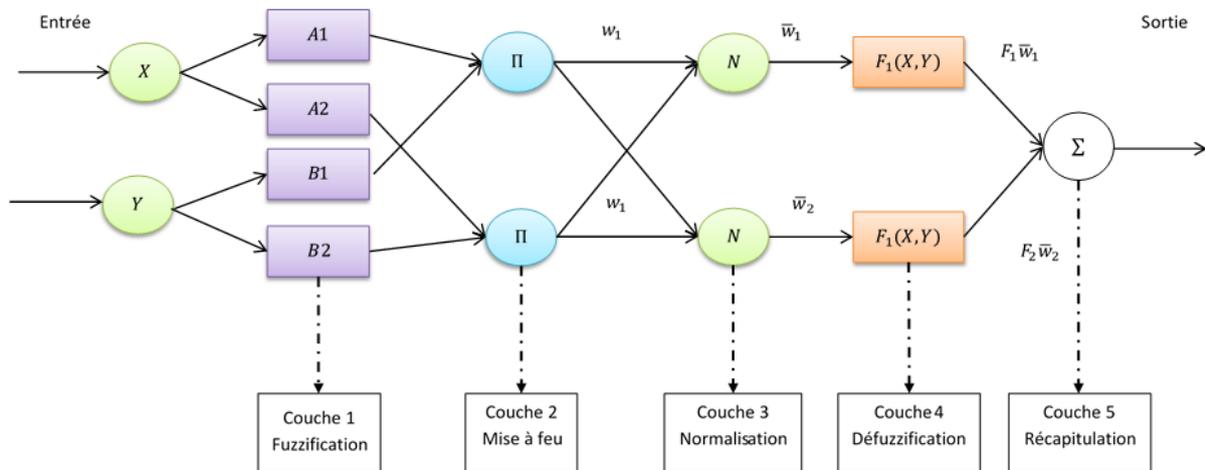


Figure 4.20: Architecture d'un réseau de neurones flous

Le point qui distingue l'algorithme ANFIS de nombreux autres algorithmes est qu'il ne produit qu'une seule sortie. Les sorties sont déterminées par des étapes successives comprenant la génération de règles floues, la fuzzification des entrées avec des fonctions d'appartenance, la définition de la force de la règle et l'évaluation de ses implications avec un ensemble de données d'entrée spécifique. Les paramètres de la courbe de la fonction d'appartenance sont déterminés à l'aide des valeurs du produit des règles d'apprentissage prédéfinies et des valeurs pondérées pertinentes. Les paramètres de la fonction d'appartenance sont utilisés pour calculer le rapport entre les valeurs pondérées individuelles et totales. Enfin, ANFIS prédit la cible en calculant une valeur de gain globale, qui sert de valeur de sortie [151].

### 4.4.3 Description du système de détection

Plusieurs techniques de détection des défauts dans les systèmes photovoltaïques ont déjà été mentionnées dans la partie (3.4). Afin d'obtenir de bons résultats pour toutes les techniques de détection des défauts des systèmes solaires, il est recommandé de connecter le système à une charge. Pour cette raison, le système contenir tous les éléments nécessaires, à partir d'un / des panneaux et un convertisseur statique pour exécuter le contrôle du point de puissance maximale (MPPT) (mentionné dans la partie (2.6)) est un outil essentiel pour un système photovoltaïque, aidant à atteindre une puissance maximale malgré les conditions météorologiques changeantes (température (Temp) et irradiation solaire (Irr)) et les types ou les valeurs de charge. Il existe de nombreuses techniques MPPT qui peuvent être appliquées pour obtenir de bons résultats dans toutes les conditions météorologiques [152]. Dans cette partie, la commande hybride (technique) par mode glissant flou (AFSMC) a été utilisée.

Les quantités utilisées pour appliquer ce travail sont les suivantes : les conditions climatiques (Temp et Irr) et les grandeurs électriques fournies par le générateur photovoltaïque. Cette technique de détection fournit une méthode efficace et rapide pour détecter différents types de défauts sur le système PV. Initialement, le système de détection est basé sur une technique d'intelligence artificielle ANFIS, qui utilise les signaux de sortie du panneau tels que la tension ( $V_{pv}$ ) et le courant ( $I_{pv}$ ) du panneau solaire d'une part, et les signaux générés par le modèle similaire d'un panneau solaire utilisant un réseau neuronal artificiel qui a le même comportement que ce panneau d'autre part. Les signaux obtenus sont la tension ( $V_{RNA}$ ) et le courant ( $I_{RNA}$ ). Toutes ces données sont destinées à identifier et à détecter l'existence de défauts et leur type. Ces signaux sont introduits dans un bloc ANFIS. La structure générale de ce système a été présentée dans la Figure. 4.21.

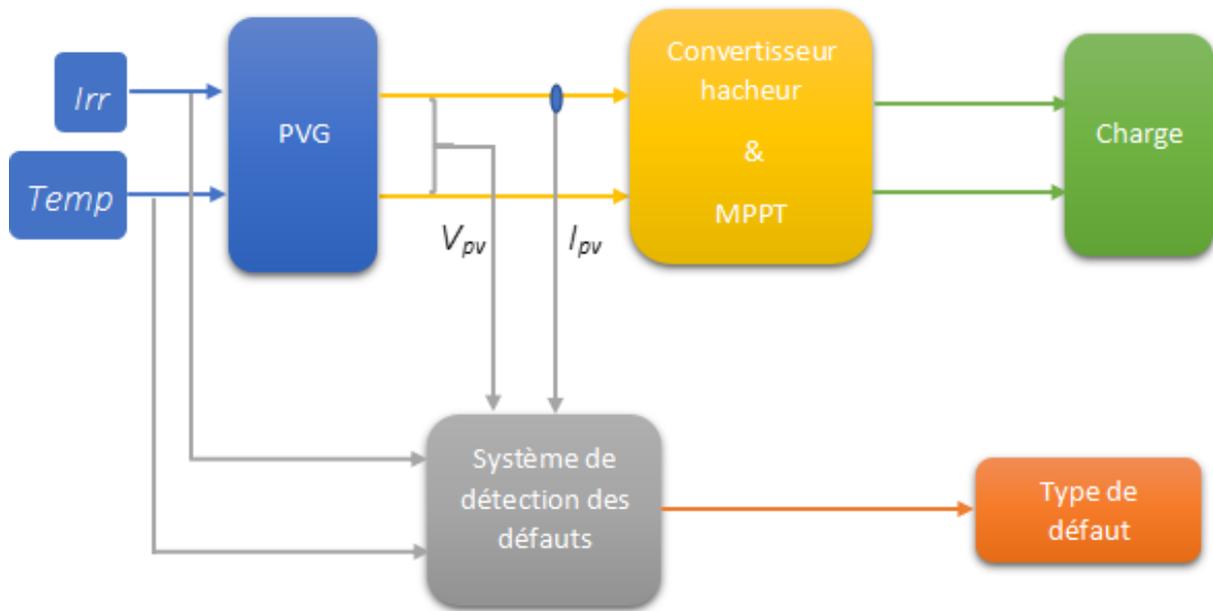


Figure 4.21: Structure générale du système photovoltaïque et diagnostic

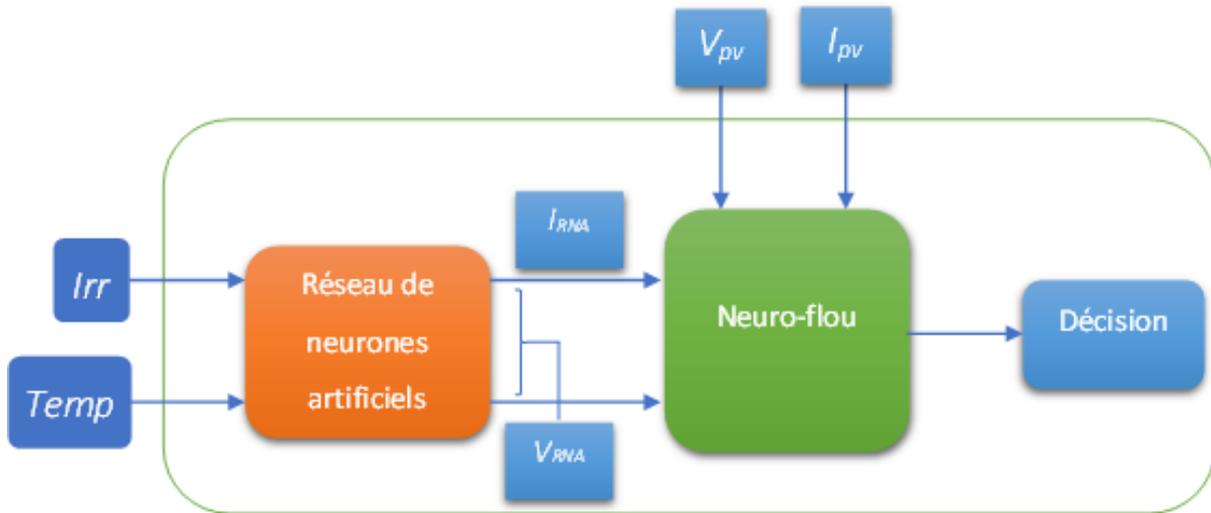
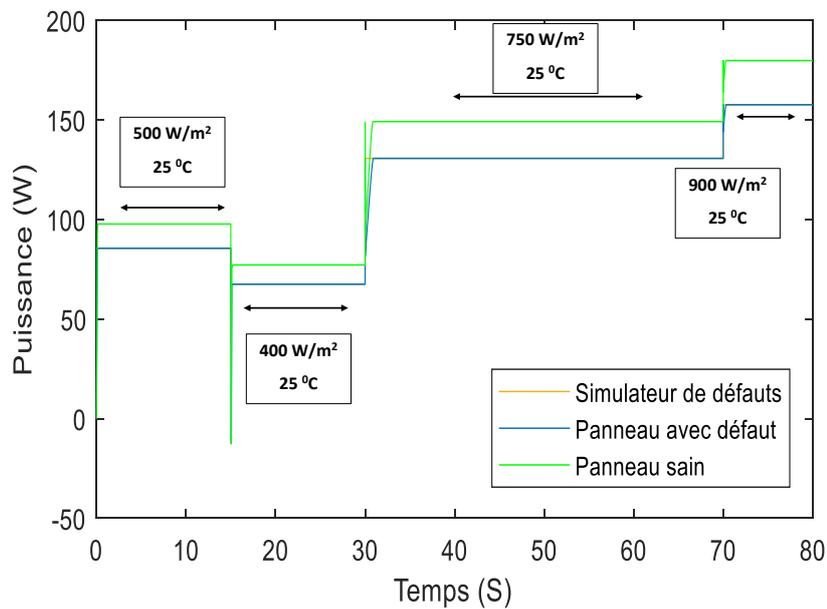


Figure 4.22: Conception du système de détection des défauts

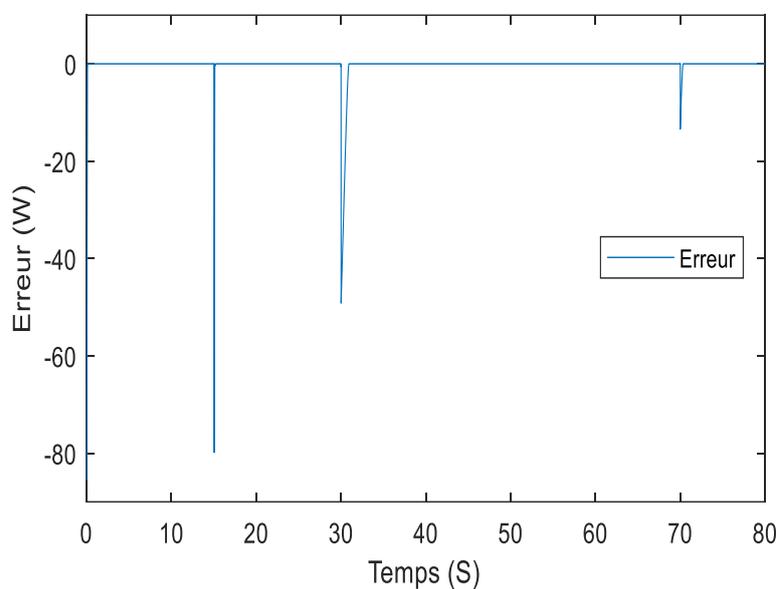
#### 4.4.4 Résultats et discussions

Une méthode basée sur les techniques d'intelligence artificielle RNA et ANFIS a été mise en œuvre pour la simulation dans MATLAB/Simulink. Le système de détection des défauts basé sur ANFIS compare les signaux fournis par le modèle de panneau solaire et les modèles RNA. Le système de détection est divisé en deux parties : la première vise à détecter la présence d'un défaut et la seconde à déterminer le type de ce défaut. Pour la phase de préparation (training), deux variables importantes, à savoir la température et le rayonnement solaire mesurés à partir de différents états des panneaux solaires, sont nécessaires pour créer une base de données pour les deux sous-systèmes des modèles RNA et ANFIS. Après cette étape, les données précédentes sont utilisées pour entraîner le système de détection. Une fois le système formé et assigné, une évaluation de la précision des résultats doit être effectuée, ainsi qu'une évaluation de la précision de la méthode proposée.

La Figure. 4.23 montre la comparaison entre la puissance de sortie d'un simulateur de défaut, d'un panneau photovoltaïque sain et d'un panneau photovoltaïque présentant un défaut (circuit ouvert). La Figure. 4.24 montre la correspondance parfaite entre le panneau solaire défectueux et le simulateur de défaut. On constate une nette perte d'énergie par rapport à un panneau solaire sain (Figure. 4.23)



**Figure 4.23:** Signaux de puissance de sortie pour : simulateur de défaut, panneau PV avec défaut, panneau PV sain



**Figure 4.24:** Erreur entre le PV avec défaut et le simulateur de défaut

Pour vérifier la fiabilité du système de détection pour différents types de défauts, les figures 4.25 et 4.26 d'une part, et 4.27 et 4.28 d'autre part, présentent différents signaux

correspondant à certains de ces défauts. Dans cette étude, le défaut de résistance série ( $R_s$ ) ainsi que le défaut de circuit ouvert (C-O) ont été introduits à une température de  $25^\circ\text{C}$  et sous différentes intensités de rayonnement. Lorsque la valeur du signal est nulle (0), cela indique la présence d'un défaut, soit  $R_s$ , soit C-O. Malgré les variations des conditions climatiques, nous constatons que cette méthode reste efficace pour diagnostiquer les défauts, comme en témoigne la détection réussie des défauts  $R_s$  et C-O dans le système PV.

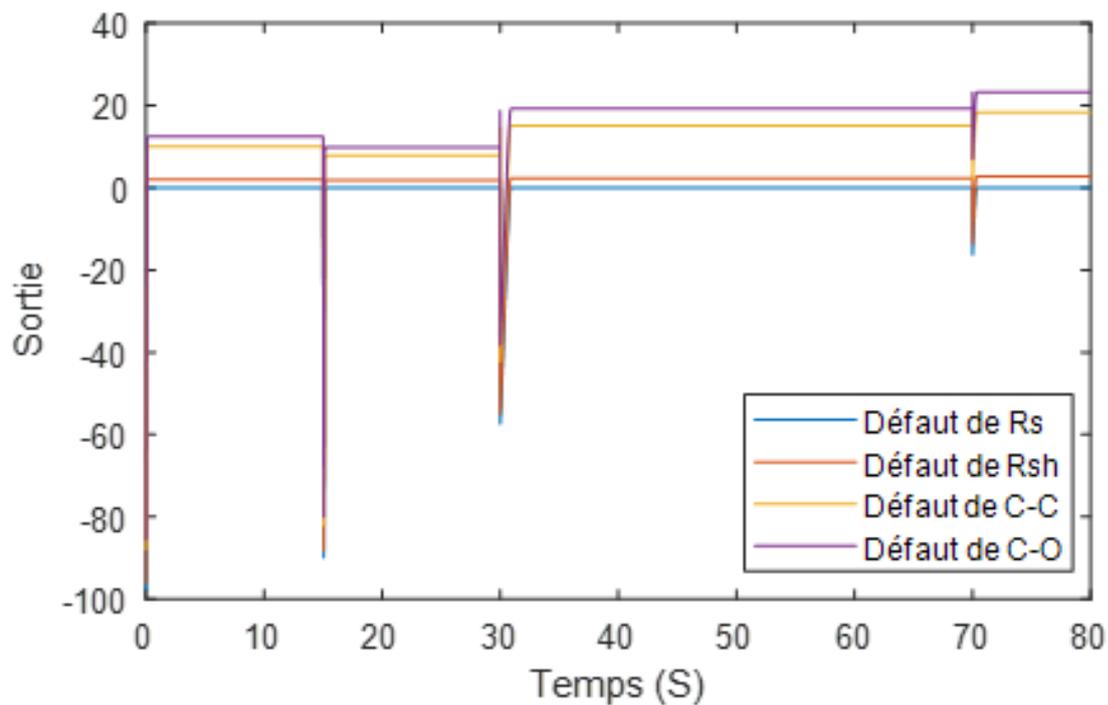


Figure 4.25: Signaux de défaut (sortie) -Essai 1-

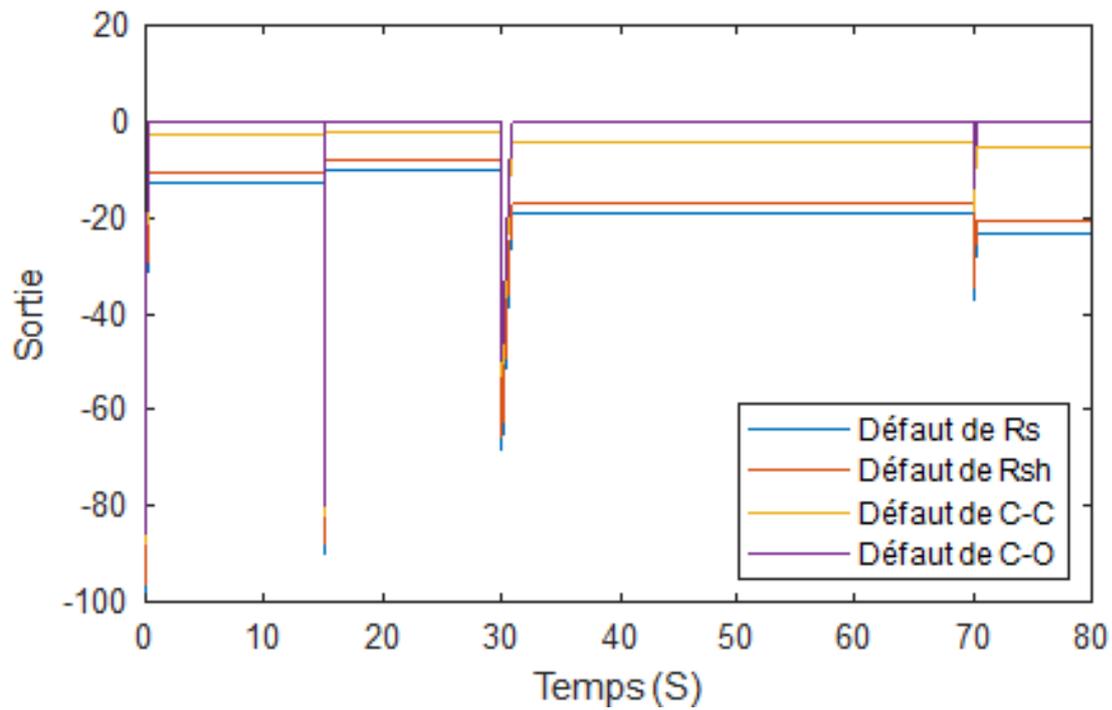


Figure 4.26: Signaux de défaut (sortie) -Essai 2-

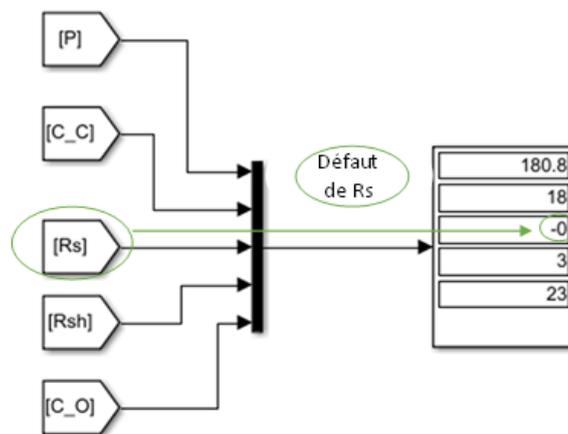


Figure 4.27: Détection de défaut Rs par le mécanisme de détection intelligent proposé

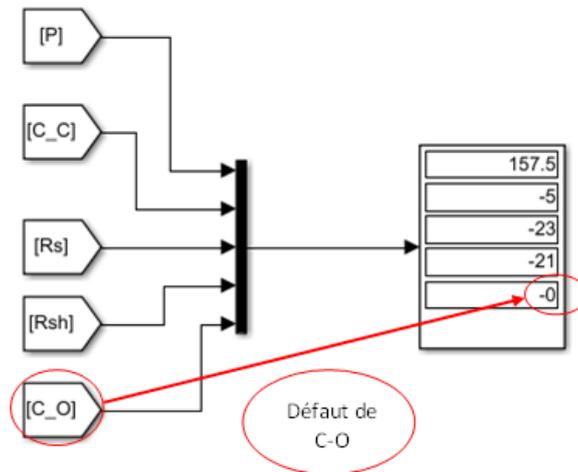


Figure 4.28: Détection de défaut C-O par le mécanisme de détection intelligent proposé

## 4.5 Conclusion

Au début de ce chapitre, on a présenté une méthode de détection du défaut d'ombrage partiel, car il est le défaut le plus critique même en bonne condition climatique. La valeur de l'énergie produite est fortement affectée par les différents types d'ombrage, ce qui nous a amenés à chercher un moyen efficace de détecter le pourcentage d'ombrage en temps réel.

La méthode utilisée était principalement basée sur le développement de deux parties créées sur un réseau de neurone artificiel (RNA (ANN)), où un système a été créé parallèlement au système réel et programmé pour donner des valeurs qui reflètent toujours l'état sain du système réel. La seconde partie est un système de diagnostic des défauts qui dépend du résultat des signaux provenant des deux systèmes précédents et qui donne la situation réelle à laquelle le système est affecté.

D'autre part, on propose une nouvelle méthode pour identifier les défauts dans un réseau PV, y compris les défauts Ps, C-C, C-O, Rs et Rsh. Cette méthode est basée sur l'intelligence artificielle et dépend des algorithmes RNA et ANFIS. Cette méthode se distingue par l'utilisation du courant et de la tension extraits par les modèles PV et RNA. Ces signaux (courant et tension) sont introduits dans le classificateur de recherche de défauts ANFIS, qui a démontré son efficacité.

Cette méthode permet de classer les nombreux défauts du système photovoltaïque qui peuvent survenir même en présence de variations climatiques. Le contrôle AFSM, qui a démontré sa robustesse, sa durabilité et son efficacité, a été utilisé pour contrôler le PV afin d'extraire le plus d'énergie possible. Les résultats de la simulation démontrent la fiabilité de la méthode proposée pour trouver et détecter les défauts.

# Conclusion Générale

Cette thèse se concentre sur l'optimisation et le contrôle des systèmes photovoltaïques par l'application des techniques MPPT, avec la détection et la localisation de différents défauts dans le générateur PV. L'objectif de cette thèse est de proposer un système complet. Ce système peut être divisé en deux parties : la première consiste à extraire le maximum d'énergie des panneaux photovoltaïques grâce à l'utilisation de la technologie MPPT (AFSMC), et la seconde consiste à identifier les défauts et leurs emplacements. L'absence de ce système entraîne une réduction significative de la production d'énergie.

Dans la première partie, différentes techniques sont proposées dans la littérature concernant la recherche du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques, ces techniques varient entre les techniques classiques, les techniques avancées et d'autres techniques hybrides. Dans ce contexte, la plupart de ces techniques s'approchent de l'objectif avec des différences en termes de fiabilité, de complexité et de coût de mise en œuvre. On applique une technique MPPT appelée AFMSC, cette technique est hybride, qui combine la logique floue et le mode glissant, une adaptation a été appliquée pour ajuster le gain ( $K$ ) du mode glissant afin de toujours obtenir le point maximum de puissance produite instantanément. Le convertisseur statique (hacheur parallèle) a ensuite été contrôlé par cette technique afin de toujours maintenir la puissance maximale extraite malgré les changements dans les conditions climatiques. Enfin, cette technique MPPT peut être considérée comme une technique peu coûteuse et très fiable.

Pour la deuxième partie, l'objectif de cette étude est de proposer une solution, afin d'augmenter la marge de sécurité des systèmes photovoltaïques, contre les risques d'éventuels accidents d'incendie. Tout d'abord, le processus de ce système est basé sur des données électriques qui restent toujours disponibles (courant, tension), ces données sont extraites du système pendant son fonctionnement, indépendamment de la structure du système photovoltaïque. Les méthodes traditionnelles de détection des défauts s'appuient principalement sur des équipements complexes et coûteux. Les méthodes de détection des défauts proposées peuvent réduire les coûts de maintenance et améliorer l'efficacité de la conversion opérationnelle des systèmes photovoltaïques.

Le modèle RNA simule parfaitement le comportement du module photovoltaïque, ce qui se reflète clairement dans la valeur de la puissance de sortie et dans le comportement du système dans toutes les conditions de fonctionnement possibles. Les résultats ont montré que le modèle utilisé est efficace pour détecter et identifier les défauts avec une bonne précision après l'application de différentes catégories d'ombrage malgré le changement des conditions climatiques (illumination et température).

En outre, on peut dire que les réseaux neuronaux artificiels sont des outils de modélisation efficaces et puissants en raison de leur robustesse, qui leur permet de prédire les sorties du réseau même lorsque la relation entre les entrées et les sorties est non linéaire. L'avantage du détecteur de défauts proposé dans le domaine de la détection des défauts a été confirmé par des tests de simulation dans MATLAB/Simulink. L'ombrage partiel est l'un des défauts les plus courants des systèmes solaires. Bien que ce défaut puisse sembler mineur, il peut entraîner des incendies car il augmente la température des cellules sombres, qui peuvent agir comme des charges en l'absence de lumière. De nombreuses causes peuvent être à l'origine de ce défaut, notamment les arbres, les fientes d'oiseaux, etc. La technique proposée consiste à détecter la présence de défauts d'ombrage et à calculer leur pourcentage à l'aide de la technique des réseaux neuronaux artificiels. Une deuxième technique est proposée pour distinguer plusieurs défauts, en utilisant un système hybride (Neuro-flou) qui détecte le défaut et classe sa nature. Après un entraînement sur ce système et de nombreux tests, on a obtenu un résultat très satisfaisant.

Le système proposé peut être réalisé à l'aide de microcontrôleurs et des capteurs nécessaires (capteur de tension, capteur de courant, etc.). La mise en œuvre de ce système peut améliorer la production d'énergie, tout en réduisant le temps et les coûts de maintenance.

Les résultats de la simulation peuvent être considérés comme l'étape initiale du développement du système, ou comme un outil facilitant l'étape suivante, qui consiste à convertir les résultats de la simulation en résultats expérimentaux et appliqués. Par conséquent, pour améliorer ce travail, il existe quelques perspectives complémentaires, qui consistent à valider pratiquement ces résultats obtenus, ainsi qu'à développer et à améliorer le système de détection des défauts via d'autres techniques nouvelles comme : le deep learning et le machine learning.

# Bibliographie

- [1] Ying Li, Yung-ho Chiu, and Tai-Yu Lin. Research on new and traditional energy sources in oecd countries. *International journal of environmental research and public health*, 16(7) :1122, 2019.
- [2] Fouzi Harrou, Ahmed Saidi, Ying Sun, and Sofiane Khadraoui. Monitoring of photovoltaic systems using improved kernel-based learning schemes. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 11(3) :806–818, 2021.
- [3] Elyes Garoudja, Fouzi Harrou, Ying Sun, Kamel Kara, Aissa Chouder, and Santiago Silvestre. A statistical-based approach for fault detection and diagnosis in a photovoltaic system. In *2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, pages 75–80. IEEE, 2017.
- [4] Anna Ciampi, Annalisa Appice, Donato Malerba, and Angelo Muolo. An intelligent system for real time fault detection in pv plants. In *Sustainability in Energy and Buildings : Proceedings of the 3rd International Conference in Sustainability in Energy and Buildings (SEB'11)*, pages 235–244. Springer, 2012.
- [5] Fouzi Harrou, Bilal Taghezouit, and Ying Sun. Improved  $k$  nn-based monitoring schemes for detecting faults in pv systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(3) :811–821, 2019.
- [6] Angel Cid Pastor. *Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques*. PhD thesis, INSA de Toulouse, 2006.
- [7] Global RE installations rose 6 <https://shorturl.at/ayG01>, 2022. Accessed 2022.
- [8] Phebe Asantewaa Owusu and Samuel Asumadu-Sarkodie. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation, 2016.
- [9] Twidell John and Weir Tony. Renewable energy resources. *Taylor and Francis*, 2006.
- [10] Wind power capacity in the Net Zero Scenario, 2010-2030. <https://shorturl.at/cd0W9>, 2022. Accessed Sep 12, 2022.

- [11] Antonia V Herzog, Timothy E Lipman, Daniel M Kammen, et al. Renewable energy sources. *Encyclopedia of life support systems (EOLSS). Forerunner Volume- 'Perspectives and overview of life support systems and sustainable development*, 76, 2001.
- [12] Bartłomiej Igliński. Hydro energy in poland : The history, current state, potential, swot analysis, environmental aspects. *International Journal of Energy and Water Resources*, 3(1) :61–72, 2019.
- [13] Dieter Holm. Renewable energy future for the developing world. *Transition to Renewable Energy Systems*, pages 137–157, 2013.
- [14] Tony Bridgwater. Biomass for energy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(12) :1755–1768, 2006.
- [15] Jefferson W Tester, Brian J Anderson, Anthony S Batchelor, David D Blackwell, Ronald DiPippo, Elisabeth M Drake, John Garnish, Bill Livesay, MC Moore, Kenneth Nichols, et al. The future of geothermal energy, 2006.
- [16] What are the advantages and disadvantages of geothermal energy? <https://shorturl.at/cfU69>, 2023. Accessed 2023.
- [17] Shahid Ali and Suresh Pandurang Deshmukh. An overview : Applications of thermal energy storage using phase change materials. *Materials Today : Proceedings*, 26 :1231–1237, 2020.
- [18] Jibrán Khan and Mudassar H Arsalan. Solar power technologies for sustainable electricity generation—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55 :414–425, 2016.
- [19] Patrick Akata Nwofe. Potentials of renewable energy in a developing economy. *International Journal of Advanced Research*, 2(9) :334–342, 2014.
- [20] Atmania Hanane and Salem Abdelaziz. L’investissement dans les énergies renouvelables en algérie ; un pas vers la transition énergétique (cas de l’énergie solaire) investment in renewable energies in algeria ; a step towards energy transition (case of solar energy). *Revue Algérienne d’Economie de gestion Vol*, 12(01), 2018.
- [21] Mussa Acherchour. Ce pays désertique peine à exploiter son énorme gisement d’énergie solaire. <https://shorturl.at/ilrSV>, 2023. Accessed March 13, 2023.
- [22] This is a best prospect industry sector for this country. Includes a market overview and trade data. <https://shorturl.at/dntNW>, 2023. Accessed Jan 31, 2023.
- [23] Matteo Pennarts. Renewable energy in Algeria : potential for stability. <https://shorturl.at/adrsT>, 2023. Accessed Jan 02, 2023.

- [24] Photovoltaics - Historical Development. <https://shorturl.at/lyJQ3>, 2023. Accessed Sep 16, 2023.
- [25] Eric W Weisstein. Becquerel, Alexandre Edmond (1820-1891). <https://shorturl.at/qyBW0>, 2007. Accessed 2007.
- [26] Kashif Ishaque, Zainal Salam, Muhammad Amjad, and Saad Mekhilef. An improved particle swarm optimization (pso)-based mppt for pv with reduced steady-state oscillation. *IEEE transactions on Power Electronics*, 27(8) :3627–3638, 2012.
- [27] Aicha Djalab. Diagnostic des défauts d’un système d’énergie renouvelable basée sur les techniques d’intelligence artificielle : Application sur un système photovoltaïque. *En vue de l obtention du diplôme de Docteur en*, 3, 2020.
- [28] Girish Kumar Singh. Solar power generation by pv (photovoltaic) technology : A review. *Energy*, 53 :1–13, 2013.
- [29] Vineet Veer Tyagi, Nurul AA Rahim, Nasrudin Abd Rahim, A Jeyraj, and L Selvaraj. Progress in solar pv technology : Research and achievement. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20 :443–461, 2013.
- [30] Geert Verbong, Frank Geels, and Rob Raven. Multi-niche analysis of dynamics and policies in dutch renewable energy innovation journeys (1970–2006) : hype-cycles, closed networks and technology-focused learning. *Technology Analysis & Strategic Management*, 20(5) :555–573, 2008.
- [31] Martin Green. The path to 25% silicon solar cell efficiency : History of silicon cell evolution. *Progress in photovoltaics : research and applications*, 17(3) :183–189, 2009.
- [32] Solar PV Word Epro. <https://shorturl.at/cpLWX>, 2016. Accessed January 10, 2016.
- [33] Oleksiy Nichiporuk. *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités*. PhD thesis, Lyon, INSA, 2005.
- [34] Mugdha Dambhare, Bhavana Butey, and Sanjiv V Moharil. Solar photovoltaic technology : A review of different types of solar cells and its future trends. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 1913, page 012053. IOP Publishing, 2021.
- [35] Solar Sena. Different Types of Solar Panels – Which is the Best for You? <https://shorturl.at/hqDFN>, 2023. Accessed Sep 09, 2022.
- [36] Sadeq Duair Aneed Al-Majidi. *Efficient Maximum Power Point Tracking Techniques for a Grid-connected Photovoltaic System using Artificial Intelligence*. PhD thesis, Brunel University London, 2020.

- [37] Preetika Sharma, Parveen Goyal, et al. Evolution of pv technology from conventional to nano-materials. *Materials Today : Proceedings*, 28 :1593–1597, 2020.
- [38] Justyna Pastuszek and Paweł Węgierek. Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials*, 15(16) :5542, 2022.
- [39] Panneaux solaires silicium amorphe. <https://shorturl.at/qvX18>, 2021. Accessed March 03, 2021.
- [40] Donglu Shi, Zizheng Guo, and Nicholas Bedford. Nanoenergy materials. In *Nanomaterials and Devices*, Micro and Nano Technologies, pages 255–291. William Andrew Publishing, Oxford, 2015.
- [41] Jeyakumar Ramanujam and Udai P Singh. Copper indium gallium selenide based solar cells—a review. *Energy & Environmental Science*, 10(6) :1306–1319, 2017.
- [42] Cellules solaires au sélénure de gallium et d’indium de cuivre. <https://shorturl.at/mvBU3>.
- [43] Zouhair El Jouad. *Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques*. PhD thesis, Angers, 2016.
- [44] Le tellure de cadmium photovoltaïque. <https://shorturl.at/GHIY4>.
- [45] Lichun Sun, Yichuan Chen, Mengtao Sun, and Youjin Zheng. Organic solar cells : physical principle and recent advances. *Chemistry—An Asian Journal*, 18(5) :e202300006, 2023.
- [46] The perovskite handbook. <https://shorturl.at/hHU79>, 2023. Accessed Mar 06, 2022.
- [47] University of Michigan Center for Sustainable Systems. Photovoltaic Energy Fact-sheet. <https://shorturl.at/bizI1>, 2022. Pub. No. CSS07-08.
- [48] Jinko Solar. Solar PV technology market trends 2021-2022. <https://shorturl.at/bfivS>, 2021. Accessed November 30, 2021.
- [49] Zhenbang Dai and Andrew Rappe. Recent progress in the theory of bulk photovoltaic effect. *Chemical Physics Reviews*, 4(1), 2023.
- [50] Andreas Wagner. Peak-power and internal series resistance measurement under natural ambient conditions. In *Proceedings EuroSun*, volume 5, 2000.
- [51] David King. Photovoltaic module and array performance characterization methods for all system operating conditions. In *AIP conference proceedings*, volume 394, pages 347–368. American Institute of Physics, 1997.
- [52] Noel Servagent. Physique des semi-conducteurs : Fondamentaux. <http://www.gnu.org/licenses/fdl.txt>, 2008. Accessed April, 2008.

- [53] Salaheddine Bensalem. *Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires*. PhD thesis, 2018.
- [54] Roberto Faranda, Sonia Leva, et al. A comparative study of mppt techniques for pv systems. In *7th WSEAS international conference on application of electrical engineering (AEE'08), Trondheim, Norway*, pages 100–105, 2008.
- [55] H Bülent Ertan, M Yildirim Üçtug, Ron Colyer, and Alfio Consoli. *Modern electrical drives*, volume 369. Springer Science & Business Media, 2013.
- [56] Djaafar Toumi, Djiliani Benattous, Ahmed Ibrahim, HI Abdul-Ghaffar, Sergey Obukhov, Raef Aboelsaud, Yacine Labbi, and Ahmed A Zaki Diab. Optimal design and analysis of dc–dc converter with maximum power controller for stand-alone pv system. *Energy Reports*, 7 :4951–4960, 2021.
- [57] Rudolf Severns, Gordon Bloom, and Rudolf Severns. *Modern DC-to-DC switchmode power converter circuits*. Springer, 1985.
- [58] Arun Kumar Verma, Bhim Singh, and Subhash Chandra Kaushik. An isolated solar power generation using boost converter and boost inverter. *International Journal of Engineering and Information Technology*, 2(2) :101–108, 2010.
- [59] Yblin Janeth Acosta Alcazar, Demercil de Souza Oliveira, Fernando Lessa Tofoli, and Rene Pastor Torrico-Bascope. Dc–dc nonisolated boost converter based on the three-state switching cell and voltage multiplier cells. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(10) :4438–4449, 2012.
- [60] A Pradeep Kumar Yadav, S Thirumaliah, G Haritha, and PG Scholar. Comparison of mppt algorithms for dc-dc converters based pv systems. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 1(1) :18–23, 2012.
- [61] Kummara Venkat Guru Raghavendra, Kamran Zeb, Anand Muthusamy, TNV Krishna, SVS V Prabhudeva Kumar, Do-Hyun Kim, Min-Soo Kim, Hwan-Gyu Cho, and Hee-Je Kim. A comprehensive review of dc–dc converter topologies and modulation strategies with recent advances in solar photovoltaic systems. *Electronics*, 9(1) :31, 2019.
- [62] Ratnakar Babu Bollipo, Suresh Mikkili, and Praveen Kumar Bonthagorla. Hybrid, optimal, intelligent and classical pv mppt techniques : A review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(1) :9–33, 2020.
- [63] Francisco Paz and Martin Ordonez. Zero oscillation and irradiance slope tracking for photovoltaic mppt. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 61(11) :6138–6147, 2014.

- [64] Qiyu Li, Shengdun Zhao, Mengqi Wang, Zhongyue Zou, Bin Wang, and Qixu Chen. An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm based on a pv module four-parameter model for higher efficiency. *Applied Energy*, 195 :523–537, 2017.
- [65] Dezso Sera, Laszlo Mathe, Tamas Kerekes, Sergiu Viorel Spataru, and Remus Teodorescu. On the perturb-and-observe and incremental conductance mppt methods for pv systems. *IEEE journal of photovoltaics*, 3(3) :1070–1078, 2013.
- [66] Yoash Levron and Doron Shmilovitz. Maximum power point tracking employing sliding mode control. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Regular Papers*, 60(3) :724–732, 2013.
- [67] Angel Garrido. A brief history of fuzzy logic. *BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, 3(1) :71–77, 2012.
- [68] Carlos Robles Algarín, John Taborda Giraldo, and Omar Rodriguez Alvarez. Fuzzy logic based mppt controller for a pv system. *Energies*, 10(12) :2036, 2017.
- [69] Peter Kofinas, Anastasios Dounis, George Papadakis, and Margarita Niki Assimakopoulos. An intelligent mppt controller based on direct neural control for partially shaded pv system. *Energy and Buildings*, 90 :51–64, 2015.
- [70] Roberto Sussumu Inomoto, José Roberto Boffino de Almeida Monteiro, and Alfeu J Sguarezi Filho. Boost converter control of pv system using sliding mode control with integrative sliding surface. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(5) :5522–5530, 2022.
- [71] R Anusuyadevi et al. Maximum power point tracking of dc to dc boost converter using sliding mode control. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 3(3) :321, 2013.
- [72] Yihao Wan, Mingxuan Mao, Lin Zhou, Qianjin Zhang, Xinze Xi, and Chen Zheng. A novel nature-inspired maximum power point tracking (mppt) controller based on ssa-gwo algorithm for partially shaded photovoltaic systems. *Electronics*, 8(6) :680, 2019.
- [73] Kinattungal Sundareswaran and Sankaran Palani. Application of a combined particle swarm optimization and perturb and observe method for mppt in pv systems under partial shading conditions. *Renewable Energy*, 75 :308–317, 2015.
- [74] Ratnakar Babu Bollipo, Suresh Mikkili, and Praveen Kumar Bonthagorla. Hybrid, optimal, intelligent and classical pv mppt techniques : A review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(1) :9–33, 2020.

- [75] Otto Cerman and Petr Hušek. Adaptive fuzzy sliding mode control for electrohydraulic servo mechanism. *Expert Systems with Applications*, 39(11) :10269–10277, 2012.
- [76] Sabah Miqoi, Abdelghani El Ougli, and Belkassem Tidhaf. Adaptive fuzzy sliding mode based mppt controller for a photovoltaic water pumping system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 10(1) :414, 2019.
- [77] Mohammad Reza Soltanpour, Mohammad Hassan Khooban, and Mohammad Reza Khalghani. An optimal and intelligent control strategy for a class of nonlinear systems : adaptive fuzzy sliding mode. *Journal of Vibration and Control*, 22(1) :159–175, 2016.
- [78] Pablo Guillen Lázaro. Maximum power point tracking algorithms performance comparison for photovoltaic systems under a wide range of dynamic partial shading condition. Master’s thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [79] Kashif Ishaque, Zainal Salam, Muhammad Amjad, and Saad Mekhilef. An improved particle swarm optimization (pso)–based mppt for pv with reduced steady-state oscillation. *IEEE transactions on Power Electronics*, 27(8) :3627–3638, 2012.
- [80] Xuan Hieu Nguyen. Matlab/simulink based modeling to study effect of partial shadow on solar photovoltaic array. *Environmental Systems Research*, 4 :1–10, 2015.
- [81] Satyajit Mohanty, Bidyadhar Subudhi, and Pravat Kumar Ray. A new mppt design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(1) :181–188, 2015.
- [82] Ke Guo, Lichuang Cui, Mingxuan Mao, Lin Zhou, and Qianjin Zhang. An improved gray wolf optimizer mppt algorithm for pv system with bfbic converter under partial shading. *Ieee Access*, 8 :103476–103490, 2020.
- [83] Catalina González-Castaño, Carlos Restrepo, Samir Kouro, and Jose Rodriguez. Mppt algorithm based on artificial bee colony for pv system. *IEEE Access*, 9 :43121–43133, 2021.
- [84] Dervis Karaboga and Bahriye Basturk. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization : artificial bee colony (abc) algorithm. *Journal of global optimization*, 39 :459–471, 2007.
- [85] Ehab Ali and S Mb Abd-Elazim. Power system stability enhancement via new coordinated design of pss and svc. *Int J WSEAS Trans Power Syst*, 9 :428–438, 2014.

- [86] Ahmed Oshaba and Ehsan Ali. Bacteria foraging : a new technique for speed control of dc series motor supplied by photovoltaic system. *Int J WSEAS Trans Power Syst*, 9 :185–195, 2014.
- [87] Ilhem Bouchriha, Ali Ben Ghanem, and Khaled Nouri. Mppt control of a photovoltaic system based on sliding mode control. In *2019 International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC\_ASET)*, pages 12–16. IEEE, 2019.
- [88] Satheesh Krishnan G, Sundareswaran Kinattingal, Sishaj P Simon, and Panugothu Srinivasa Rao Nayak. Mppt in pv systems using ant colony optimisation with dwindling population. *IET Renewable Power Generation*, 14(7) :1105–1112, 2020.
- [89] Manel Merchaoui, Anis Sakly, and Mohamed Faouzi Mimouni. Improved fast particle swarm optimization based pv mppt. In *2018 9th international renewable energy congress (IREC)*, pages 1–7. IEEE, 2018.
- [90] Imane Idrissi. *Contribution au Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée de l'Eolienne à Vitesse Variable*. PhD thesis, Normandie, 2019.
- [91] XP Yokwana, Thapelo Moseitlhe, and Adedayo Ademola Yusuff. A novel scheme for fault detection in pvmodules based on frequency response analysis. In *2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, pages 1–5. IEEE, 2021.
- [92] Barun Basnet, Hyunjun Chun, and Junho Bang. An intelligent fault detection model for fault detection in photovoltaic systems. *Journal of Sensors*, 2020 :1–11, 2020.
- [93] Kodji Deli and Djongyang Noel. On-field operation and maintenance of photovoltaic systems in cameroon. In *Maintenance Management*. IntechOpen, 2019.
- [94] Siva Ramakrishna Madeti and SN Singh. A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system. *Solar Energy*, 158 :161–185, 2017.
- [95] Putu Agus Aditya Pramana and Rinaldy Dalimi. Hotspot detection method in large capacity photovoltaic (pv) farm. In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, volume 982, page 012019. IOP Publishing, 2020.
- [96] Tingting Pei and Xiaohong Hao. A fault detection method for photovoltaic systems based on voltage and current observation and evaluation. *Energies*, 12(9) :1712, 2019.
- [97] Romênia G Vieira, Fábio MU de Araújo, Mahmoud Dhimish, and Maria IS Guerra. A comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules. *Energies*, 13(10) :2472, 2020.

- [98] M Sabbaghpur Arani, Maryam A Hejazi, et al. The comprehensive study of electrical faults in pv arrays. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2016, 2016.
- [99] Ramabadran Ramaprabha and Badrilal Mathur. A comprehensive review and analysis of solar photovoltaic array configurations under partial shaded conditions. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 2012.
- [100] Hans S Rauschenbach. Electrical output of shadowed solar arrays. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 18(8) :483–490, 1971.
- [101] ND Kaushika and Anil K Rai. An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks. *Energy*, 32(5) :755–759, 2007.
- [102] P Sathyanarayana, Rajkiran Ballal, PL Sagar, and Girish Kumar. Effect of shading on the performance of solar pv panel. *Energy and Power*, 5(1A) :1–4, 2015.
- [103] B Pradeep Kumar, Dhanup S Pillai, N Rajasekar, Manickam Chakkarapani, and G Saravana Ilango. Identification and localization of array faults with optimized placement of voltage sensors in a pv system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(7) :5921–5931, 2020.
- [104] Siwar Fadhel, Mohamed Trabelsi, Imen Bahri, Demba Diallo, and Mohamed Faouzi Mimouni. Faults effects analysis in a photovoltaic array based on current-voltage and power-voltage characteristics. In *2016 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, pages 223–228. IEEE, 2016.
- [105] Ying-Yi Hong and Rolando A Pula. Methods of photovoltaic fault detection and classification : A review. *Energy Reports*, 8 :5898–5929, 2022.
- [106] Bill Brooks. The ground-fault protection blind spot : A safety concern for larger photovoltaic systems in the united states. *A solar ABCs White paper*, 2012.
- [107] Mohammed Khorshed Alam, Faisal Khan, Jay Johnson, and Jack Flicker. Pv ground-fault detection using spread spectrum time domain reflectometry (sstdr). In *2013 IEEE energy conversion congress and exposition*, pages 1015–102. IEEE, 2013.
- [108] Xiu Yao, Luis Herrera, Shengchang Ji, Ke Zou, and Jin Wang. Characteristic study and time-domain discrete-wavelet-transform based hybrid detection of series dc arc faults. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(6) :3103–3115, 2013.
- [109] Kevin J Lippert and Thomas A Domitrovich. Afcis—from a standards perspective. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(2) :1478–1482, 2013.

- [110] Ye Zhao, Jean-François De Palma, Jerry Mosesian, Robert Lyons, and Brad Lehman. Line–line fault analysis and protection challenges in solar photovoltaic arrays. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 60(9) :3784–3795, 2012.
- [111] Adel Mellit, Giuseppe Marco Tina, and Soteris A Kalogirou. Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91 :1–17, 2018.
- [112] Nuri Gokmen, Engin Karatepe, Berk Celik, and Santiago Silvestre. Simple diagnostic approach for determining of faulted pv modules in string based pv arrays. *Solar Energy*, 86(11) :3364–3377, 2012.
- [113] Ying-Yi Hong and Rolando A Pula. Methods of photovoltaic fault detection and classification : A review. *Energy Reports*, 8 :5898–5929, 2022.
- [114] GR Venkatakrisnan, R Rengaraj, S Tamilselvi, J Harshini, Ansheela Sahoo, C Ahmed Saleel, Mohamed Abbas, Erdem Cuce, C Jazlyn, Saboor Shaik, et al. Detection, location, and diagnosis of different faults in large solar pv system—a review. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 18 :659–674, 2023.
- [115] Tae-Hyeon Kim, Tai-Hoon Cho, Young Shik Moon, and Sung Han Park. Visual inspection system for the classification of solder joints. *Pattern Recognition*, 32(4) :565–575, 1999.
- [116] Silvano Vergura, Francescomaria Marino, and Mario Carpentieri. Processing infrared image of pv modules for defects classification. In *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pages 1337–1341. IEEE, 2015.
- [117] Asma Triki-Lahiani, Afef Bennani-Ben Abdelghani, and Ilhem Slama-Belkhodja. Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 :2680–2692, 2018.
- [118] Simon Koch, Thomas Weber, Christian Sobottka, Andreas Fladung, Patrick Clemens, and Juliane Berghold. Outdoor electroluminescence imaging of crystalline photovoltaic modules : Comparative study between manual ground-level inspections and drone-based aerial surveys. In *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pages 1736–1740, 2016.
- [119] Kais AbdulMawjood, Shady S Refaat, and Walid G Morsi. Detection and prediction of faults in photovoltaic arrays : A review. In *2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018)*, pages 1–8. IEEE, 2018.

- [120] Marjan Razani, Artur Parkhimchyk, and Nima Tabatabaei. Lock-in thermography using a cellphone attachment infrared camera. *Aip Advances*, 8(3), 2018.
- [121] Peijie Lin, Yaohai Lin, Zhicong Chen, Lijun Wu, Lingchen Chen, Shuying Cheng, et al. A density peak-based clustering approach for fault diagnosis of photovoltaic arrays. *International Journal of Photoenergy*, 2017, 2017.
- [122] Belaout Abdesslam. Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (pv) par emploi de la caractéristique courant-tension. *MEMOIRE MAGISTER, UNIVERSITE-SETIF-1-, ALGERIE*, 2014.
- [123] Elyes Garoudja, Fouzi Harrou, Ying Sun, Kamel Kara, Aissa Chouder, and Santiago Silvestre. Statistical fault detection in photovoltaic systems. *Solar Energy*, 150 :485–499, 2017.
- [124] Andreas Livera, Marios Theristis, George Makrides, and George E Georghiou. Recent advances in failure diagnosis techniques based on performance data analysis for grid-connected photovoltaic systems. *Renewable energy*, 133 :126–143, 2019.
- [125] Santolo Daliento, A Chouder, Pierluigi Guerriero, A Massi Pavan, A Mellit, Rana Moeini, Pietro Tricoli, et al. Monitoring, diagnosis, and power forecasting for photovoltaic fields : A review. *International Journal of Photoenergy*, 2017, 2017.
- [126] Adel Mellit, Soteris A Kalogirou, and Mahmoud Drif. Application of neural networks and genetic algorithms for sizing of photovoltaic systems. *Renewable energy*, 35(12) :2881–2893, 2010.
- [127] Amal Hichri, Mansour Hajji, Majdi Mansouri, Kamaleldin Abodayeh, Kais Bouzrara, Hazem Nounou, and Mohamed Nounou. Genetic-algorithm-based neural network for fault detection and diagnosis : Application to grid-connected photovoltaic systems. *Sustainability*, 14(17) :10518, 2022.
- [128] Jun Dong and Shang-xu Hu. The progress and prospects of neural network research. *Information and Control*, 26(5) :360–368, 1997.
- [129] Adel Mellit, Mohamed Benghanem, and Soteris A Kalogirou. Modeling and simulation of a stand-alone photovoltaic system using an adaptive artificial neural network : Proposition for a new sizing procedure. *Renewable energy*, 32(2) :285–313, 2007.
- [130] Emad A Ahmed and M El-Nouby Adam. Estimate of global solar radiation by using artificial neural network in qena, upper egypt. *Journal of Clean energy technologies*, 1(2) :148–150, 2013.
- [131] Tamer Khatib, Azah Mohamed, Kamarulzaman Sopian, M Mahmoud, et al. Assessment of artificial neural networks for hourly solar radiation prediction. *International journal of Photoenergy*, 2012, 2012.

- [132] Donald F Specht et al. A general regression neural network. *IEEE transactions on neural networks*, 2(6) :568–576, 1991.
- [133] Ramabadran Ramaprabha, BL Mathur, et al. A comprehensive review and analysis of solar photovoltaic array configurations under partial shaded conditions. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 2012.
- [134] Hans S Rauschenbach. Electrical output of shadowed solar arrays. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 18(8) :483–490, 1971.
- [135] Salowa Methnani. *Diagnostic, reconstruction et identification des défauts capteurs et actionneurs : application aux station d'épurations des eaux usées*. PhD thesis, Université de Toulon ; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2012.
- [136] Francesco Grimaccia, Sonia Leva, Marco Mussetta, EMANUELE GIOVANNI CARLO Ogliari, et al. Analysis and validation of ann pv power output forecasting at 24 hours ahead. In *Proceedings of the 11th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems 2014*, pages 1–6, 2014.
- [137] Alessandro Gandelli, Francesco Grimaccia, Sonia Leva, Marco Mussetta, and Emanuele Ogliari. Hybrid model analysis and validation for pv energy production forecasting. In *2014 international joint conference on neural networks (IJCNN)*, pages 1957–1962. IEEE, 2014.
- [138] Sabah Miqoi, Abdelghani El Ougli, and Belkassem Tidhaf. Adaptive fuzzy sliding mode based mppt controller for a photovoltaic water pumping system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 10(1) :414, 2019.
- [139] Mohammed Khorshed Alam, Faisal Khan, Jay Johnson, and Jack Flicker. A comprehensive review of catastrophic faults in pv arrays : types, detection, and mitigation techniques. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(3) :982–997, 2015.
- [140] Lian Lian Jiang and Douglas L Maskell. Automatic fault detection and diagnosis for photovoltaic systems using combined artificial neural network and analytical based methods. In *2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, pages 1–8. IEEE, 2015.
- [141] Tingting Pei and Xiaohong Hao. A fault detection method for photovoltaic systems based on voltage and current observation and evaluation. *Energies*, 12(9) :1712, 2019.
- [142] Emilio García, Neisser Ponluisa, Eduardo Quiles, Ranko Zotovic-Stanisic, and Santiago C Gutiérrez. Solar panels string predictive and parametric fault diagnosis using low-cost sensors. *Sensors*, 22(1) :332, 2022.

- [143] Adel Mellit and Soteris Kalogirou. Assessment of machine learning and ensemble methods for fault diagnosis of photovoltaic systems. *Renewable Energy*, 184 :1074–1090, 2022.
- [144] Kaan Yurtseven, Engin Karatepe, and Esref Deniz. Sensorless fault detection method for photovoltaic systems through mapping the inherent characteristics of pv plant site : Simple and practical. *Solar Energy*, 216 :96–110, 2021.
- [145] Ramón Fernando Colmenares-Quintero, Eyberth R Rojas-Martinez, Fernando Macho-Hernantes, Kim E Stansfield, and Juan Carlos Colmenares-Quintero. Methodology for automatic fault detection in photovoltaic arrays from artificial neural networks. *Cogent Engineering*, 8(1) :1981520, 2021.
- [146] Heidar Ali Raeisi and Seyed Mohammad Sadeghzadeh. A novel experimental and approach of diagnosis, partial shading, and fault detection for domestic purposes photovoltaic system using data exchange of adjacent panels. *International Journal of Photoenergy*, 2021 :1–19, 2021.
- [147] Lahcene Rouani, Mohamed Faouzi Harkat, Abdelmalek Kouadri, and Saad Mekhilef. Shading fault detection in a grid-connected pv system using vertices principal component analysis. *Renewable Energy*, 164 :1527–1539, 2021.
- [148] Namani Rakesh, Sanchari Banerjee, Senthilkumar Subramaniam, and Natarajan Babu. A simplified method for fault detection and identification of mismatch modules and strings in a grid-tied solar photovoltaic system. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 21(4) :20200001, 2020.
- [149] Jose Vieira, F Morgado Dias, and Alexandre Mota. Neuro-fuzzy systems : a survey. In *5th WSEAS NNA international conference on neural networks and applications, Udine, Italia*, pages 87–92, 2004.
- [150] Tatiana Kempowsky-Hamon. *Surveillance de procédés à base de méthodes de classification : conception d’un outil d’aide pour la détection et le diagnostic des défaillances*. PhD thesis, INSA de Toulouse, 2004.
- [151] Reham A Eltuhamy, Mohamed Rady, Eydhah Almatrafi, Haitham A Mahmoud, and Khaled H Ibrahim. Fault detection and classification of cigs thin-film pv modules using an adaptive neuro-fuzzy inference scheme. *Sensors*, 23(3) :1280, 2023.
- [152] Fethallah Tati, Hicham Talhaoui, Oualid Aissa, and Abdeldjalil Dahbi. Intelligent shading fault detection in a pv system with mppt control using neural network technique. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 13(4) :1147–1161, 2022.

# Annexe A

**Tableau .3:** Paramètres du module photovoltaïque

Paramètres	Valeurs	Unités
$P_{mp}$	200.143	W
$V_{mp}$	26.3	V
$V_{oc}$	32.9	V
$I_{mp}$	7.61	A
$I_{sc}$	8.21	A
$K_i$	0.00318	A/°C
$K_v$	-0.123	V/°C
$N_s$	54	