

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University  
Université Badji Mokhtar - Annaba  
Faculté de Technologie



Département de Génie Mécanique

جامعة باجي مختار - عنابة

كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة الميكانيكية

## Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

## Doctorat Troisième Cycle

Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Mécanique Avancée

Par :

**DERDAR ABDERRAHIM**

Thème :

## Etude de la commande d'un système photovoltaïque et diagnostic des défauts de fonctionnement

Thèse soutenue le 08-01-2023

Devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	BOUCHELAGHEM Abdelaziz Mahmoud	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	BENSIALI Nadia	MCA.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	ADJABI Mohamed	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Co-rapporteur
04	LAOUAR Lakhdar	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
05	OMEIRI Amar	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
06	DEKHANE Azzeddine	MCA.	ESTI Annaba	Examineur

## " دراسة التحكم في النظام الكهروضوئي وتشخيص أعطال التشغيل "

الملخص:

يتطرق هذا العمل لموضوع التحكم في الأنظمة الطاقوية مع وجود خلل، حيث يكمن الهدف منه في إستيعاب الأعطاب عن طريق تصميم نظام تحكم يأخذ بعين الإعتبار وجود الخلل الداخلي و الاختلال الوظيفي الناتج من الوسط الخارجي. تتميز الأنظمة الطاقوية بارتباط أدائها الوظيفي بمردودها الطاقوي، إذ إن المردود الكلي ناتج من جمع مردود العمليات الطاقوية الجزئية التي تحقق الهدف المشترك والمتمثل في إنتاج الطاقة في شكلها النهائي. كما أن مراقبة هذه العمليات واستيعاب الأعطاب تسمح في تحسين المردود الفردي لكل عملية والمساهمة في تحقيق الهدف الرئيسي المتمثل في تحسين الأداء الوظيفي الكلي.

في هذا البحث، تم بناء نموذج قائم على نظام الاستدلال الضبابي المتكيف (ANFIS) للتشغيل العادي للنظام الكهروضوئي واستخدامه كمرجع لاكتشاف العمليات غير الطبيعية، حيث تم الحصول على بيانات التدريب الخاصة بالنموذج القائم على ANFIS باستخدام شبكة الاستشعار اللاسلكية. تستخدم مراقبة النظام الكهروضوئي المتبقي الناتج من المقارنة بين حالة التشغيل الفعلية ومخرجات نموذج ANFIS لظروف التشغيل نفسها. كإستراتيجية مثالية تأخذ في الاعتبار أوضاع التشغيل المختلفة، تم تصميم آلية التبديل لتنفيذ تقنية استخراج الطاقة القصوى التقليدية في ظروف التشغيل العادية والتحول إلى خوارزمية metaheuristic للبحث عن أقصى نقطة طاقة عالمية عندما يكون الانحراف عن التشغيل العادي هو مُكتشَف. تظهر النتائج التجريبية الكفاءة العالية لنظام تحويل الطاقة الكهروضوئية باستخدام نهج المراقبة وتحسين الأداء المقترح في مختلف الظروف البيئية.

**كلمات مفتاحية:** أنظمة الطاقة الكهروضوئية، المراقبة، شبكة المستشعرات اللاسلكية، ميتاهيرستك، تحسين حشد الجسيمات، تتبع الحد الأقصى لنقطة الطاقة.

## **« Etude de la commande d'un système photovoltaïque et diagnostic des défauts de fonctionnement »**

### **Résumé :**

Ce travail traite le sujet de la commande des systèmes énergétique en présence de défauts. L'objectif est d'accommoder les défauts par la synthèse d'une loi de commande qui prend en charge l'existence des défauts internes et des dysfonctionnements causés par l'environnement externe. Les systèmes énergétiques sont caractérisés par la dépendance de leurs performances au rendement énergétique ; le rendement total est le résultat des rendements des processus énergétiques élémentaires réalisant l'objectif final étant produire une énergie propre et de bonne qualité sous différentes conditions et charges variables. La supervision de ces processus et la tolérance aux défauts permettent l'amélioration des rendements individuels et la contribution à la réalisation des objectifs en termes de performances globales.

Dans ce travail, un modèle basé sur le système d'inférence floue de réseau adaptatif (ANFIS) du fonctionnement normal du système photovoltaïque est construit et utilisé comme référence pour la détection de fonctionnement anormal, où les données d'apprentissage du modèle basé sur l'ANFIS ont été acquises à l'aide d'un Réseau de capteurs sans fil. Le suivi de l'installation photovoltaïque utilise le résiduel généré par la comparaison entre son état réel de fonctionnement et la sortie du modèle ANFIS pour les mêmes conditions de fonctionnement. En tant que stratégie optimale prenant en compte les différents modes de fonctionnement, un mécanisme de commutation est conçu pour exécuter une technique d'extraction de puissance maximale conventionnelle dans des conditions de fonctionnement normales et passe à un algorithme métaheuristique pour rechercher le point de puissance maximale globale lorsque l'écart par rapport au fonctionnement normal est détecté. Les résultats expérimentaux montrent l'efficacité supérieure du système de conversion d'énergie

photovoltaïque en utilisant l'approche proposée de surveillance et d'optimisation des performances dans diverses conditions environnementales.

**Mots clés :** Systèmes énergétiques photovoltaïques (PV), surveillance, réseau de capteurs sans fil (WSN), métaheuristiques, optimisation de l'essaim de particules (PSO), suivi du point de puissance maximale (MPPT).

## **« Study of the control of a photovoltaic system and diagnosis of operating faults »**

### **Abstract**

This work deals with the control of energy systems subject to faults. The objective is to accommodate faults by the design of a control law that considers the existence of internal faults and dysfunctions caused by external environment. Energy systems are characterized by the dependence of their performance on energy efficiency, the total efficiency is the result of the operation of elementary energy processes to verify the final objective, which is the production of energy in its final form. The supervision of these processes and tolerance to faults allow the improvement of individual performances and the achievement of global efficiency at a lower cost.

In this work, an Adaptive Network Fuzzy Inference System (ANFIS) based model of the normal operation of the photovoltaic system is constructed and used as a reference for abnormal operation detection, where the training data of the ANFIS-based model has been carried out using a Wireless Sensor Network. The monitoring of the photovoltaic system uses the residual generated from the comparison between its actual state of operation and the output of the ANFIS model for the same operating conditions. As an optimal strategy that considers the different operating modes, a switching mechanism is designed to execute a conventional maximum power extraction technique in normal operating conditions and switches to a metaheuristic algorithm to search for global maximum power point when deviation from the normal operation is detected. Experimental results show the higher efficiency of the photovoltaic energy conversion system using the proposed monitoring and performance optimization approach in various environmental conditions.

**Keywords:** Photovoltaic (PV) energy systems, Monitoring, Wireless Sensors Network (WSN), Metaheuristics, Particle Swarm Optimization (PSO), Maximum Power Point Tracking (MPPT).

# Dédicace :

Je dédie cette Thèse à tous les membres de ma famille :

**À mon très cher père, Mr DERDAR Loucif :** Les mots ne pourront jamais exprimer mon profond amour et ma gratitude envers vous. Je réalise tout ce que tu as enduré dans la vie pour nous, et combien j'ai de la chance de t'avoir pour père. Je vous promets que tous tes efforts et tes sacrifices ne seront pas vains.

**À ma très chère mère :** Mon profond amour et ma profonde affection vont à vous ma très chère mère, envers qui j'ai une grande dette.

**À ma très chère sœur.**

**À mes très chers frères.**

**À mes grands-parents.**

À la mémoire de mon défunt ami **BOUAKKAZ Mohamed Saleh** qui m'a tant aidé dans la réalisation du présent travail. Que dieu lui accorde la paix et l'ait en sa sainte miséricorde.

# Remerciements :

Merci à Allah avant tout.

Merci à mes parents et les membres de ma famille pour leur soutien et leur patience.

Je tiens à remercier très sincèrement Dr BENSIALI Nadia et le Pr ADJABI Mohamed pour leurs conseils et leur soutien dans mon travail de recherche.

Merci aux Pr. BOUCHELAGHEM Abdelaziz, Pr. LAOUAR Lakhdar, Pr. OMEIRI Amar et à Dr DEKHANE Azzeddine d'avoir accepté de faire partie du comité d'examen scientifique.

Merci à Nadir Boutassetta, Mohamed Saleh Bouakkaz, Issam Attoui et Nadir Fergani pour leur soutien et leur encouragement.

Remerciements aux membres d'Unité de Recherche en Matériaux Avancés (URMA/CRTI) - Annaba-Algérie.

# Liste des abréviations

FDI	Détection et Isolation des Défauts
ICPSO	Amélioration de l'optimisation de l'essaim de particules basée sur le courant
IncCond	Conductance incrémentale
I-V	Courant-Tension
MPP	Point de puissance maximal
MPPT	Suivi du point de puissance maximale
P-I	Puissance-courant
P&O	Perturbation & Observation
PSO	Optimisation de l'essaim de particules
PV	Photovoltaïque
P-V	Puissance-Tension
STC	Conditions d'essai standard
WSN	Réseau de capteurs sans fil
ANFIS	Système d'inférence neuro-flou adaptatif
RNA	Réseau de neurones artificiels

# Constantes physiques

Charge d'électron  $q = 1.60217662 \times 10^{-19} \text{ C}$

Constante de Boltzmann  $k = 1.38064852 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

Irradiation STC  $G = 1000 \text{ W/m}^2$

Température STC  $T = 25^\circ\text{C}$

# Liste des symboles

$G$	Rayonnement solaire incident	$W/m^2$
$I_0$	Courant de saturation cellule photovoltaïque	A
$I_{pv}$	Courant de sortie statique	A
$i_{pv}$	Courant de sortie dynamique de la matrice	A
$I_{sc}$	Courant de court-circuit	A
$R_s$	Résistance série des cellules photovoltaïques	$\Omega$
$R_p$	Résistance parallèle de cellule photovoltaïque	$\Omega$
$r_{pv}$	Résistance dynamique du générateur photovoltaïque	$\Omega$
$T$	Température des cellules photovoltaïques	$^{\circ}C$
$T_s$	Temps d'échantillonnage	s
$T_{sw}$	Période de commutation en signaux pwm	s
$V_{oc}$	Tension en circuit ouvert	V
$V_{pv}$	Tension de sortie statique	V
$v_{pv}$	Tension de sortie dynamique du réseau	V

# Liste des Figures

<b>Figure 1.1</b> Puissance des installations ajoutées par diverses sources d'énergie en 2018.....	6
<b>Figure 1.2</b> Évolution de la capacité des installations PV cumulatifs installés globaux 2000-2018.....	7
<b>Figure 1.3</b> Installation photovoltaïque autonome.....	7
<b>Figure 1.4</b> Répartition spectrale du rayonnement.....	9
<b>Figure 1.5</b> Schéma de bandes d'énergies des différents matériaux.....	10
<b>Figure 1.6</b> Structure d'une cellule PV.....	11
<b>Figure 1.7</b> Composants du générateur figure photovoltaïque.....	11
<b>Figure 1.8</b> Circuit électrique équivalent d'une cellule PV.....	12
<b>Figure 1.9</b> Circuit équivalent de générateur photovoltaïque.....	14
<b>Figure 1.10</b> Model de caractérisation de panneau PV ND-240QCJ en Simulink.....	15
<b>Figure 1.11</b> Effet de la température variable sur la courbe caractéristique I-V.....	16
<b>Figure 1.12</b> Effet de la température variable sur la courbe caractéristique P-V.....	16
<b>Figure 1.13</b> Effet de la température variable sur la courbe caractéristique P-I.....	17
<b>Figure 1.14</b> Effet de l'irradiation variable sur la courbe caractéristique I-V .....	19
<b>Figure 1.15</b> Effet de l'irradiation variable sur la courbe caractéristique P-V .....	19
<b>Figure 1.16</b> Effet de l'irradiation variable sur la courbe caractéristique P-I.....	20
<b>Figure 1.17</b> Configurations des défauts étudiés sur le générateur photovoltaïque:(a) Défaut Ligne-Terre, (b) Défaut Ligne-Ligne, (c) Défaut d'incompatibilité (Mismatch), (d) Défaut d'ombrage partiel.....	20
<b>Figure 1.18</b> Mise à la terre des générateurs photovoltaïques.....	21
<b>Figure 1.19</b> Effet des défauts sur le générateur photovoltaïque : :(a) Défaut Ligne-Terre, (b) Défaut Ligne-Ligne, (c) Défaut d'incompatibilité (Mismatch), (d) Défaut d'ombrage partiel.....	23
<b>Figure 2.1</b> Association d'un générateur photovoltaïque et convertisseur DC-DC boost.....	27
<b>Figure 2.2</b> Panneau photovoltaïque et convertisseur DC-DC boost : état " ON " .....	28
<b>Figure 2.3</b> Générateur PV et convertisseur DC-DC boost : état " OFF " .....	29

<b>Figure 2.4</b> Réponse de la commande aux fonctions de transfert de tension et de courant en boucle ouverte du générateur photovoltaïque à différents points de fonctionnement : (a) commande à la réponse de tension PV (b) commande à la réponse du courant PV.....	35
<b>Figure 2.5</b> Réponse des fonctions de transfert en boucle fermée basées sur la tension et le courant d'un générateur photovoltaïque LQR à différents points de fonctionnement : (a) suivi de la tension de référence, (b) suivi du courant de référence.....	37
<b>Figure 2.6</b> Convertisseur DC-DC boost avec MPPT.....	38
<b>Figure 2.7</b> Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	40
<b>Figure 2.8</b> Configurations des algorithmes MPPT dans Simulink pour l'algorithme MPPT (P&O).....	41
<b>Figure 2.9</b> Relation puissance-tension du générateur photovoltaïque.....	42
<b>Figure 2.10</b> Illustration du comportement erratique de P&O sous une irradiance en augmentation rapide.....	43
<b>Figure 2.11</b> Divergence entre l'escalade/P&O et le MPP.....	45
<b>Figure 2.12</b> Organigramme de l'algorithme de conductance incrémentielle.....	47
<b>Figure 2.13</b> Mise à jour de la position de l'essaim de particules.....	50
<b>Figure 3.1</b> Différents types de défauts agissant sur un système.....	57
<b>Figure 3.2</b> Différentes étapes de diagnostic.....	60
<b>Figure 3.3</b> Redondance physique et analytique.....	61
<b>Figure 3.4</b> Principe de la reconnaissance des formes.....	65
<b>Figure 3.5</b> Structure interne du modèle ANFIS.....	68
<b>Figure 3.6</b> L'entraînement du modèle ANFIS.....	70
<b>Figure 3.7</b> Principe des méthodes de diagnostic avec modèles.....	71
<b>Figure 3.8</b> Principe de l'approche par estimation des paramètres.....	72
<b>Figure 3.9</b> Principe général d'un estimateur de sortie.....	73
<b>Figure 3.10</b> Architecture d'un réseau de capteurs météorologiques sans fil.....	75
<b>Figure 4.1</b> Composants du WSN et de la station de base.....	80

<b>Figure 4.2</b> Configuration expérimentale à la station de base.....	80
<b>Figure 4.3</b> Générateur photovoltaïque et nœud de capteur dans des conditions de fonctionnement uniformes.....	81
<b>Figure 4.4</b> Caractérisation du générateur photovoltaïque dans des conditions normales de fonctionnement..	82
<b>Figure 4.5</b> Structures d'approximation de fonctions : a) Système d'inférence floue adaptative (ANFIS), b) Réseaux de neurones adaptatifs (RNA).....	83
<b>Figure 4.6</b> Échantillons de données d'entraînement utilisés pour la construction du modèle ANFIS : (a) température, (°C) (b) Rayonnement solaire (W/m <sup>2</sup> ), (c) Points de puissance maximale PMPP (W).....	84
<b>Figure 4.7</b> Sorties des modèles de prédiction : (a) Référence PMPP et sorties des modèles ANFIS et RNA, (b) Erreurs et seuils de détection des modèles ANFIS et RNA.....	85
<b>Figure 4.8</b> Organigramme de la surveillance du système PV et de l'optimisation des performances.....	86
<b>Figure 4.9</b> Générateur photovoltaïque avec WSN dans des conditions de fonctionnement à ombrage partiel	87
<b>Figure 4.10</b> Résultat expérimental du Générateur photovoltaïque avec WSN dans des conditions de fonctionnement à ombrage partiel.....	89
<b>Figure 4.11</b> Courbe caractéristique puissance-tension en présence d'ombrage partiel.....	89

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> Caractéristiques du panneau PV ND-240QCJ.....	14
<b>Tableau 1.2</b> Points de puissance maximale (MPP) du générateur photovoltaïque défectueux.....	25
<b>Tableau 2.1.</b> Résumé des algorithmes d'escalade et de P&O.....	44
<b>Tableau 2.2</b> Comparaison des différentes techniques .....	53
<b>Tableau 4.1.</b> Spécifications techniques de panneau photovoltaïque au STC.....	81
<b>Tableau 4.2.</b> Points de puissance maximum du système PV dans des conditions d'ombrage partiel : ( $G=739.73\text{W/m}^2$ , $T=32.71^\circ\text{C}$ , 11/02/2021,11:37, $P_{\text{ANFIS}}=86.28\text{W}$ ) .....	90
<b>Tableau 4.3.</b> Performance des techniques MPPT dans des conditions d'ombrage partiel.....	90

# Table des matières

Titre	Page
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1. Modélisation et simulation</b> .....	4
1.1. Introduction.....	5
1.2. Le développement du marché mondial de l'énergie photovoltaïque.....	5
1.3. Système photovoltaïque.....	7
1.3.1. Effet photovoltaïque.....	8
1.3.2. Rayonnement solaire.....	8
1.4. Cellule PV.....	9
1.5. Modélisation panneau photovoltaïque (cellule PV) .....	11
1.6. Effet des conditions environnementales sur le fonctionnement des générateurs photovoltaïques.....	15
1.6.1. Effet de la variation de température.....	17
1.6.2. Effet de la variation de l'irradiation (rayonnement) solaire.....	18
1.7. Effet des défauts sur le fonctionnement des générateurs photovoltaïques.....	21
1.7.1. Mise à la terre des générateurs photovoltaïques .....	21
1.7.2. L'effet du défaut ligne-terre.....	21
1.7.3. L'effet du défaut ligne-ligne.....	22
1.7.4. L'effet du défaut d'incompatibilité (Mismatch).....	23
1.7.5. L'effet de l'ombrage partiel.....	23
1.7.6. Résumé de l'analyse des pannes.....	24
1.8. Conclusion.....	25
<b>Chapitre 2. Commande et extraction de puissance maximale des systèmes PV</b> .....	27
2.1. Introduction.....	28
2.2. Modèle dynamique du convertisseur DC-DC boost.....	28
2.2.1. Modèle d'allure des états du convertisseur DC-DC boost.....	29
2.2.2. Fonctions de transfert du convertisseur DC-DC Boost.....	35
2.3. Conception d'un contrôleur pour le convertisseur DC-DC de type Boost.....	36
2.4. Suivi du point de puissance maximale.....	38
2.4.1. Tension en circuit ouvert fractionnaire et courant de court-circuit.....	39

2.4.2. La méthode d'escalade (hill-climbing) MPPT.....	40
2.4.3. La méthode perturbation et observation (P&O) MPPT.....	40
2.4.4. Conductance incrémentale (Inc Cond) MPPT.....	47
2.4.5. Les applications des méthodes de calcul souple pour MPPT.....	49
2.4.6. Algorithme d'optimisation d'essaim de particules.....	50
2.5. Les facteurs du choix de la technique MPP.....	51
2.5.1 Les capteurs .....	51
2.5.2 Mise en œuvre.....	52
2.5.3 Capacité à détecter plusieurs maximums locaux.....	52
2.5.4 Applications.....	52
2.5.5 Vitesse de convergence et l'efficacité de la technique .....	53
2.5.6 Le Coût.....	53
2.6. Comparaison des coûts des différentes techniques.....	53
2.7. Conclusion .....	54
<b>Chapitre 3. Diagnostic et surveillance des systèmes.....</b>	<b>55</b>
3.1.Introduction .....	56
3.2.La Définition et l'objectif du diagnostic .....	56
3.2.1. Définition .....	56
3.2.2. Le but du diagnostic .....	57
3.2.3. Concepts et terminologies .....	57
3.3.Different types de défauts .....	58
3.4.Considérations générales sur les systèmes de diagnostic .....	59
3.4.1. Les critères d'évaluations d'un système de diagnostic .....	59
3.5.Les étapes de diagnostic .....	60
3.5.1. La détection .....	60
3.5.2. La localisation .....	60
3.5.3. L'identification .....	61
3.6.Principe de diagnostic de défaut .....	61
3.6.1. Redondance physique (matérielle) .....	61
3.6.2. Redondance analytique .....	61
3.7.Génération et évaluation de résidus .....	62
3.7.1. Génération de résidus .....	62

3.7.2. Évaluation des résidus .....	6
3.8. Classification des méthodes de diagnostic .....	63
3.8.1. Approche signal .....	63
3.8.2. Méthode sans modèles .....	64
3.8.2.1. La reconnaissance des formes (RDF) .....	65
3.8.2.2. Les réseaux de neurones artificiels (RNA) .....	66
3.8.2.3. Un système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS) .....	68
3.8.3. Méthode à base de modèles .....	72
3.8.3.1. Espace de parité .....	72
3.8.3.2. Estimation paramétrique .....	73
3.8.3.3. Estimation d'état (observateur) .....	74
3.9. Objectifs de la supervision .....	75
3.10. La surveillance .....	75
3.11. La surveillance via un réseau de capteurs sans fil .....	76
3.11.1. Réseau de capteurs sans fil pour la météo .....	76
3.11.1.1. Conception du système .....	76
3.11.1.2. Traitement et transmission des données .....	77
3.12. Conclusion .....	78
<b>Chapitre 4. Essais expérimentaux, résultats, et discussions</b> .....	79
4.1. Installation expérimentale .....	80
4.2. Caractérisation et construction du modèle ANFIS .....	82
4.3. Optimisation des performances basées sur les métaheuristiques .....	86
4.4. Conclusion .....	92
<b>Conclusion générale</b> .....	93
<b>Bibliographie</b> .....	95

### **Introduction générale :**

La surveillance en ligne est d'une grande importance pour une gestion efficace de l'énergie dans les systèmes de production d'énergie renouvelable [1]. L'énergie solaire et en particulier les systèmes d'énergie photovoltaïque fonctionnent généralement dans des zones isolées qui sont soumises à des conditions environnementales qui affectent leur efficacité [2] et entraînent des pertes de puissance [3,4]. Des équipements coûteux sont couramment utilisés à des fins de surveillance, notamment des enregistreurs de données, des équipements de détection électronique, de contrôle et de stockage de données [5]. De tels équipements utilisent également en général des logiciels propriétaires, un faible nombre de connexions de capteurs et une maintenance limitée par le fabricant. Compte tenu du nombre croissant d'unités de production d'énergie décentralisées, la solution possible à ce problème est le développement de modules de surveillance microcontrôlés et distribués, ces derniers sont à faible coût, et se caractérisent notamment par une flexibilité d'installation et de maintenance. Récemment, de nouvelles générations de capteurs sont apparues, qui intègrent dans un même dispositif le transducteur, le module de communication et l'alimentation. Ces capteurs peuvent avoir une capacité supplémentaire d'exécution de protocoles et d'algorithmes de chiffrement. De plus, ils sont généralement dotés d'une certaine capacité de calcul et, plus intéressant encore, sont capables de s'interconnecter sans fil avec d'autres nœuds similaires [6]. L'objectif de la création d'une telle structure est de créer un environnement dans lequel les informations de n'importe lequel des éléments connectés peuvent être partagées à tout moment [7]. Ce déploiement a donné naissance à une nouvelle génération de réseaux de capteurs sans fil (WSN) qui comprennent un certain nombre de capteurs individuels qui échangent des informations entre eux et/ou avec une station de base dans laquelle l'utilisateur peut interagir avec l'ensemble du réseau [8]. Le développement de modules de surveillance qui utilisent le WSN peut également avoir la capacité de fonctionner au sein de l'infrastructure Internet (intégré en tant

qu'élément dans la structure Internet des objets (IoT)) [9] et donc utiliser le concept de Cloud Computing [10].

Les WSN sont utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour plusieurs raisons, notamment leur compatibilité pour un déploiement distribué [11], l'énergie solaire, leur faible coût et leur facilité de maintenance [12].

De plus, une maintenance prédictive continue peut être effectuée, ce qui est efficace pour la détection précoce des défauts naissants et la résolution rapide des dysfonctionnements. Enfin, les pertes d'énergie sont évitées grâce à la surveillance WSN, où les données des capteurs sont utilisées pour contrôler efficacement le système PV grâce à un algorithme d'optimisation afin d'obtenir les meilleures performances dans différentes conditions de fonctionnement. Dans [13], une brève revue des plates-formes de développement IoT a été réalisée en plus d'un système d'acquisition de données (DAS) équipé d'un tableau de bord proposé et de mesures statistiques qui ont été utilisées pour surveiller un système photovoltaïque connecté au réseau soumis à une ombre. La carte Raspberry Pi (Rpi) a été utilisée afin de mettre en œuvre la technique de surveillance proposée avec un convertisseur analogique-numérique (ADC) externe supplémentaire pour l'acquisition des mesures. Cependant, la carte Arduino DUE n'a pas fait l'objet d'étude qui dispose d'un ADC interne et d'un processeur performant. De plus, les travaux de recherche ne prennent pas en considération l'étape MPPT (Maximum Power Point Tracking) [14] qui a fait l'objet de développements récents [15] et ne prend en compte que la détection de défauts et les conditions anormales de fonctionnement. Un module ESP 32 a été utilisé dans [16] pour le système de surveillance basé sur l'IoT d'un système PV commercial connecté au réseau avec un module MPPT intégré. L'étude ne tient pas compte de la surveillance des conditions de fonctionnement anormales et évalue uniquement les données environnementales. Une méthodologie de surveillance et de contrôle sans fil a été proposée dans [17] afin de gérer un système photovoltaïque connecté au réseau sans tenir

compte des défauts et des conditions d'ombrage partiel. De plus, l'étude a utilisé le MPPT Perturb and Observe (P&O) conventionnel basé sur la tension. Dans ce travail, un système de surveillance basé sur WSN est proposé afin de surveiller les données environnementales en temps réel en utilisant une architecture multi-capteurs à faible coût avec des capteurs de tension, de courant, d'irradiance et de température. Un modèle de système d'inférence neuro-floue adaptatif (ANFIS) [18,19] est construit à l'aide de données environnementales et d'une référence de point de puissance maximale dans des conditions de fonctionnement normales afin d'évaluer les signaux résiduels en temps réel utilisés pour la détection des défauts. La gestion des conditions de fonctionnement anormales telles que l'ombrage partiel a été prise en compte en passant à un algorithme métaheuristique Particle Swarm Optimization (PSO) MPPT [20]. Une évaluation expérimentale du système de surveillance proposé est réalisée à l'aide d'un microcontrôleur Arduino DUE, d'un émetteur-récepteur sans fil basé sur nRF24l01 et d'un générateur photovoltaïque fonctionnant dans des conditions d'ombrage normal et partiel.

Cette thèse est organisée comme suit :

**Chapitre 1 :** Le modèle du générateur PV est développé sur la base du modèle de la cellule PV. L'effet des conditions environnementales telles que la température et l'irradiation est analysé. Les effets des défauts de câblage, de l'inadéquation et de l'ombrage partiel sur les courbes caractéristiques du générateur PV sont indiqués.

**Chapitre 2 :** Le contrôle du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque à l'aide d'un convertisseur DC-DC boost est détaillé. La conception du contrôleur est basée sur le modèle d'espace d'état du modèle à petit signal du convertisseur DC-DC. Les algorithmes de suivi du point de puissance maximale sont appliqués pour guider le générateur photovoltaïque vers son point de puissance maximale. Différentes approches MPPT sont présentées.

**Chapitre 3 :** Ce chapitre permettra d'apporter quelques éléments de diagnostic des entraînements électriques. Ce diagnostic consiste à connaître, à évaluer, à prévoir, à mesurer et à maîtriser les défaillances des systèmes. Les différents concepts terminologiques et méthodologiques associés sont également présentés dans ce chapitre.

**Chapitre 4 :** Les résultats expérimentaux issus de la mise en œuvre de l'approche proposée sur le microcontrôleur l'arduino DUE pour contrôler un prototype développé d'un convertisseur DC-DC boost qui est utilisé pour ajuster le point de fonctionnement d'un simulateur de générateur photovoltaïque. Les résultats de l'application de la stratégie lorsque les courbes caractéristiques sont soumises à un ombrage partiel, démontrent le gain de puissance considérable par rapport aux algorithmes classiques.

Des conclusions et des perspectives sont données dans cette thèse.

## Chapitre 01 :

### Modélisation et simulation

#### Sommaire :

Chapitre 1. Modélisation et simulation .....	4
1.1. Introduction .....	5
1.2. Le développement du marché mondial de l'énergie photovoltaïque .....	5
1.3. Système photovoltaïque .....	7
1.3.1. Effet photovoltaïque .....	8
1.3.2. Rayonnement solaire .....	8
1.4. Cellule PV .....	9
1.5. Modélisation de panneau photovoltaïque (cellule PV) .....	11
1.6. Effet des conditions environnementales sur le fonctionnement des générateurs photovoltaïques .....	15
1.6.1. Effet de la variation de température .....	17
1.6.2. Effet de la variation de l'irradiation (rayonnement) solaire .....	18
1.7. Effet des défauts sur le fonctionnement des générateurs photovoltaïques .....	21
1.7.1. Mise à la terre des générateurs photovoltaïques .....	21
1.7.2. L'effet du défaut ligne-terre .....	21
1.7.3. L'effet du défaut ligne-ligne .....	22
1.7.4. L'effet du défaut d'incompatibilité (Mismatch) .....	23
1.7.5. L'effet de l'ombrage partiel .....	23
1.7.6. Résumé de l'analyse des pannes .....	24
1.8. Conclusion .....	25

## **1.1 Introduction :**

Le processus de génération d'énergie basé sur l'effet photovoltaïque (PV) convertit la lumière solaire incidente en énergie électrique. Les cellules PV sont l'élément de conversion d'énergie le plus fondamental qui constitue la pierre angulaire d'un panneau PV.

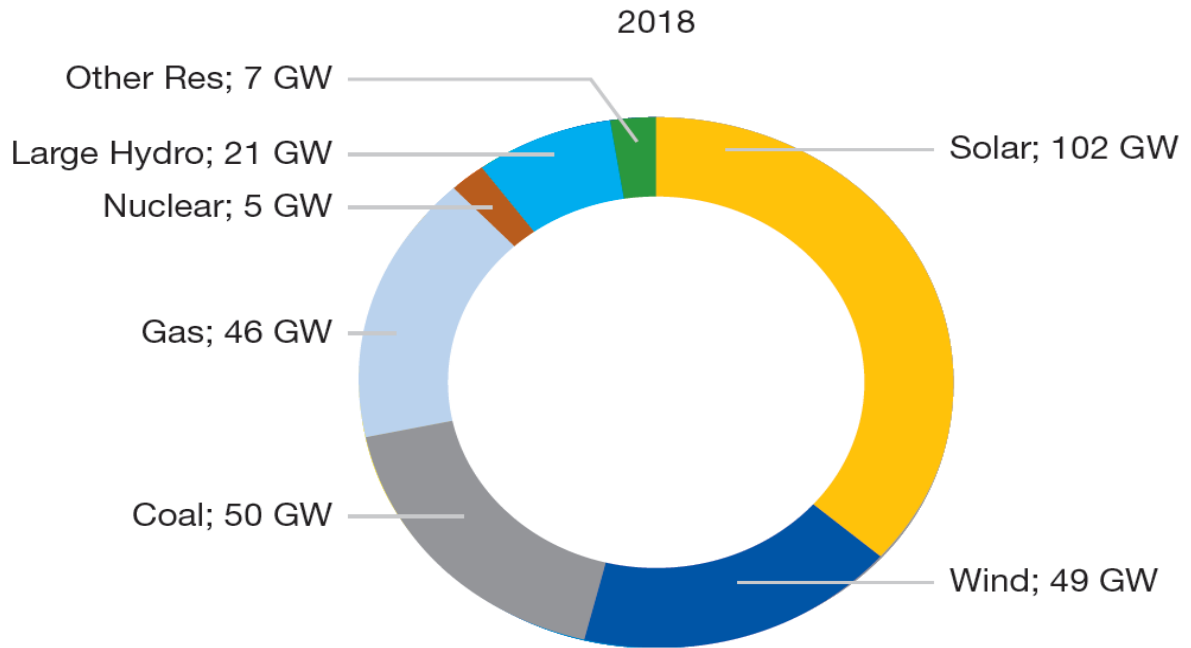
L'énergie solaire (photovoltaïque) est une source d'énergie durable qui peut être une des meilleures sources d'énergie alternative aux combustibles fossiles. Pour cela, il est envisagé par les scientifiques et les chercheurs dans le but de répondre aux futurs besoins énergétiques. À présent, la technologie de fabrication des panneaux solaires est énormément développée en matière du coût et de qualité de fabrication [21, 22]. Ces avantages ont suscité l'intérêt de la communauté scientifique ainsi que de la classe politique pour lancer et financer un grand nombre de travaux de recherche dans divers domaines afin d'améliorer ce domaine et de créer de nouvelles richesses. Cette évolution s'illustre par la réduction du coût de production des modules PV ainsi que par les travaux de recherche qui ont permis de promouvoir l'électronique de puissance. Donc, la mise en place d'installations photovoltaïques, notamment celles de petites puissances raccordées au réseau basse tension, est progressivement apparue. [21].

La modélisation et la caractérisation appropriée de la cellule PV sont primordiales pour bien comprendre le processus de conversion et l'évaluation du comportement des systèmes PV dans diverses conditions de fonctionnement. Des simulations de l'effet des défauts des composants physiques par exemple les résistances et de l'influence de l'environnement sur les performances de fonctionnement peuvent alors être réalisées.

## **1.2 Le développement du marché mondial du PV**

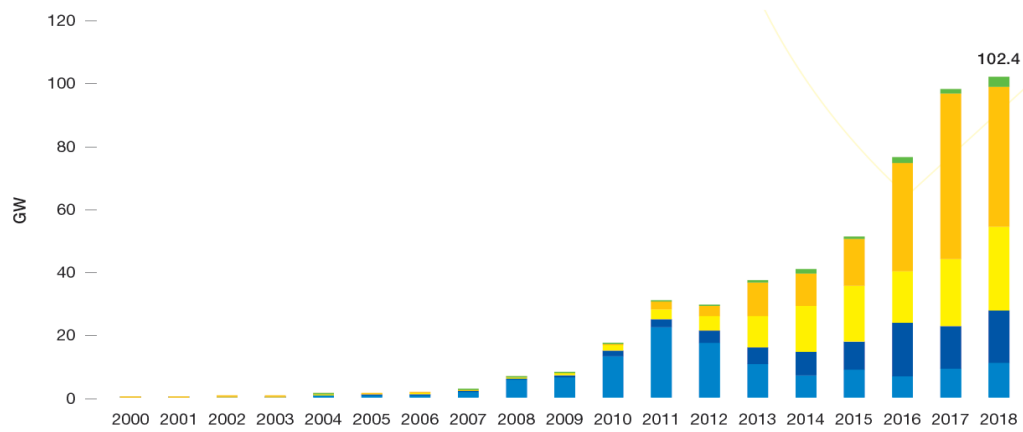
En 2018, le terrain de l'énergie PV a fait de grands progrès sur le plan de la capacité des installations dans le monde, en comparant à d'autres types d'énergie (Figure 1.1) [23]. Avec cela, sa part totale d'énergie renouvelable ne représentait que 33% de l'énergie mondiale totale en 2017, il reste donc encore un long chemin à parcourir avant qu'elle ne soit considérée comme une véritable solution de remplacement aux énergies fossiles [24].

La technologie photovoltaïque a connu un taux d'amélioration historique, également en période économique difficile, ce qui en fait l'une des principales sources de production d'électricité au monde. Le marché mondial du solaire photovoltaïque est passé de 5 MW en 1982 à un niveau record de 102,4 GW en 2018. [23]



**Figure. 1.1** : Puissance des installations ajoutées par diverses sources d'énergie en 2018 [23].

En 2018, la Chine reste le leader mondial des installations PV cumulatives (34%), suivie des États-Unis (12%), du Japon (11%) et de l'Allemagne (9%). De nombreux marchés en dehors de l'Europe n'ont consacré qu'une petite part de leur potentiel à ce type d'installation. Cependant, l'expérience dans ce domaine n'en est qu'à ses balbutiements pour la plupart des pays en voie d'avancement, à savoir les pays africains, l'Amérique latine, le Moyen-Orient et l'Asie du Sud-est [23].

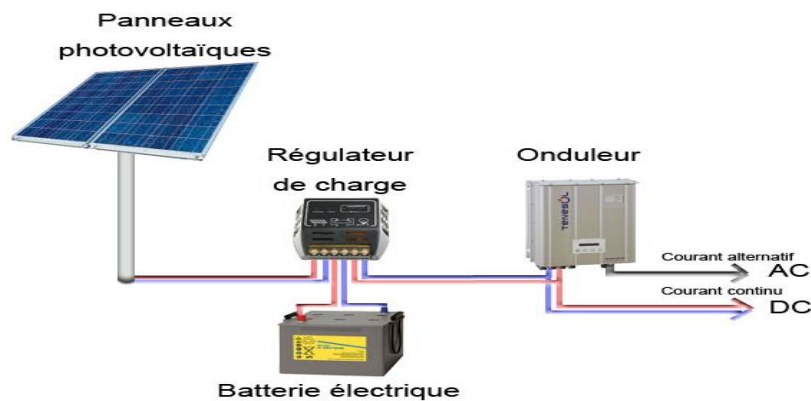


**Figure. 1.2 :** Développement de la capacité des installations photovoltaïques cumulatives installées au cours des années 2000-2018 (MW) [23].

### 1.3 Système photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements connectés pour exploiter l'énergie PV afin de satisfaire les besoins en surcharge. En fonction de la puissance désirée, les panneaux peuvent être assemblés pour constituer un "champ PV". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement [25].

Un régulateur est alors très important pour éviter les problèmes de décharges ou de surcharges profondes de la batterie. Pour quelques nombres d'applications, le courant continu produit par le générateur photovoltaïque est converti via d'un onduleur photovoltaïque en courant alternatif.



**Figure. 1.3 :** Installation photovoltaïque autonome [49].

Donc le Générateur PV c'est un organe qui transforme l'énergie PV en électricité. Selon la puissance crête désirée, ce générateur PV est composé d'un certain nombre de modules assemblés entre eux en parallèle ou en série.

### **1.3.1 L'impact photovoltaïque :**

L'impact PV où la conversion photovoltaïque est la conversion directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement ou irradiation). Ce phénomène se produit lorsqu'un objet semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, ses atomes interagissant avec les photons qui composent la lumière. Pour cela, les électrons des couches d'électrons supérieures (appelés électrons de couche de valence) ont tendance à s'arrêter. Dans le photovoltaïque, les électrons « non torsadés » créent une faible tension continue [26].

L'impact PV constitue la transformation directe de l'énergie de l'irradiation solaire en énergie électrique par des cellules photovoltaïques. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont interconnectées pour produire un module PV ou un générateur PV.

### **1.3.2 Irradiation solaire :**

Le soleil est une étoile âgée de 4,5 milliards d'années et se trouve à environ 150 millions kilomètres de la Terre. L'énergie du soleil provient de réactions thermonucléaires qui se produisent constamment dans son noyau [27].

Le soleil représente le centre du système solaire auquel appartient la planète Terre. Cette étoile, qui nous apporte chaleur et lumière, est une source abondante d'énergie disponible, renouvelable et propre. Le soleil produit une puissance d'environ  $1.7 \cdot 10^{23}$  kW. Une partie de cette énergie alimente la terre, elle est de l'ordre de  $8.5 \cdot 10^{13}$  kW ; uniquement 70% (environ  $6 \cdot 10^{13}$  kW) de cette énergie pénètre l'atmosphère.

L'Irradiation solaire est une onde électromagnétique émise depuis la surface du Soleil qui résulte des réactions de fusion de l'hydrogène en hélium qui se produisent au cœur du Soleil. Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. La longueur d'onde du rayonnement varie de  $0.22\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$ . La Figure. 1.4 représente la variation de la

répartition spectrale de ce rayonnement [21, 27,28]. Le rayonnement solaire tombant au bord de l'atmosphère est de  $342 \text{ W.m}^{-2}$ . La surface terrestre n'absorbe que  $168 \text{ W.m}^{-2}$ , ce rayonnement est composé de 60 % de rayonnement direct et 40 % sous forme de rayonnement diffus [23].

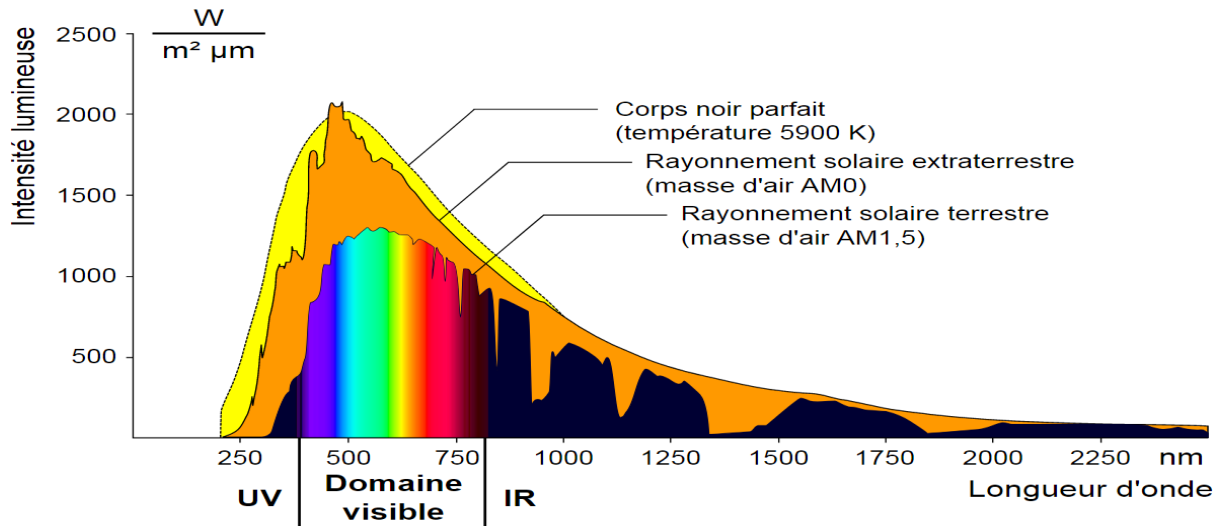
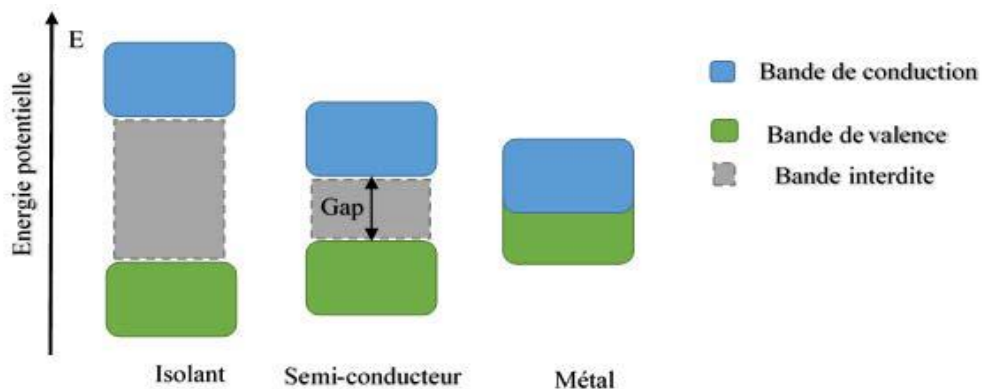


Figure. 1.4 : Répartition spectrale du rayonnement [29].

## 1.4 Cellule PV :

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un semi-conducteur caractérisé par une bande de conduction et une bande de valence. Comme démontré dans la figure. 1.5, ces deux bandes sont séparées par une bande appelée, bande interdite. Comme tous les matériaux, les semi-conducteurs ont leur propre niveau de Fermi ( $E_f$ ) qui correspond au potentiel électrochimique ou à l'action des électrons dans le solide [30,31]. Le niveau de Fermi se situe entre la bande de conduction et la bande de valence. Pour qu'un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction, il a besoin de l'énergie d'un photon de lumière. Cette énergie doit être supérieure à l'énergie dite de transmission de gap qui lui permet de traverser la bande interdite pour atteindre la bande de conduction [30,31]. La cellule photovoltaïque n'absorbe que 25%, au mieux, de la lumière solaire. En effet, la lumière solaire est constituée de différents rayonnements, et il est essentiel que le rayonnement ait une énergie suffisamment élevée pour arracher des électrons à la cellule photovoltaïque. Cependant, si nous choisissons un matériau

avec une bande interdite plus petite afin de pouvoir utiliser plus de photons de lumière solaire, nous obtiendrons une tension plus petite. L'écart optimal (le gap) aura une valeur de 1,4 eV. De plus, les électrons doivent circuler d'un côté à l'autre de la cellule à travers un circuit externe. Il est donc possible de recouvrir la face inférieure de la cellule d'un métal très bon conducteur qui ne doit pas non plus être soumis à des phénomènes de corrosion ; mais si on couvre le dessus, on bloquera les photons. La solution trouvée est de mettre une grille métallique sur le dessus de la cellule. Aussi, le silicium est très réflécheur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Son rôle est de capter le maximum de rayons de soleil. Une couche de verre de quelques millimètres protège la cellule. Le noyau de la cellule est composé de deux couches : la couche semi-conductrice est dopée négativement (N) et l'autre couche est dopée positivement (P). Ces deux couches forment la jonction P-N (Figure. 1.6) qui crée un champ électrique. Ce champ électrique crée un courant optique (photo-courant) en séparant des paires d'électrons et de trous qui tendent à recombinaison l'énergie thermique. Le champ électrique réduit l'effet négatif de recombinaison (recombinaison) des paires de trous et d'électrons, mais il ne peut pas l'éliminer, car il est dû à la qualité du matériau utilisé qui est symbolisé par le facteur d'idéalisation  $n$ . Ainsi, le facteur d'idéalisation représente la fréquence de recombinaison du matériau [30,31]. L'énergie produite par une cellule photovoltaïque reste trop faible. Pour atteindre une puissance suffisante, les cellules photovoltaïques sont interconnectées et forment le module PV.



**Figure. 1.5** : Schéma de bandes d'énergie des divers matériaux [31].

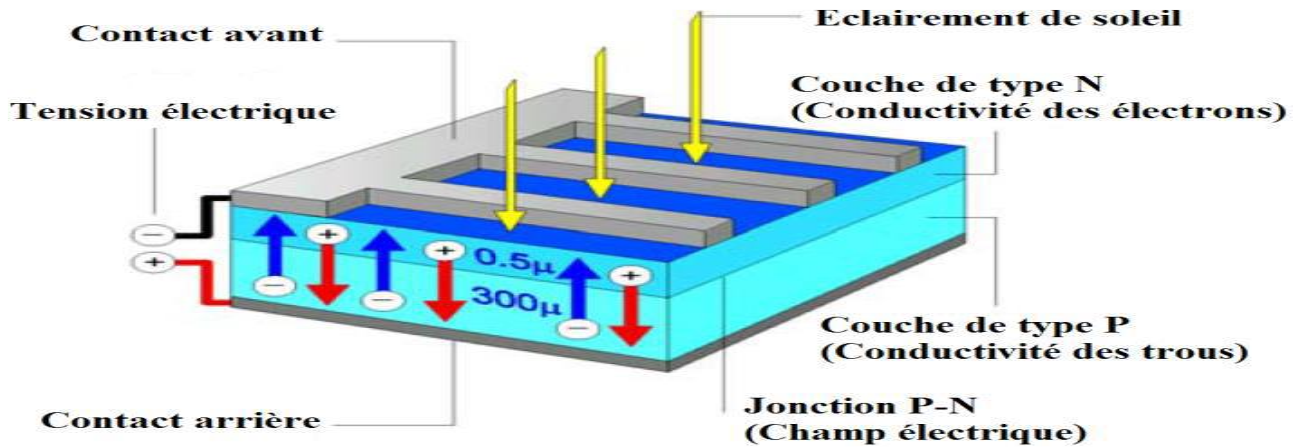


Figure. 1.6 : Structure d'une cellule photovoltaïque [32].

### 1.5 Modélisation de panneau photovoltaïque (cellule PV) :

La combinaison de cellules photovoltaïques en série compose des panneaux PV (modules) voir figure 1.7. Lorsqu'ils sont connectés en série et équipés de diodes de dérivation et de blocage, les panneaux PV forment une chaîne PV. Un générateur PV est composé d'une combinaison de chaînes PV parallèles. Le courant de retour est empêché par l'utilisation de diodes de blocage. Les diodes de dérivation sont activées dans le cas de modules PV défectueux pour permettre à la chaîne de produire de l'énergie et pour éviter les points chauds qui peuvent endommager de façon permanente les panneaux PV.

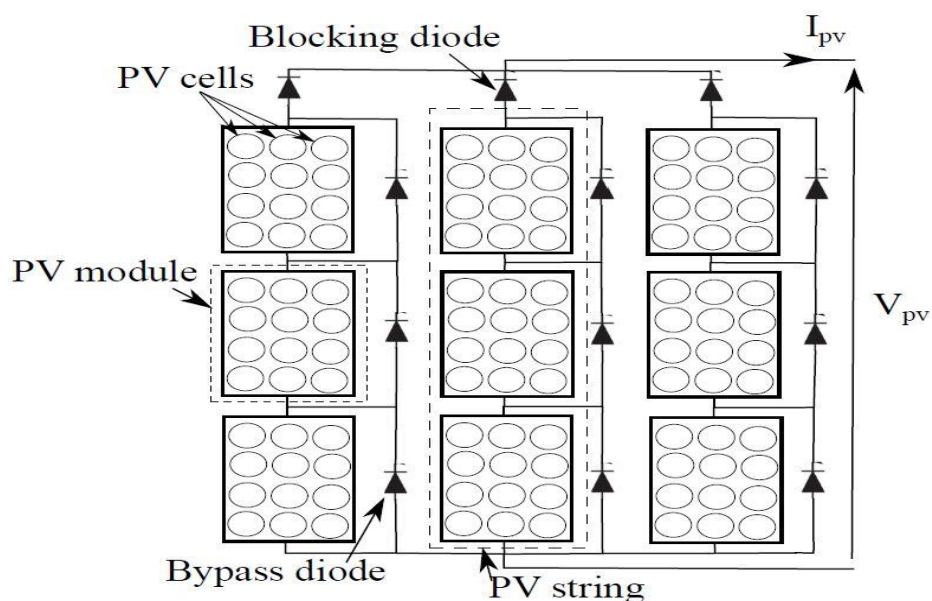
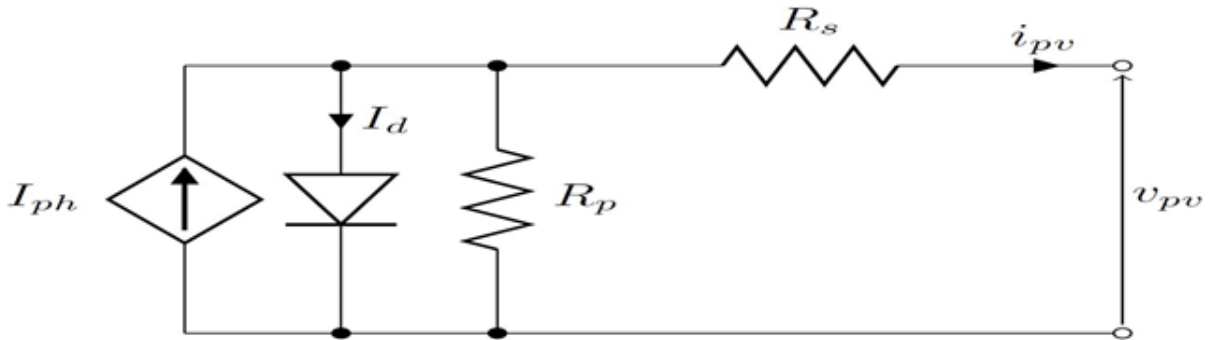


Figure. 1.7 : Composants du générateur photovoltaïque [20].

Des modèles basés sur des circuits électriques ont été proposés dans la littérature pour imiter la courbe expérimentale courant-tension ( $I$ - $V$ ) de la cellule PV [33,34]. Le modèle pratique (aussi appelé modèle à une diode) est connu pour avoir un bon compromis entre complexité et précision [35]. Le circuit équivalent à une diode d'une cellule PV tel que représenté sur la figure 1.8 est constitué d'une source de courant contrôlée  $I_{ph}$ , une diode traversée par un courant  $I_d$  avec des résistances internes série et shunt respectivement  $R_s$  et  $R_p$ .



**Figure 1.8 :** Circuit électrique équivalent d'une cellule PV.

La source de courant contrôlée dépend du niveau de rayonnement solaire et de la température de la surface de la cellule comme suit :

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (1.1)$$

Où  $I_{ph,n}$  est le courant nominal généré (donné aux conditions nominales :  $T = 25^\circ\text{C}$  et  $G = 1000\text{W/m}^2$ ),  $K_I$  est le coefficient courant de court-circuit/température,  $\Delta T = T - T_n$  ( $T$  et  $T_n$  sont les températures actuelle et nominale),  $G$  et  $G_n$  sont les irradiances solaires actuelle et nominale.

Le courant dans la diode  $I_d$  est donné par :

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{a V_t}\right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

$I_0$  le courant de saturation de la diode est donné comme suit :

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \Delta T}{a V_t}\right) - 1} \quad (1.3)$$

Où  $I_{sc,n}$  est le courant nominal de court-circuit,  $V_{oc,n}$  est la tension nominale en circuit ouvert.  $K_V$  est le coefficient tension/température en circuit ouvert,  $a$  est une constante de diode,  $V_t$  est la tension thermique du réseau :  $V_t = N_s k T / q$ , avec  $N_s$  cellules connectées en série.  $k$  est la constante de Boltzmann et  $q$  est la charge de l'électron.  $R_s$  est la résistance série qui dépend du matériau utilisé pour construire la cellule PV, son effet est plus fort dans la région de fonctionnement de la source de tension.  $R_p$  est la résistance parallèle, son effet est plus fort dans la région de fonctionnement de la source de courant.

Pour un générateur photovoltaïque avec des panneaux parallèles  $N_{pp}$  et des panneaux série  $N_{ss}$ , le circuit équivalent est donné à la figure 1.9 et son courant de sortie suit :

$$i_{pv} = I_{ph} N_{pp} - I_0 N_{pp} \left[ \exp \left( \frac{v_{pv} + R_s \left( \frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right) i_{pv}}{a V_t N_{ss}} \right) - 1 \right] - \frac{v_{pv} + R_s \left( \frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right) i_{pv}}{R_p \left( \frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (1.4)$$

La conductance dynamique  $g_{pv}$  est calculée en prenant la dérivée de l'éq. (2.4) par rapport à la tension comme suit [36], [37]:

$$g_{pv} = \frac{\partial i_{pv}}{\partial v_{pv}} = \frac{I_0 N_{pp}}{a \cdot V_t \cdot N_{ss}} \cdot \exp \left( \frac{v_{pv} + R_s \cdot \frac{N_{ss}}{N_{pp}} \cdot i_{pv}}{a V_t N_{ss}} \right) - \frac{1}{R_p \cdot \frac{N_{ss}}{N_{pp}}} \quad (1.5)$$

La résistance dynamique est alors obtenue à partir de l'éq (2.5)

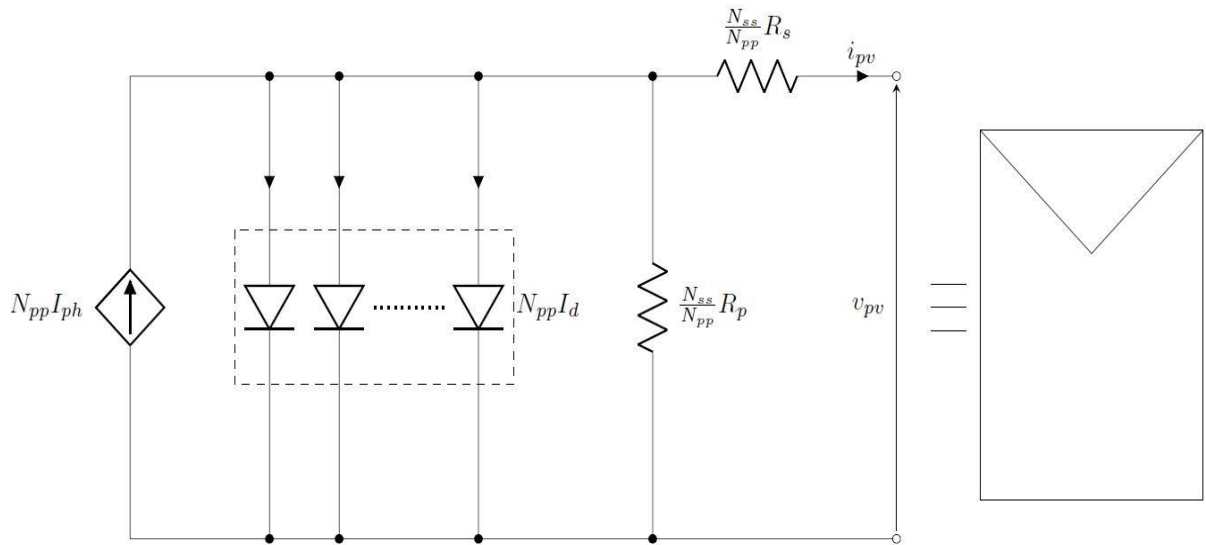
$$r_{pv} = - \frac{1}{g_{pv}} \quad (1.6)$$

Le modèle linéarisé autour du point de fonctionnement ( $I_{pv}, V_{pv}$ ) est alors donné comme suit [38]

:

$$i_{pv} = G_{pv} \cdot v_{pv} + I_{pv} - G_{pv} \cdot V_{pv} \quad (1.7)$$

Où  $G_{pv} = g_{pv}(V_{pv}, I_{pv})$ , est la conductance statique.



**Figure 1.9 :** Circuit équivalent de générateur photovoltaïque

Les paramètres donnés dans le tableau 1.1 sont utilisés dans les sections suivantes pour la simulation du générateur PV.

**Tableau 1.1 :** Caractéristiques du panneau PV ND-240QCJ [2]

Paramètre	La Valeur
Irradiance et température au STC	1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C
Puissance maximum (Pmax)	240 W
tension en Pmax (Vmp)	29.3 V
courant en Pmax (Imp)	8.19 A
Tension en circuit ouvert (Voc)	37.50 A
Courant en circuit ouvert (Isc)	8.75 A
Nombre de cellules	60 en série
Dimension Module	1640x994x46 mm
Tolérance Puissance	+5%/-0%

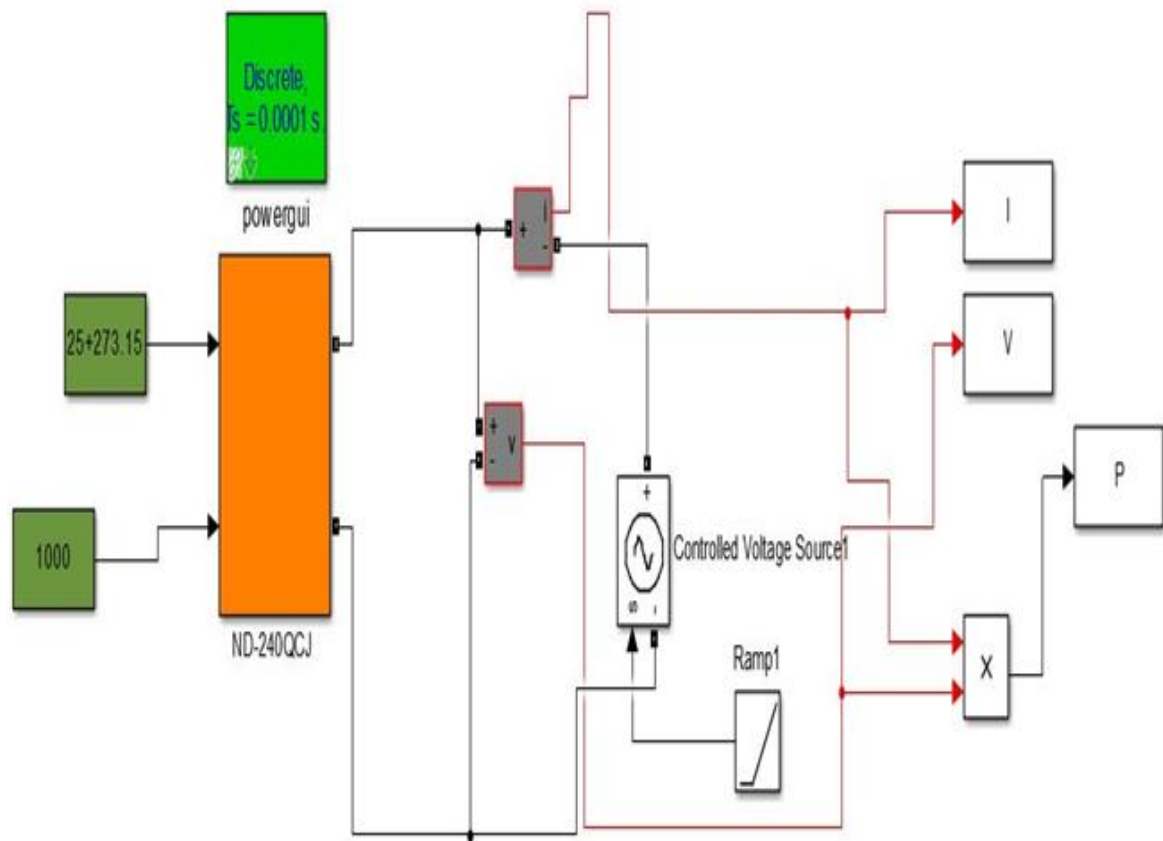


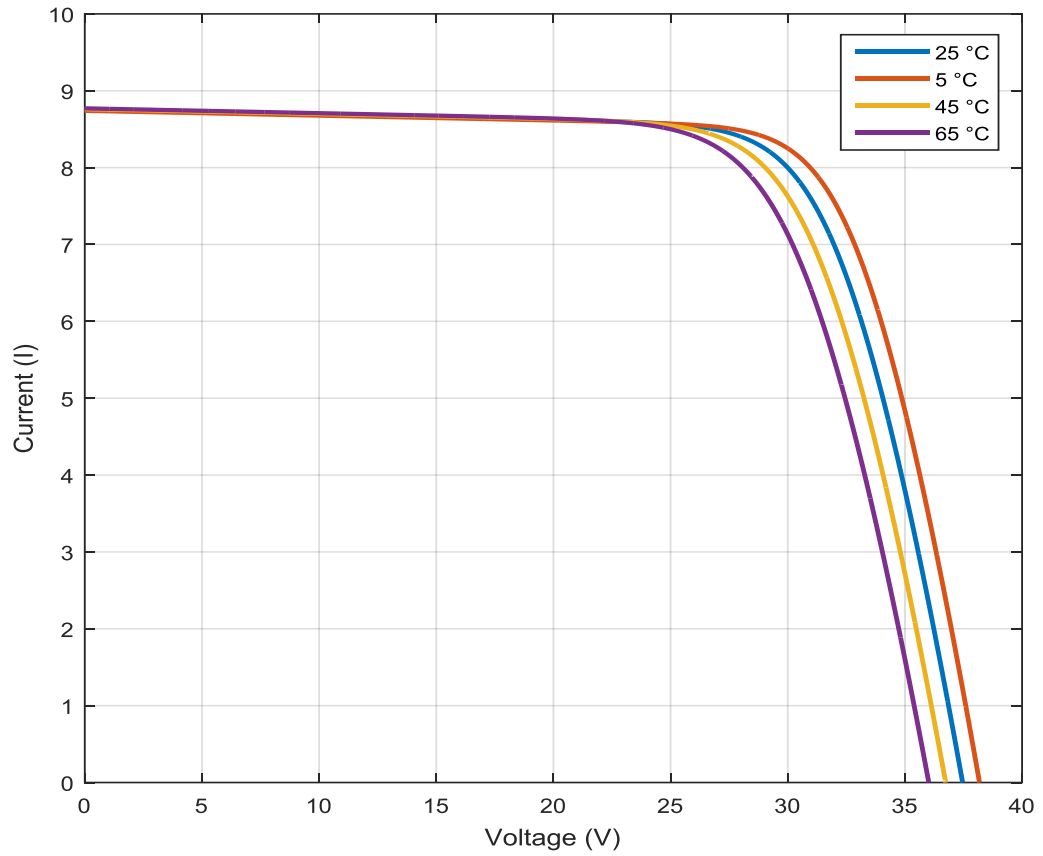
Figure 1.10 : Model de caractérisation de panneau PV ND-240QCJ en Simulink [2]

## 1.6 Effet des conditions environnementales sur le fonctionnement des générateurs photovoltaïques :

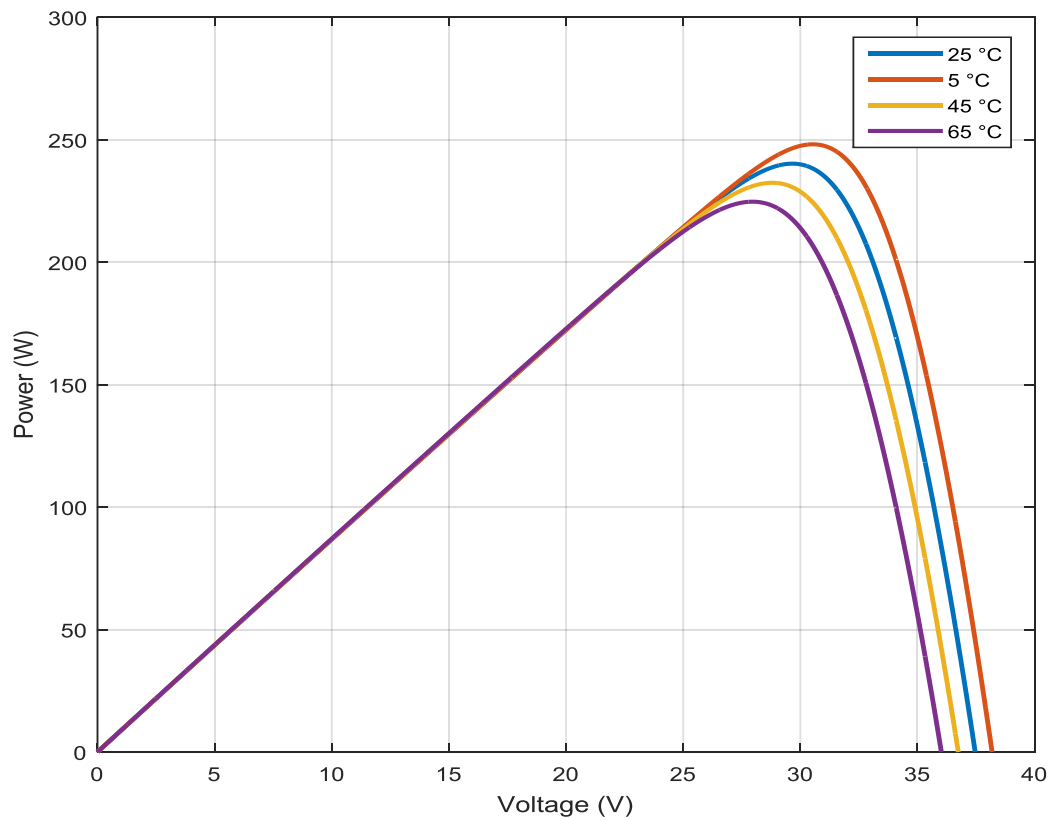
Les caractéristiques électriques des générateurs photovoltaïques sont directement affectées par les variations des conditions climatiques. L'effet est constaté dans les points de fonctionnement particuliers suivants :

- Le point de fonctionnement en circuit ouvert, caractérisé par un courant de sortie nul  $I_{pv} = 0$  et une tension de sortie en circuit ouvert  $V_{pv} = V_{oc}$ .
- Le point de fonctionnement en court-circuit, caractérisé par une tension de sortie nulle  $V_{pv}=0$  et un courant de court-circuit  $I_{pv} = I_{sc}$ .
- Le Maximum Power Point (MPP), caractérisé par un courant de sortie  $I_{pv} = I_{MPP}$ , une

tension de sortie  $V_{pv} = V_{MPP}$ , et une puissance maximale extremum  $\frac{\partial p_{pv}}{\partial v_{pv}} = \frac{\partial p_{pv}}{\partial i_{pv}} = 0$  .



**Figure 1.11 :** Effet de la température variable sur la courbe caractéristique I-V [2]



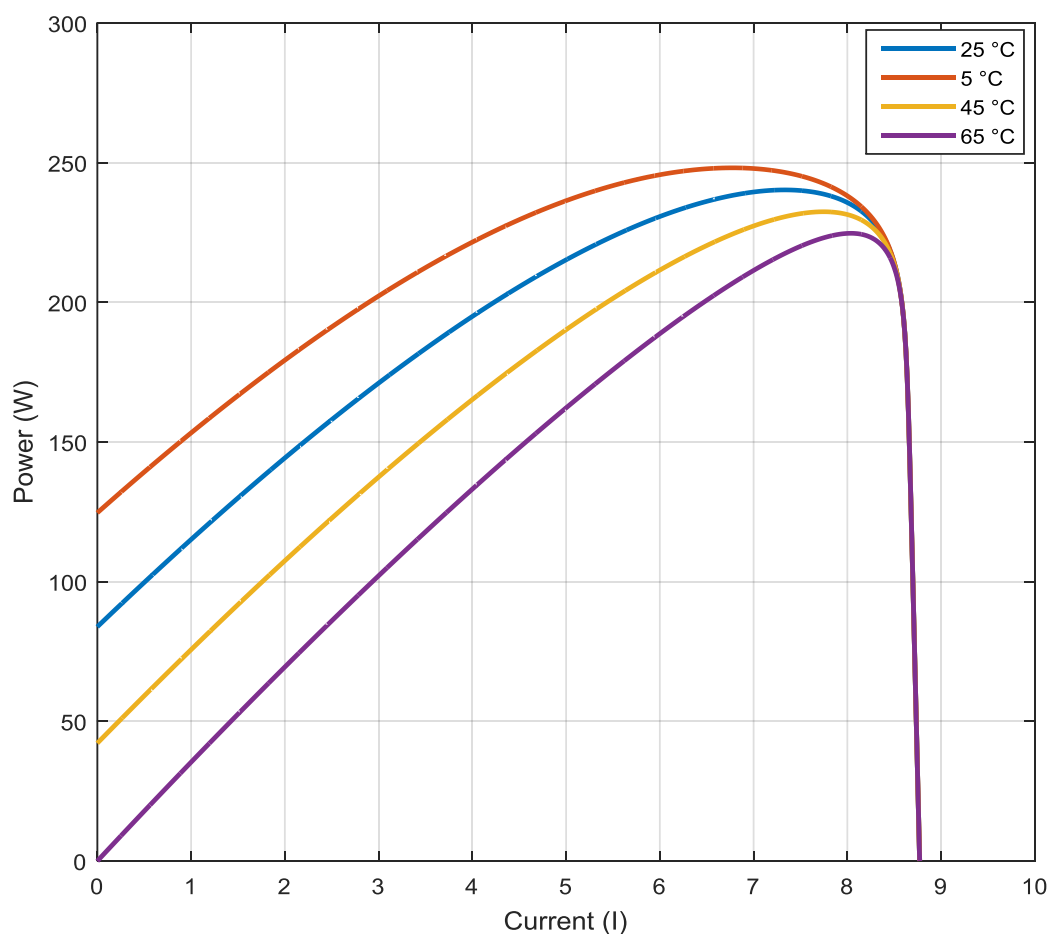
**Figure 1.12 :** Effet de la température variable sur la courbe caractéristique P-V [2].

### 1.6.1 Effet de la variation de la température :

En plus de l'irradiation solaire incidente, la température ambiante ( $T_a$ ) affecte les courbes caractéristiques des générateurs photovoltaïques avec une grande variation de la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  par rapport à une variation mineure du courant de court-circuit  $I_{sc}$  en plus du décalage du MPP. La température de la cellule est liée à la température ambiante avec l'équation suivante :

$$T = T_a + \frac{NOCT-25}{1000} \cdot G \quad (1.8)$$

Où  $NOCT$  est la température nominale de fonctionnement de la cellule dans des conditions spécifiques ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_a = 25 \text{ °C}$ , vent =  $1 \text{ m/s}$ , bornes à circuit ouvert avec montage ouvert à l'arrière). L'effet de la variation de température sur la courbe caractéristique  $I-V$  est donné sur la figure 1.11. L'augmentation de la température se traduit par une tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  plus faible et un courant de court-circuit  $I_{sc}$  légèrement plus élevé.



**Figure 1.13 :** Effet de la température variable sur la courbe caractéristique P-I [2].

Les courbes P-V et P-I des figures 1.12 et 1.13 montrent respectivement l'effet de la variation de température sur les performances du générateur PV. L'augmentation des valeurs de température entraîne une diminution du MPP (diminution des performances) en plus des variations de tension en circuit ouvert courant de court-circuit respectivement. On remarque que le point de fonctionnement en tension du MPP ( $V_{MPP}$ ) change avec la variation de température (figure 1.12), alors que le point de fonctionnement actuel du MPP  $I_{MPP}$  a un changement négligeable. On peut aussi affecter une résistance dynamique près de la région MPP par l'augmentation de la température.

### **1.6.2 Effet de la variation de l'irradiation (rayonnement) solaire :**

La variation du rayonnement solaire est considérée comme le principal facteur perturbateur des systèmes de conversion d'énergie PV, car elle a une dynamique plus rapide par rapport à la température et une plus grande influence sur la puissance de sortie PV. Elle affecte principalement le courant de court-circuit  $I_{sc}$  du générateur PV, comme indiqué sur la figure 1.14 avec un effet mineur sur la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ . Le point de fonctionnement en tension du MPP est pratiquement constant avec le changement de rayonnement, comme illustré à la figure 1.15, tandis que le point de fonctionnement actuel du MPP, comme indiqué à la figure 1.16, change avec la variation de rayonnement. La résistance dynamique reste pratiquement inchangée.

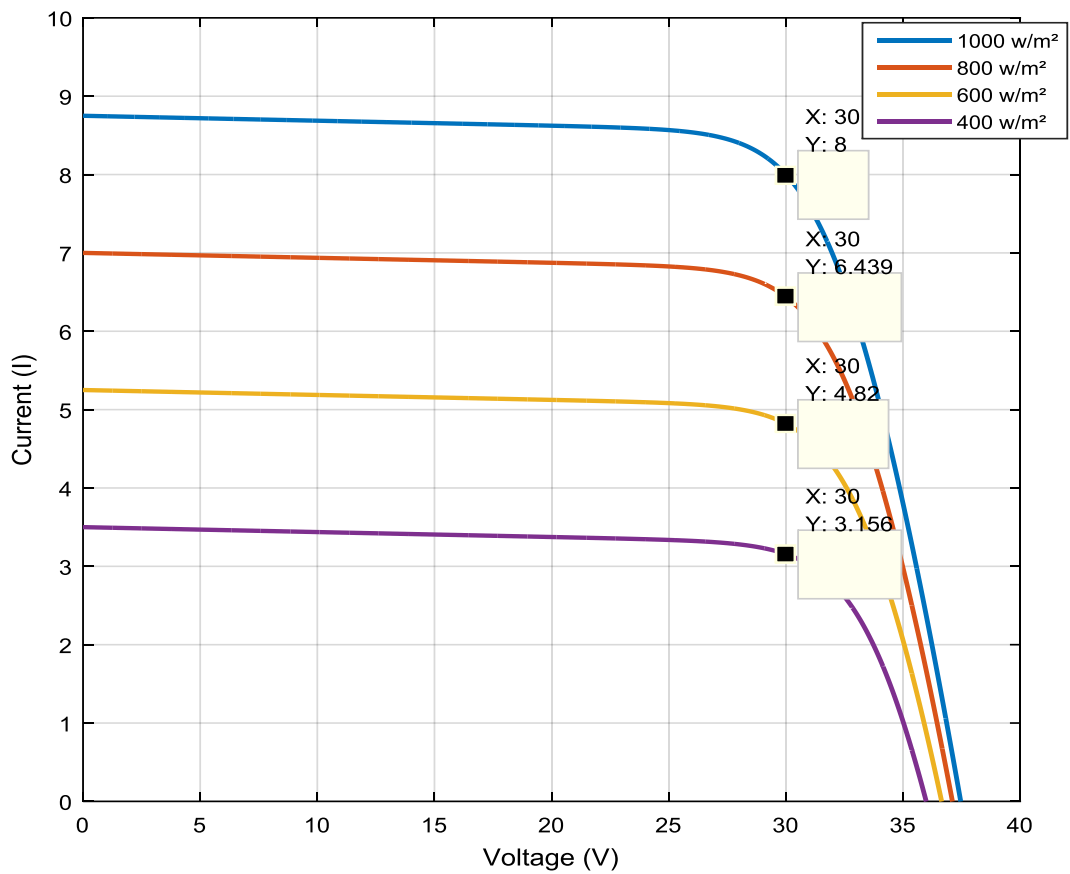


Figure 1.14 : Effet de l'irradiation variable sur la courbe caractéristique I-V [2].

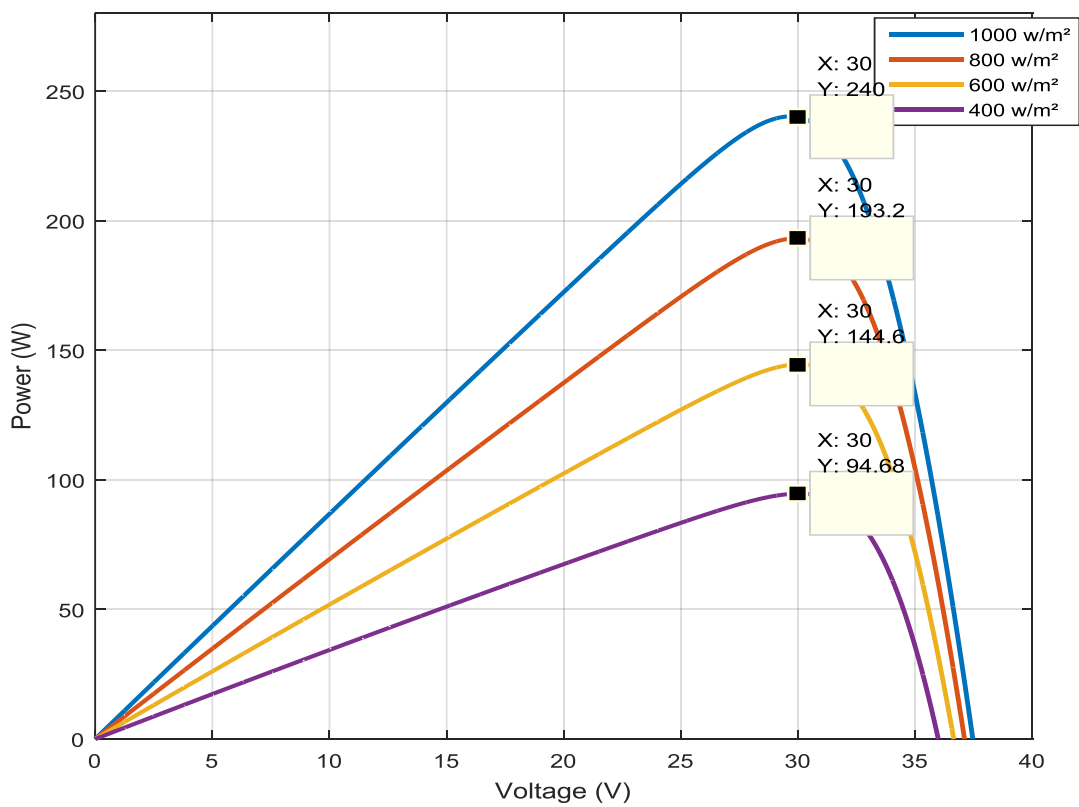
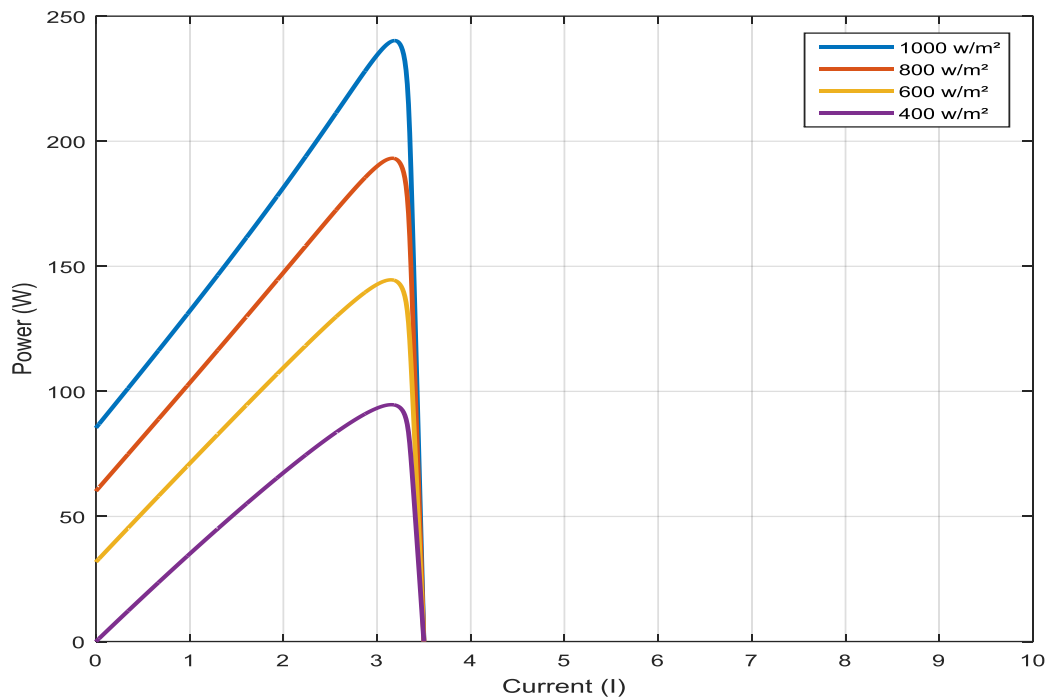
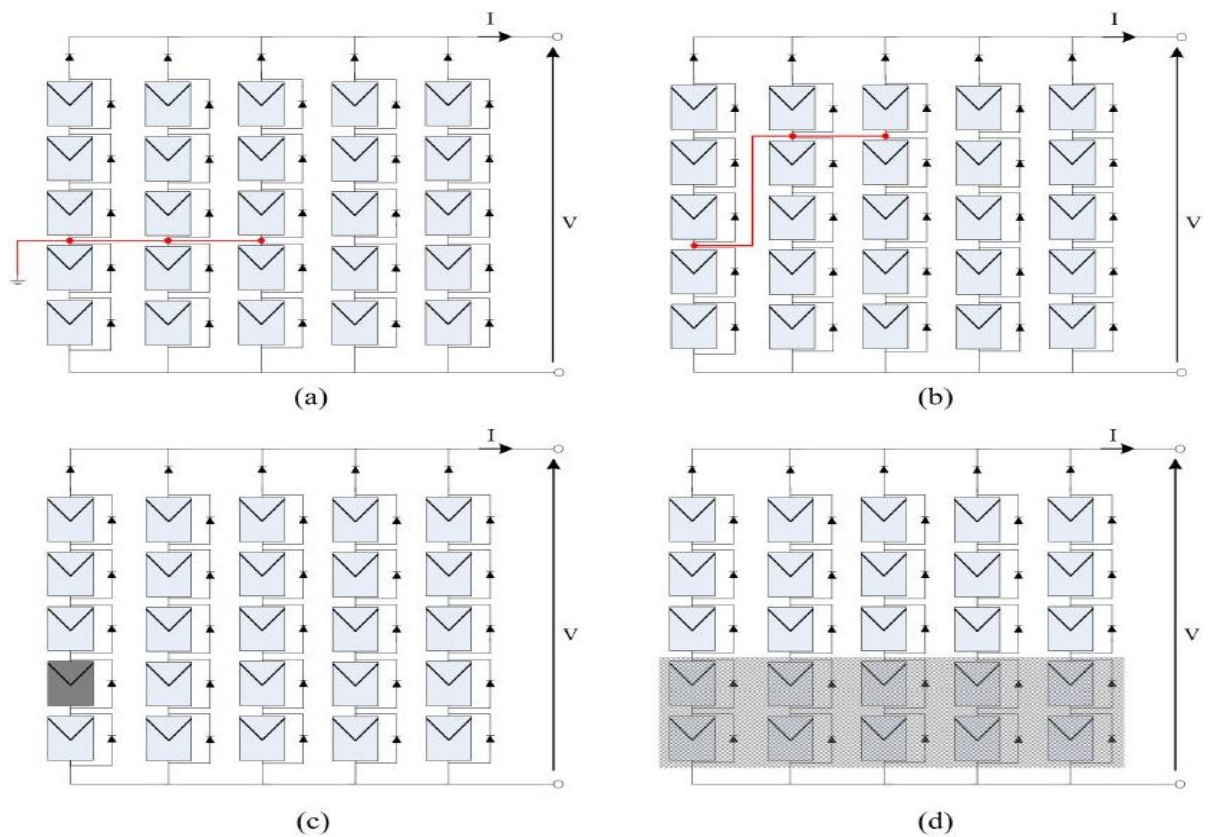


Figure 1.15 : Effet d'une irradiation variable sur la courbe caractéristique P-V [2]



**Figure 1.16 :** Effet d'une irradiation variable sur la courbe caractéristique P-I [2]



**Figure 1.17:** Configurations des défauts étudiés sur le générateur photovoltaïque:(a) Défaut Ligne-Terre, (b) Défaut Ligne-Ligne, (c) Défaut d'incompatibilité (Mismatch), (d) Défaut d'ombrage partiel [20]

## 1.7 Effet des défauts sur le fonctionnement des générateurs photovoltaïques :

### 1.7.1 Mise à la terre des générateurs photovoltaïques :

Les installations photovoltaïques sont composées de différentes parties construites à l'aide de matériaux électriquement conducteurs (tels que les cadres de modules PV, les supports de montage...), qui sont susceptibles d'être en contact avec des conducteurs isolés transportant du courant lorsque l'isolation est perdue en raison de la fusion ou d'autres causes [39]. La mise à la terre de ces pièces conductrices est nécessaire pour garantir un fonctionnement sûr en cas d'apparition de tels défauts qui exposent des personnes ou des animaux vivants à un contact direct avec une tension dangereuse. La figure 1.18 montre la mise à la terre des cadres de modules PV.

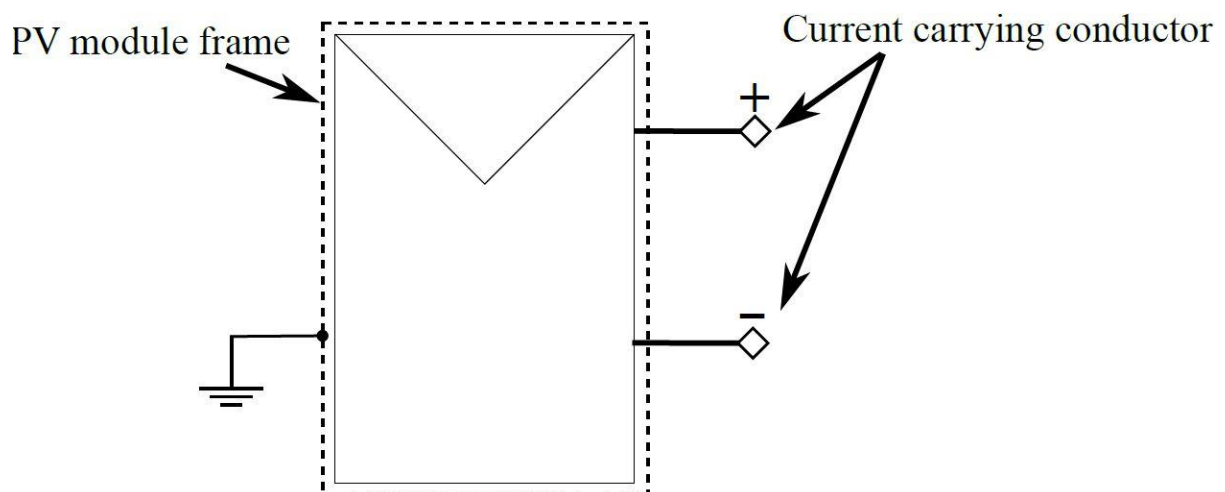


Figure 1.18 : Mise à la terre des générateurs photovoltaïques.

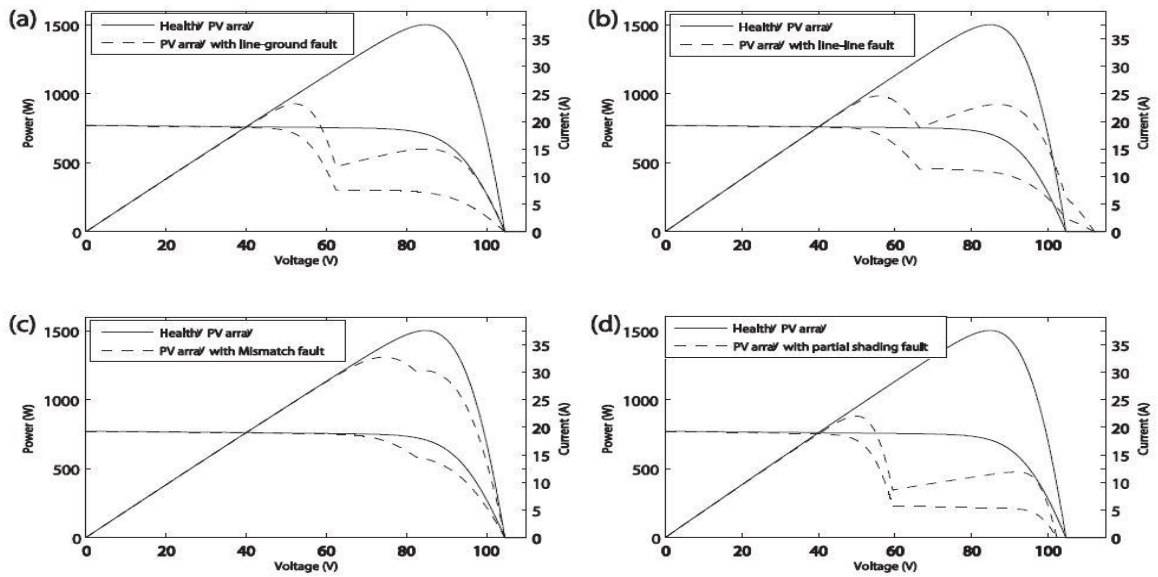
### 1.7.2 L'effet du défaut ligne-terre :

Un défaut ligne-terre est un court-circuit entre un conducteur porteur de courant (ligne sous tension) et la terre. Lorsque nous introduisons ce défaut sur le générateur photovoltaïque comme illustré à la figure 1.17 (a), la tension donnée par les trois chaînes du générateur PV chute et provoque un défaut de non-concordance (chaînes avec des tensions de sortie différentes) qui affecte la courbe puissance-tension de l'ensemble du générateur PV. Le courant de retour vers la chaîne en défaut est empêché en plaçant des diodes de blocage à la sortie de

chaque chaîne. Les courbes caractéristiques puissance-tension (P-V) et courant-tension (I-V) du générateur photovoltaïque sous défaut ligne-terre sont données figure 1.19 (a). Le défaut ligne-terre introduit de multiples points de puissance maximale sur la courbe P-V à différents points de fonctionnement. On remarque que la forme de la courbe P-V change avec la configuration du défaut, le choix effectué dans notre cas est justifié par la présence du plus bas MPP au même point de fonctionnement (tension) que le MPP de la baie saine. Dans une telle situation, les algorithmes basés sur l'escalade sont piégés dans un extremum local et ne parviennent pas à suivre le MPP global.

### **1.7.3 L'effet du défaut ligne-ligne :**

Un défaut ligne-ligne est un court-circuit entre deux conducteurs porteurs de courant (deux lignes) dans le générateur photovoltaïque avec des potentiels différents. Les défauts ligne-ligne peuvent être causés par la défaillance de l'isolation dans les conducteurs porteurs de courant, les défauts de court-circuit dans la boîte de jonction PV en raison de dommages mécaniques, d'infiltration d'eau et de corrosion, ou de doubles défauts à la terre en même temps dans le générateur PV. Nous introduisons un défaut ligne-ligne sur le même générateur PV sain précédent ; un court-circuit entre les câbles de trois chaînes, comme illustré à la figure 1.17 (b). La courbe P-V du générateur photovoltaïque défaillant de la figure 1.19 (b) est caractérisée par la présence de plusieurs points de puissance. De plus, la tension en circuit ouvert du générateur photovoltaïque a changé en raison du défaut ligne-ligne. Cet effet peut s'expliquer par la modification de la configuration du circuit du générateur photovoltaïque causée par le défaut ligne-ligne, comme illustré à la figure 1.17 (b).



**Figure 1.19** : Effet des défauts sur le générateur photovoltaïque: :(a) Défaut Ligne-Terre, (b) Défaut Ligne-Ligne, (c) Défaut d'incompatibilité (Mismatch), (d) Défaut d'ombrage partiel [20].

#### 1.7.4 L'effet du défaut d'incompatibilité (Mismatch) :

Une inadéquation se produit lorsque les cellules PV connectées en série produisent un courant inférieur à celui des cellules restantes, ce qui fait que les cellules défectueuses dissipent de l'énergie. Un tel effet crée un point chaud dans le module PV et peut causer des dommages irréversibles [40]. Une cellule désadaptée est caractérisée par une résistance série accrue et une résistance shunt diminuée [41]. Le module incompatible affecte la puissance de sortie du générateur photovoltaïque et entraîne une dégradation générale des performances. L'effet de ce type de défaut sur le générateur PV est présenté à la figure 1.19 (c) où nous avons introduit un module incompatible dans la première chaîne du générateur PV, comme illustré à la figure 1.17 (c). La résistance série de la cellule désadaptée est choisie pour être ( $R_s^{mis} = 100 \cdot R_s$ ). La résistance shunt (parallèle) du module inadapté est choisi comme suit  $R_p^{mis} = R_p/100$ .

#### 1.7.5 L'effet de l'ombrage partiel :

L'ombrage partiel est considéré comme un défaut courant dans les générateurs photovoltaïques qui est causé par l'encrassement de la surface avant des cellules photovoltaïques, la neige, les feuilles, l'ombrage des bâtiments adjacents, etc. La cellule

ombragée génère moins de courant que les autres cellules en série dans la même chaîne, le courant imposé par la chaîne provoque une surchauffe de la cellule que l'on appelle communément "HotSpot". Pour éviter les points chauds causés par un ombrage partiel sur un PV panneau, des diodes de dérivation sont ajoutées aux chaînes permettant au courant de les traverser en contournant le module ombragé. L'effet négatif de ces composants de protection est l'introduction de plusieurs points de puissance dans la courbe P-V, comme illustré à la figure 1.19 (d). La partie inférieure du générateur photovoltaïque a été partiellement ombragée en exposant les panneaux à moins de rayonnement solaire ( $400\text{W}/\text{m}^2$ ) alors que les panneaux principaux reçoivent une irradiation complète ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) (voir figure 1.17 (d)).

### **1.7.6 Résumé de l'analyse des pannes :**

Dans le tableau 1.2, un résumé de l'effet des défauts étudiés sur la puissance de sortie du générateur photovoltaïque est donné. Plusieurs points de puissance sont présents dans les courbes P-V des générateurs photovoltaïques défaillants. Les résultats obtenus montrent l'ampleur de la perte de puissance causée par la présence de défauts sur l'installation PV. Le pire des cas est le défaut d'ombrage partiel où l'on note une perte de puissance de 41,32 % pour le MPP global (MPP1), et de 68,29 % pour le MPP local (MPP2). La conception d'un algorithme MPPT efficace devrait augmenter l'efficacité des générateurs photovoltaïques dans de telles conditions.

**Tableau 1.2 :** Points de puissance maximale (MPP) du générateur photovoltaïque défectueux [20].

PV Array	Local MPP1		Local MPP2		Global MPP	
	$I_{pv}$ (A)	$P_{pv}$ (W)	$I_{pv}$ (A)	$P_{pv}$ (W)	$I_{pv}$ (A)	$P_{pv}$ (W)
<b>PV Sain</b>	-	-	-	-	17.73	1504
<b>Défaut ligne-terre</b>	17.78	928.46	7.09	601.61	17.78	928.46
<b>Défaut ligne-ligne</b>	17.70	986.40	10.66	925.20	17.70	986.40
<b>Défaut Mismatch</b>	17.59	1310	14.43	1213.7	17.59	1310
<b>Défaut d'ombrage partiel</b>	17.71	882.50	5.20	476.83	17.71	882.5

### 1.8 Conclusion :

Les panneaux photovoltaïques sont caractérisés par une courbe caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire. La forme de la courbe I-V (et par conséquent P-V) change avec les conditions environnementales telles que la température variable et l'irradiation, et également en présence de conditions de fonctionnement anormales telles que l'ombrage partiel et les courts-circuits dans les câblages. Ces changements entraînent le décalage du point de fonctionnement de la puissance maximale et, dans certains cas, la présence de plusieurs points de puissance maximale avec des puissances nominales différentes. Le système PV doit alors être équipé d'une interface de contrôle du point de fonctionnement qui permet le suivi en temps réel du point de puissance maximale optimal.

## Chapitre 02 :

### Commande et extraction de puissance maximale des systèmes PV

#### Sommaire :

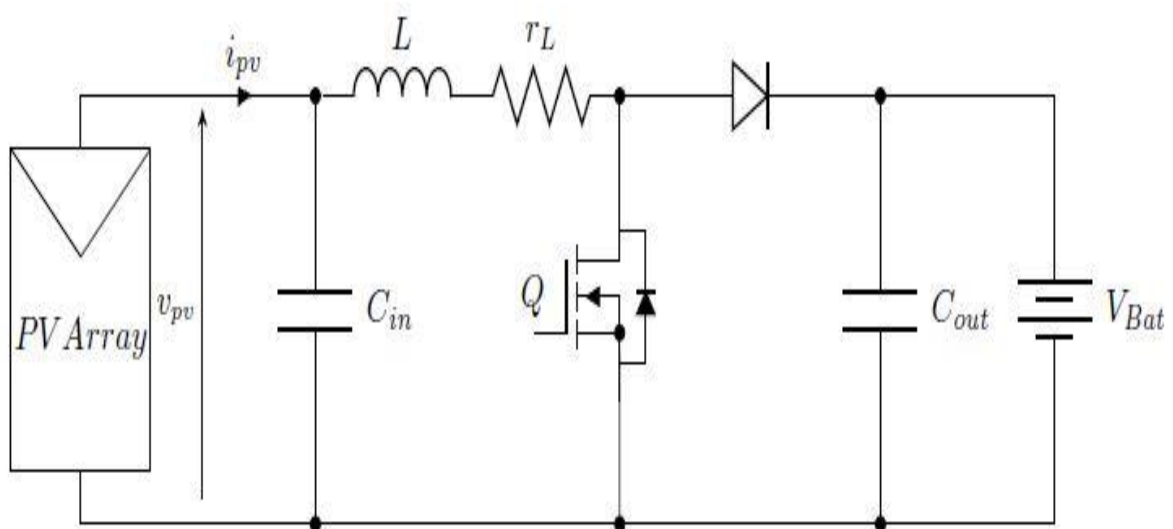
Chapitre 2. Commande et extraction de puissance maximale des systèmes PV .....	27
2.1. Introduction .....	28
2.2. Modèle dynamique du convertisseur DC-DC boost .....	28
2.2.1. Modèle d'allure des états du convertisseur DC-DC boost .....	29
2.2.2. Fonctions de transfert du convertisseur DC-DC boost .....	35
2.3. Conception d'un contrôleur pour le convertisseur DC-DC de type boost .....	36
2.4. Suivi du point de puissance maximale .....	38
2.4.1. Tension en circuit ouvert fractionnaire et courant de court-circuit .....	39
2.4.2. La méthode d' <i>escalade</i> (hill-climbing) MPPT .....	40
2.4.3. La méthode perturbation et observation (P&O) MPPT .....	40
2.4.4. Conductance incrémentale (Inc Cond) MPPT .....	47
2.4.5. Les applications des méthodes de calcul souple pour MPPT .....	49
2.4.6. Algorithme d'optimisation d'essaim de particules .....	50
2.5. Conclusion .....	51

## 2.1 Introduction :

La dépendance des générateurs photovoltaïques à la variation des variables incontrôlables de température et d'irradiation solaire en plus des différents défauts induits par l'environnement et les composants permet au point de puissance maximale (MPP) de varier dans une large plage. Par conséquent, le point de fonctionnement du générateur PV doit être contrôlé pour suivre le MPP variable. Un étage de conversion de puissance entre la source PV et la charge est nécessaire pour optimiser dynamiquement le point de fonctionnement de la source afin qu'il corresponde au MPP réel.

## 2.2 Modèle dynamique du convertisseur DC-DC boost:

Le convertisseur de commutation DC-DC illustré à la figure 2.1 est un convertisseur élévateur de tension, qui se caractérise par une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée. Une telle conversion est généralement nécessaire dans les réseaux (générateurs) PV dont la tension de sortie est faible et doit être augmentée afin d'être synchronisée avec la tension du réseau. Le comportement dynamique de l'étage de conversion de puissance est essentiel pour concevoir un algorithme MPPT efficace.

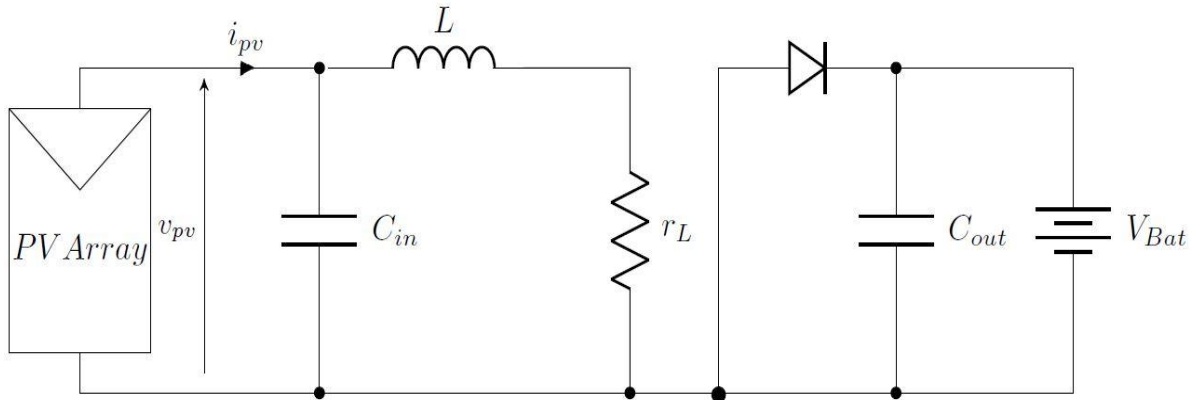


**Figure. 2.1 :** Association d'un générateur photovoltaïque et convertisseur DC-DC boost.

### 2.2.1 Modèle d'allure des états du convertisseur DC-DC boost :

Le modèle dynamique du convertisseur DC-DC boost est obtenu en appliquant l'approximation du petit signal qui consiste en une petite perturbation des variables du convertisseur autour des points de fonctionnement linéaires statiques. Le modèle est développé en appliquant les lois de Kirchoff

Pour le circuit illustré à la figure 2.1 lorsque l'interrupteur commandé  $Q$  est conducteur (état 'ON') et lorsqu'il est en condition de circuit ouvert (état 'OFF'). Le modèle obtenu est non linéaire, car il bascule entre deux modèles linéaires en fonction de l'état de  $Q$ . Lorsque l'interrupteur  $Q$  est 'ON' (fermé) le circuit de la figure 2.1 devient comme le circuit de la figure 2.2, les équations 2.1 suivantes sont obtenues :



**Figure. 2.2 :** Panneau photovoltaïque et convertisseur DC-DC boost : état " ON ".

$$\begin{cases} v_L(t) = v_{pv}(t) - r_L \cdot i_L(t) \\ i_{C_{in}}(t) = i_{pv}(t) - i_L(t) \\ i_{C_{out}}(t) = -i_o(t) \\ v_{C_{out}}(t) = V_{Bat} \end{cases} \quad (2.1)$$

Où  $v_L$  et  $i_L$  sont respectivement la tension et le courant dynamique de l'inducteur et  $r_L$  est sa résistance interne,  $v_{pv}$  et  $i_{pv}$  sont respectivement la tension et le courant de sortie dynamique du générateur photovoltaïque,  $i_o$  et  $V_{Bat}$  sont le courant et la tension de sortie dynamique du convertisseur,  $i_{Cout}$  et  $v_{Cout}$  la sortie courant et tension dynamique du condensateur respectivement.

Les variables variant dans le temps peuvent être représentées comme la composante continue (DC) ajoutée à l'ondulation résultant de la commutation à haute fréquence. Dans l'approximation des petites ondulations, l'amplitude de l'ondulation de commutation à haute fréquence est censée être beaucoup plus petite que sa composante continue.

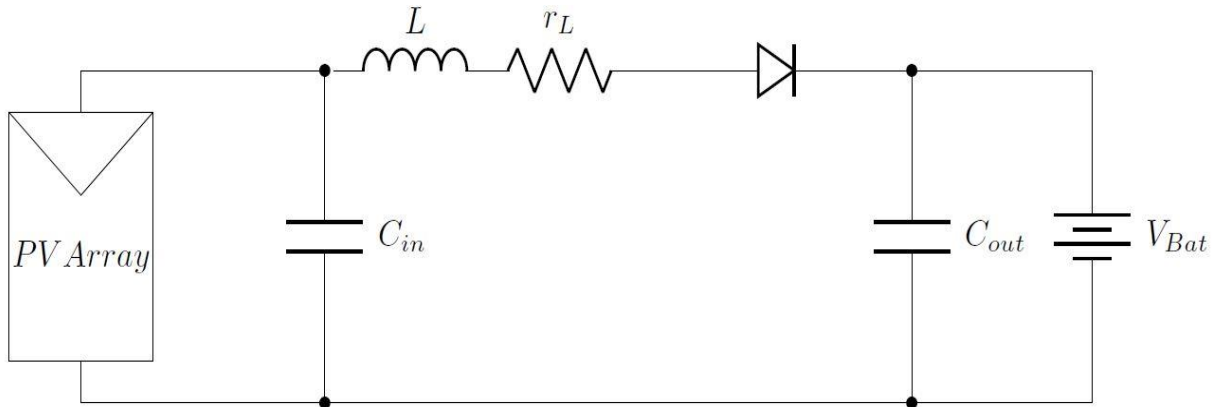
En utilisant l'approximation des petites ondulations, le système 2.1 devient le suivant :

$$\begin{cases} V_L = V_{pv} - r_L \cdot I_L \\ I_{C_{in}} = I_{pv} - I_L \\ I_{C_{out}} = -I_0 \\ V_{C_{out}} = V_{Bat} \end{cases} \quad (2.2)$$

Lorsque le commutateur  $Q$  est 'OFF' (ouvert), le circuit de la figure 2.1 devient comme le circuit de la figure 2.3, alors les équations suivantes sont valides :

$$\begin{cases} v_L(t) = v_{pv}(t) - r_L \cdot i_L(t) - V_{fw} - V_{Bat} \\ i_{C_{in}}(t) = i_{pv}(t) - i_L(t) \\ i_{C_{out}}(t) = i_L(t) - i_0(t) \\ v_{C_{out}}(t) = V_{Bat} \end{cases} \quad (2.3)$$

En utilisant l'approximation des petites ondulations, les équations deviennent les suivantes :



**Figure. 2.3:** Générateur PV et convertisseur DC-DC boost : état " OFF ".

$$\begin{cases} V_L = V_{pv} - r_L \cdot I_L - V_{fw} - V_{Bat} \\ I_{C_{in}} = I_{pv} - I_L \\ I_{C_{out}} = I_L - I_0 \\ V_{C_{out}} = V_{Bat} \end{cases} \quad (2.4)$$

Où  $V_{fw}$  est la tension directe de la diode conductrice.

L'équilibre volt-seconde de l'inductance  $\int_0^{T_s} V_L = 0$  s'applique comme suit :

$$\int_0^{T_s} V_L = D \cdot T_s (V_{pv} - r_L \cdot I_L) + D' \cdot T_s (V_{pv} - r_L \cdot I_L - V_{fw} - V_{Bat}) = 0$$

$$D(V_{pv} - r_L \cdot I_L) + D'(V_{pv} - r_L \cdot I_L - V_{fw} - V_{Bat}) = 0 \quad (2.5)$$

Sachant que  $D + D' = 1$ , l'équation 2.5 devient :

$$V_{pv} - r_L \cdot I_L - D'(V_{fw} + V_{Bat}) = 0 \quad (2.6)$$

$$V_{pv} - r_L \cdot I_L = D'(V_{fw} + V_{Bat}) \quad (2.7)$$

L'équilibre de la charge du condensateur donne la condition suivante  $\int_0^{T_s} I_{C_{in}} = 0$  pour le condensateur  $C_{in}$ .

$$\int_0^{T_s} I_{C_{in}} = D \cdot T_s (I_{pv} - I_L) + D' \cdot T_s (I_{pv} - I_L) = 0 \quad (2.8)$$

$$I_{pv} = I_L \quad (2.9)$$

Lorsque l'équilibre du courant du condensateur est appliqué pour Coût, l'équation suivante est obtenue :

$$\int_0^{T_s} I_{C_{out}} = D \cdot T_s (-I_0) + D' \cdot T_s (I_L - I_0) = 0 \quad (2.10)$$

$$-I_0 + D' \cdot I_L = 0 \quad (2.11)$$

$$I_0 = D' \cdot I_L \quad (2.12)$$

Ensuite, nous utilisons l'approximation des petits signaux pour obtenir le modèle dynamique du convertisseur DC-DC boost :

$$v_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = d(t) (v_{pv}(t) - r_L \cdot i_L(t)) + d'(t) (V_{pv}(t) - r_L \cdot I_L(t) - V_{fw} - V_{Bat})$$

En prenant en considération  $d(t) + d'(t) = 1$ , nous trouvons ce qui suit :

$$L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = v_{pv}(t) - r_L \cdot i_L(t) - d'(t) (V_{fw} + V_{Bat})$$

L'approximation des petits signaux suppose que le modèle non linéaire du convertisseur est linéarisé autour d'un point de fonctionnement au repos. Le modèle non linéaire est approximé en perturbant le point de fonctionnement statique réel comme suit :

$$\begin{cases} i_L(t) = I_L + \hat{i}_L(t) \\ v_{pv}(t) = V_{pv} + \hat{v}_{pv}(t) \\ d(t) = D + \hat{d}(t) \end{cases} \quad (2.13)$$

$$d'(t) = 1 - d(t) = 1 - (D + \hat{d}(t)) = 1 - D - \hat{d}(t) = D' - \hat{d}(t) \quad (2.14)$$

$$L \cdot \frac{d\hat{i}_L(t)}{dt} = V_{pv} + \hat{v}_{pv} - r_L \cdot (I_L + \hat{i}_L(t)) - (D' - \hat{d}(t)) (V_{fw} + V_{Bat})$$

$$L \cdot \frac{d\hat{i}_L(t)}{dt} = V_{pv} - r_L \cdot I_L - D' \cdot (V_{fw} + V_{Bat}) + \hat{v}_{pv}(t) - r_L \cdot \hat{i}_L(t) + \hat{d}(t) \cdot (V_{fw} + V_{Bat}) \quad (2.15)$$

En remplaçant 2.6 dans l'équation 2.15, nous trouvons :

$$\frac{d\hat{i}_L(t)}{dt} = -\frac{r_L}{L} \cdot \hat{i}_L(t) + \frac{1}{L} \cdot \hat{v}_{pv}(t) \frac{(V_{fw} + V_{Bat})}{L} \cdot \hat{d}(t) \quad (2.16)$$

D'autre part, nous avons également :

$$i_{C_{in}}(t) = i_{pv}(t) - i_L(t) \quad (2.17)$$

En remplaçant par les petites variables d'approximation du signal suivantes :

$$\begin{cases} i_{C_{in}}(t) = I_{C_{in}} + \hat{i}_{C_{in}}(t) \\ i_{pv}(t) = I_{pv} + \hat{i}_{pv}(t) \\ i_L(t) = I_L + \hat{i}_L(t) \end{cases} \quad (2.18)$$

Nous trouvons :

$$\hat{i}_{C_{in}}(t) = \hat{i}_{pv}(t) - \hat{i}_L(t) \quad (2.19)$$

Comme  $I_{C_{in}} = I_{pv} + I_L$  selon l'équation (3.4).

Pour le condensateur d'entrée  $C_{in}$  :

$$C_{in} \cdot \frac{dv_{C_{in}}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_L(t)$$

En notant que  $v_{C_{in}}(t) = v_{pv}(t)$ , nous trouvons :

$$\frac{dv_{pv}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{in}} \cdot i_{pv}(t) - \frac{1}{C_{in}} \cdot i_L(t) \quad (2.20)$$

L'approximation du petit signal donne ce qui suit :

$$\begin{cases} v_{pv}(t) = V_{pv} + \hat{v}_{pv}(t) \\ i_{pv}(t) = I_{pv} + \hat{i}_{pv}(t) \\ i_L(t) = I_L + \hat{i}_L(t) \end{cases} \quad (2.21)$$

Comme  $I_{pv} - I_L = 0$  d'après l'équation (2.9), l'équation (2.20) devient :

$$\frac{d\hat{v}_{pv}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{in}} \cdot \hat{i}_{pv}(t) - \frac{1}{C_{in}} \cdot \hat{i}_L(t) \quad (2.22)$$

D'après la définition de la résistance dynamique au chapitre 1, équation (1.6) :  $r_{pv} = -\frac{\partial v_{pv}(t)}{\partial i_{pv}(t)}$

en prenant  $\partial v_{pv} = \hat{v}_{pv}$  et  $\partial i_{pv} = \hat{i}_{pv}$ , d'où  $r_{pv} = -\frac{\hat{v}_{pv}}{\hat{i}_{pv}}$ , aboutit à :

$$\frac{d\hat{v}_{pv}(t)}{dt} = \frac{-1}{r_{pv} \cdot C_{in}} \cdot \hat{v}_{pv}(t) - \frac{1}{C_{in}} \cdot \hat{i}_L(t) \quad (2.23)$$

À partir des équations (2.16) et (2.23), et en choisissant les variables d'état suivantes :

$$\begin{cases} x_1(t) = i_L(t) \\ x_2(t) = v_{pv}(t) \end{cases} \quad (2.24)$$

Le modèle d'espace d'états à temps continu du convertisseur DC-DC boost peut être obtenu

comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{d\hat{v}_{pv}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{in}} & \frac{-1}{r_{pv} \cdot C_{in}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{i}_L(t) \\ \hat{v}_{pv}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(V_{fw} + V_{Bat})}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{d}(t) \quad (2.25)$$

En prenant la dérivée de l'éq.(2.23), on obtient :

$$\frac{d^2\hat{v}_{pv}(t)}{dt^2} = \frac{-1}{r_{pv} \cdot C_{in}} \cdot \frac{d\hat{v}_{pv}(t)}{dt} - \frac{1}{C_{in}} \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (2.26)$$

En remplaçant  $\frac{di_L(t)}{dt}$  de l'équation (2.26) dans (2.25) :

$$\frac{d^2\hat{v}_{pv}(t)}{dt^2} = \frac{-1}{r_{pv} \cdot C_{in}} \cdot \frac{d\hat{v}_{pv}(t)}{dt} + \frac{r_L}{L \cdot C_{in}} \cdot \hat{i}_L(t) - \frac{1}{L \cdot C_{in}} \cdot \hat{v}_{pv}(t) - \frac{(V_{fw} + V_{Bat})}{L \cdot C_{in}} \cdot \hat{d}(t) \quad (2.27)$$

De l'éq.(2.22) :

$$\hat{i}_L(t) = \hat{i}_{pv}(t) - C_{in} \cdot \frac{d\hat{v}_{pv}(t)}{dt} \quad (2.28)$$

Insérant l'éq.(2.28) dans(2.27) :

$$\frac{d^2\hat{v}_{pv}(t)}{dt^2} = \frac{-1}{r_{pv} \cdot C_{in}} \cdot \frac{d\hat{v}_{pv}(t)}{dt} + \frac{r_L}{L \cdot C_{in}} \cdot (\hat{i}_{pv}(t) - C_{in} \cdot \frac{d\hat{v}_{pv}(t)}{dt}) - \frac{1}{L \cdot C_{in}} \cdot \hat{v}_{pv}(t) - \frac{(V_{fw} + V_{Bat})}{L \cdot C_{in}} \cdot \hat{d}(t) \quad (2.29)$$

$$\frac{d^2\hat{v}_{pv}(t)}{dt^2} = \left(-\frac{r_L}{L} - \frac{1}{r_{pv}.C_{in}}\right) \cdot \frac{d\hat{v}_{pv}(t)}{dt} + \frac{r_L}{L.C_{in}} \cdot \hat{i}_{pv}(t) - \frac{1}{L.C_{in}} \cdot \hat{v}_{pv}(t) - \frac{(V_{fw} + V_{Bat})}{L.C_{in}} \cdot \hat{d}(t) \quad (2.30)$$

Nous remplaçons  $\hat{v}_{pv} = -r_{pv} \cdot \hat{i}_{pv}$  dans l'équation (2.30), nous obtenons :

$$\frac{d^2\hat{i}_{pv}(t)}{dt^2} = -\left(\frac{r_L}{L} + \frac{1}{r_{pv}.C_{in}}\right) \cdot \frac{d\hat{i}_{pv}(t)}{dt} - \left(\frac{r_L}{r_{pv}.L.C_{in}} + \frac{1}{L.C_{in}}\right) \cdot \hat{i}_{pv}(t) + \frac{(V_{fw} + V_{Bat})}{r_{pv}.L.C_{in}} \cdot \hat{d}(t) \quad (2.31)$$

En prenant les variables d'état suivantes :

$$\begin{cases} z_1(t) = \hat{i}_{pv}(t) \\ z_2(t) = \frac{d\hat{i}_{pv}(t)}{dt} \end{cases} \quad (2.32)$$

Nous obtenons :

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = z_2(t) \\ \dot{z}_2(t) = -\left(\frac{r_L}{r_{pv}.L.C_{in}} + \frac{1}{L.C_{in}}\right) \cdot z_1(t) - \left(\frac{r_L}{L} + \frac{1}{r_{pv}.C_{in}}\right) \cdot z_2(t) + \frac{(V_{fw} + V_{Bat})}{r_{pv}.L.C_{in}} \cdot \hat{d}(t) \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\left(\frac{r_L}{r_{pv}.L.C_{in}} + \frac{1}{L.C_{in}}\right) & -\left(\frac{r_L}{L} + \frac{1}{r_{pv}.C_{in}}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(V_{fw} + V_{Bat})}{r_{pv}.L.C_{in}} \end{bmatrix} \cdot \hat{d}(t) \quad (2.34)$$

Pour la tension PV :

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\left(\frac{r_L}{r_{pv}.L.C_{in}} + \frac{1}{L.C_{in}}\right) & -\left(\frac{r_L}{L} + \frac{1}{r_{pv}.C_{in}}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(V_{fw} + V_{Bat})}{L.C_{in}} \end{bmatrix} \cdot \hat{d}(t) \quad (2.35)$$

Ce qui représente un deuxième modèle d'espace d'états ( $\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t)$ ) du convertisseur dc-dc boost utilisant le courant du générateur (panneau) PV comme variable d'état. La matrice de contrôlabilité  $G = [B \quad AB \quad A^2B]$  a un rang complet, donc les états sont contrôlables.

Le premier modèle d'espace d'état (2.25) est utilisé lorsque l'on considère le suivi du courant PV en supposant que le courant du condensateur d'entrée est négligeable ou dans le cas de l'utilisation de la tension PV comme variable de contrôle (commande). Lorsque le courant du condensateur est pris en compte (considéré), le modèle (2.35) est utilisé à la place, car il utilise explicitement le courant PV.

### 2.2.2 Fonctions de transfert du convertisseur DC-DC boost :

La transformée de Laplace est appliquée aux équations (2.16) et (2.23) comme suit :

$$s \cdot I_L(s) = -\frac{r_L}{L} \cdot I_L(s) + \frac{1}{L} \cdot v_{pv}(s) + \frac{(V_{fw}+V_{Bat})}{L} \cdot D(s) \quad (2.36)$$

$$s \cdot V_{pv}(s) = \frac{-1}{r_{pv} \cdot C_{in}} \cdot V_{pv}(s) - \frac{1}{C_{in}} \cdot I_L(s) \quad (2.37)$$

En réarrangeant les équations (2.33) et (2.34) :

$$I_L(s) = \frac{1}{L \cdot s + r_L} \cdot V_{pv}(s) + \frac{(V_{fw}+V_{Bat})}{L \cdot s + r_L} \cdot D(s) \quad (2.38)$$

$$V_{pv}(s) = \frac{-r_{pv}}{r_{pv} \cdot C_{in} \cdot s + 1} \cdot I_L(s) \quad (2.39)$$

En insérant l'éq. (2.39) dans (2.38), nous trouvons la fonction de transfert du courant de l'inductance en fonction du rapport cyclique :

$$\frac{I_L(s)}{D(s)} = \frac{r_{pv} \cdot C_{in} \cdot (V_{fw}+V_{Bat}) \cdot s + (V_{fw}+V_{Bat})}{r_{pv} \cdot L \cdot C_{in} \cdot s^2 + (L+r_{pv} \cdot r_L \cdot C_{in}) \cdot s + r_{pv} + r_L} \quad (2.40)$$

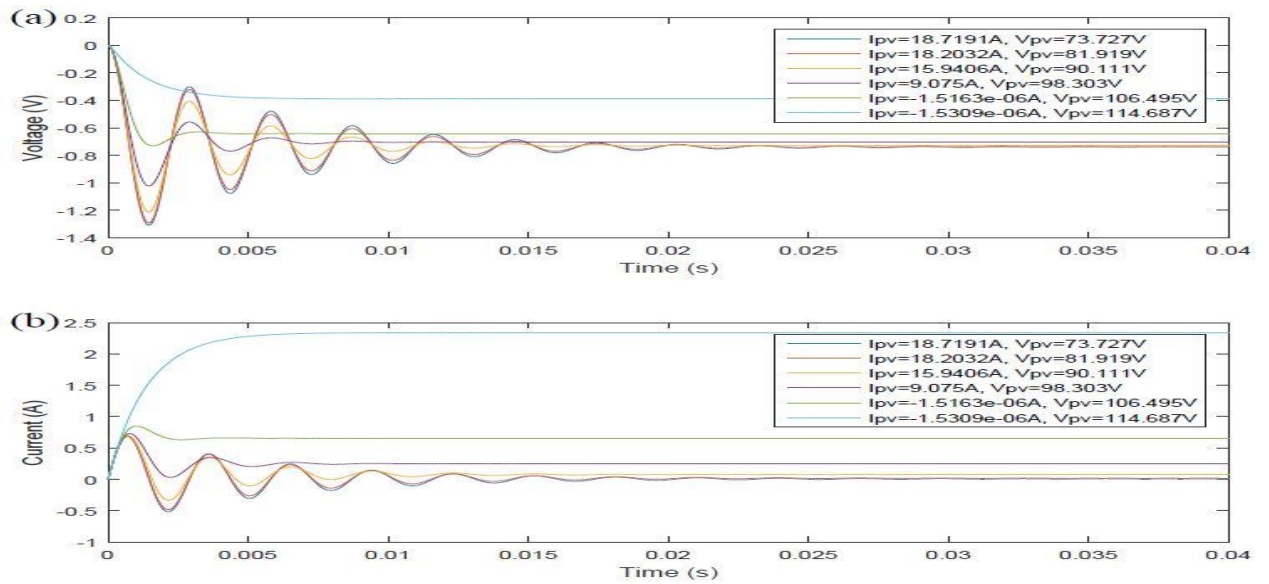
En remplaçant l'équation (2.38) par (2.39), nous déduisons la fonction de transfert de la tension du générateur PV en fonction du rapport cyclique

$$\frac{V_{pv}(s)}{D(s)} = \frac{-r_{pv} \cdot (V_{fw}+V_{Bat})}{r_{pv} \cdot L \cdot C_{in} \cdot s^2 + (L+r_{pv} \cdot r_L \cdot C_{in}) \cdot s + r_{pv} + r_L} \quad (2.41)$$

Par conséquent, la fonction de transfert du courant du générateur photovoltaïque par rapport au rapport cyclique est donnée comme suit :

$$\frac{I_{pv}(s)}{D(s)} = \frac{(V_{fw}+V_{Bat})}{r_{pv} \cdot L \cdot C_{in} \cdot s^2 + (L+r_{pv} \cdot r_L \cdot C_{in}) \cdot s + r_{pv} + r_L} \quad (2.42)$$

La figure 2.4 montre la réponse en boucle ouverte du rapport cyclique à la tension de la figure 2.4(a), qui présente une réponse variable en termes de temps de réponse et d'erreur statique. La réponse du rapport cyclique au courant présente les mêmes caractéristiques à la figure 2.4(b). Les réponses en boucle ouverte montrent les limites des techniques basées sur le contrôle direct (en utilisant le rapport cyclique comme variable de contrôle), en particulier dans les techniques de suivi du point de puissance maximale.



**Figure. 2.4:** Réponse de la commande aux fonctions de transfert de tension et de courant en boucle ouverte du générateur photovoltaïque à différents points de fonctionnement : (a) commande à la réponse de tension PV (b) commande à la réponse du courant PV

### 2.3 Conception d'un contrôleur pour le convertisseur DC-DC de type boost :

L'implémentation du contrôleur dans un contrôleur de signal numérique (DSC) nécessite la conception du contrôleur sous une forme discrète. Le modèle d'espace d'états à temps continu (2.25) du convertisseur DC-DC boost peut être écrit sous forme discrète comme suit :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (2.43)$$

La variable de contrôle (commande)  $u = d$  est le rapport cyclique du convertisseur. La matrice de sortie  $C$  dépend de la variable à suivre.  $C = [1 \ 0]$  est choisi dans le cas d'un suivi de courant, tandis que  $C = [0 \ 1]$  dans le cas d'un suivi de tension. Le modèle d'espace d'états (2.43) du convertisseur DC-DC boost est utilisé pour concevoir un contrôleur de suivi optimal pour les variables de courant et de tension. L'objectif de suivi est défini comme suit :

$$e_r(k) = y_r - y(k) = 0 \quad (2.44)$$

Pour atteindre cet objectif, un contrôleur de type Proportionnel Intégral (PI) est conçu en ajoutant un état intégral au système (2.43) comme suit :

$$\begin{cases} e_r = \frac{x_I(k+1) - x_I(k)}{T_s} \\ x_I(k+1) = x_I(k) + T_s(y_r(k) - y(k)) \\ \quad = x_I(k) + T_s(y_r(k) - Cx(k)) \end{cases} \quad (2.45)$$

La constante d'intégration  $T_s$  dans l'équation (2.45) est conçue de telle sorte que l'algorithme de contrôle ait le temps d'être exécuté et que d'autre part le système reste stable. Le système (2.43) est augmenté de l'état intégral comme suit :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ x_I(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0_2^1 \\ -T_s C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x_I(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0_2^1 \\ T_s \end{bmatrix} y_r(k) \\ y(k) = [C \ 0] \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.46)$$

Lesquelles sont notées comme suit :

$$\begin{cases} \check{x}(k+1) = \check{A}\check{x}(k) + \check{B}u(k) + \check{B}_r y_r(k) \\ y(k) = \check{C}\check{x}(k) \end{cases} \quad (2.47)$$

Où :

$$\check{A} = \begin{bmatrix} A & 0_2^1 \\ -T_s C & 1 \end{bmatrix} \quad \check{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad \check{B}_r = \begin{bmatrix} 0_2^1 \\ T_s \end{bmatrix} \quad \check{C} = [C \ 0]$$

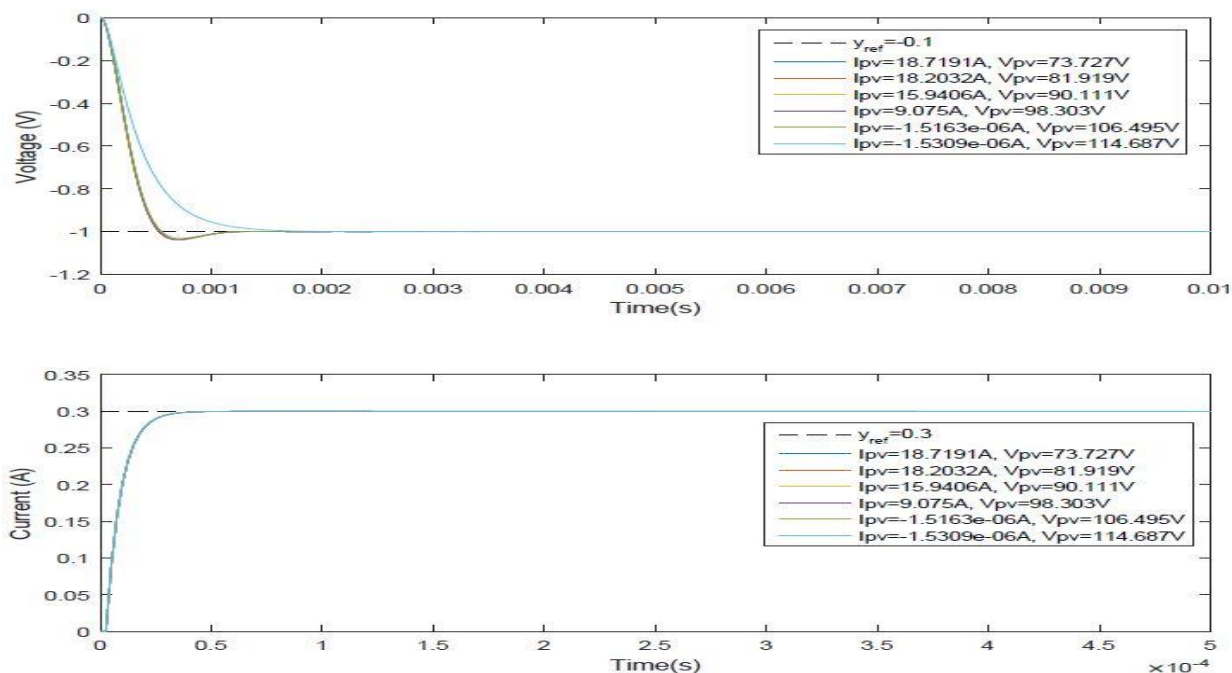
La loi de contrôle par retour d'état du système 3.47 est calculée comme suit :

$$u(k) = -K\check{x}(k) = -[K_p \ K_I] \begin{bmatrix} x(k) \\ x_I(k) \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Le gain de retour d'état (rétroaction)  $K$  est conçu à l'aide d'une approche de régulateur quadratique linéaire (LQR) qui est utilisée pour concevoir le régulateur de suivi optimal afin de minimiser la fonction objective suivante :

$$J = \int_0^{+\infty} (\check{x}^T Q \check{x} + u^T R u) dt \quad (2.49)$$

Tel que  $Q = Q^T \geq 0$ ,  $R = R^T > 0$ . La figure 2.5 montre la réponse en échelon du régulateur conçu par LQR pour le suivi de la tension et du courant. Les réponses de la régulation de tension montrent une sensibilité au point de fonctionnement et une réponse plus lente par rapport à la régulation de courant. Pour ces raisons, la régulation de courant sera utilisée dans la suite du travail pour suivre le point de puissance maximale.



**Figure. 2.5 :** Réponse des fonctions de transfert en boucle fermée basées sur la tension et le courant d'un générateur photovoltaïque LQR à différents points de fonctionnement : (a) suivi de la tension de référence, (b) suivi du courant de référence.

## 2.4 Suivi du point de puissance maximale :

Il a été montré au chapitre 1 que les variations de température et d'irradiation entraînent une variation du MPP dans une large plage. La connexion directe du générateur photovoltaïque à un système de conversion de puissance serait une solution intuitive, mais inefficace. Lorsqu'il est connecté à une batterie, le générateur photovoltaïque fournira une puissance maximale uniquement si la tension de la batterie est proche du point de fonctionnement réel de la tension MPP. Dans le cas d'une charge résistive, la puissance maximale n'est vérifiée que si la courbe caractéristique de la charge coupe la courbe I-V du générateur PV au point de fonctionnement MPP.

Pour vérifier ces spécifications, un étage de conversion de puissance intermédiaire doit être inséré afin d'ajuster le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque pour correspondre au MPP. Le convertisseur DC-DC présenté dans la section précédente est utilisé à cet effet. En faisant varier en continu le rapport cyclique du convertisseur, l'étage de conversion pourra

suivre dynamiquement le MPP. Les algorithmes conçus pour accomplir une telle tâche sont appelés Maximum Power Point Tracking (ou MPPT). Leur objectif commun est de suivre en continu le MPP dans différentes conditions environnementales du générateur photovoltaïque. L'approche intuitive pour calculer le point de fonctionnement du MPP consiste à utiliser les données connues disponibles sous forme de circuit ouvert. Tension et courant de court-circuit pour estimer le MPP réel, cette approche est appelée tension fractionnaire en circuit ouvert dans le cas de l'utilisation d'un courant de court-circuit variable et fractionnaire de tension PV dans le cas d'un courant PV.

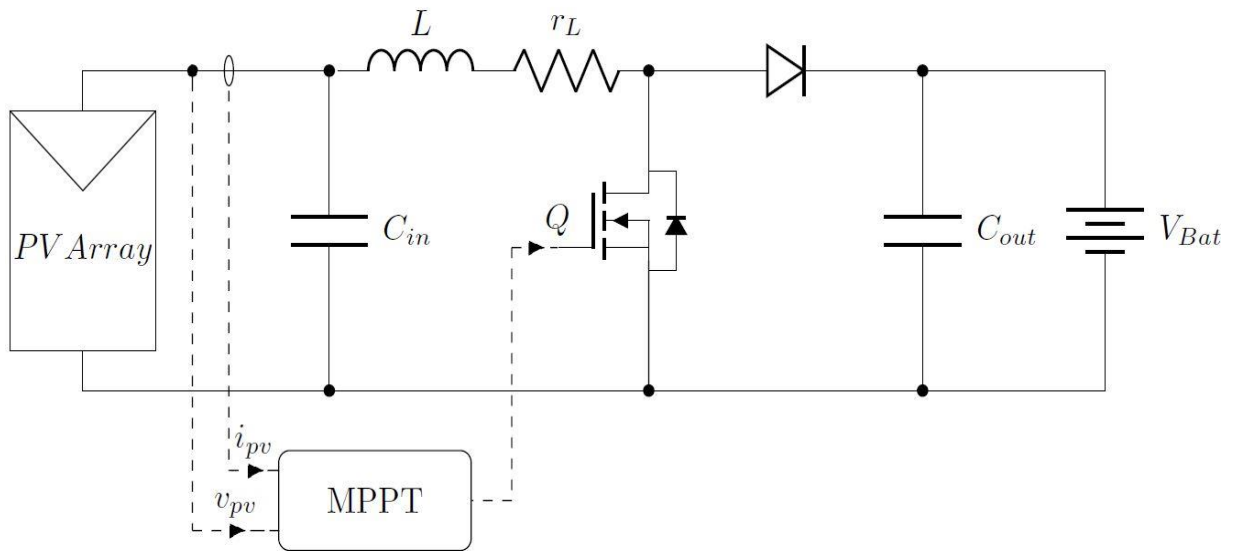


Figure. 2.6 : Convertisseur DC-DC boost avec MPPT.

#### 2.4.1 Tension en circuit ouvert fractionnaire et courant de court-circuit :

Dans la tension fractionnaire en circuit ouvert (également appelée tension constante), le point de fonctionnement MPP est estimé à l'aide d'une approximation du générateur PV considéré, la tension de fonctionnement à MPP est donnée comme suit [42] :

$$V_{MPP} \approx k \cdot V_{oc} \quad (2.50)$$

Selon la littérature, le facteur d'estimation  $k$  est compris entre 70 et 82%.  $V_{oc}$  est principalement affecté par la température comme le montre le chapitre 1. La méthode du courant de court-

circuit fractionné (courant constant) utilise la même approche de la tension en circuit ouvert avec une plage différente 78-92%.

$$I_{MPP} \approx k \cdot I_{sc} \quad (2.51)$$

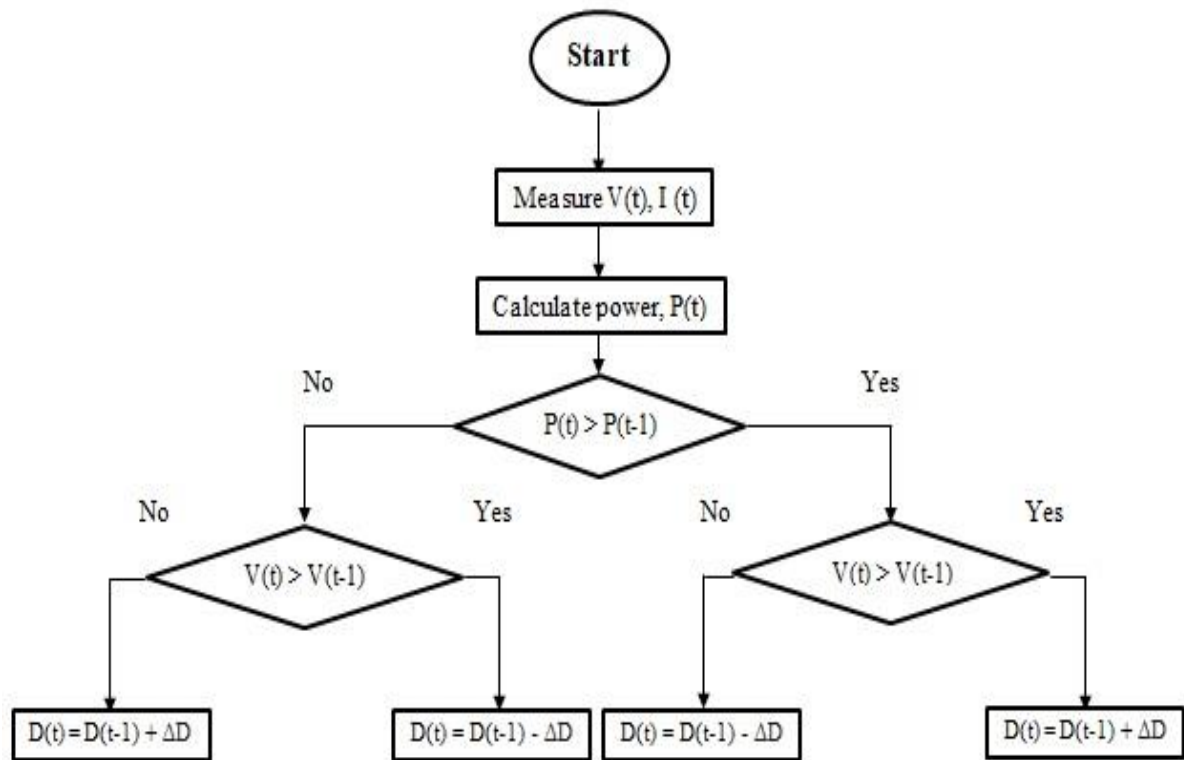
### **2.4.2 La méthode d'escalade (hill-climbing) MPPT :**

La structure la plus simple pour suivre en continu le MPP consiste à perturber le point de fonctionnement réel du générateur photovoltaïque et à observer le changement de puissance qui en résulte. Selon le signe du changement de puissance, une augmentation ou une diminution appropriée du point de fonctionnement réel est exécutée. La variable perturbée peut être le rapport cyclique du convertisseur dc-dc (dans ce cas, le MPPT peut être appelé Hill Climbing comme dans [42]), ou peut-être la tension de sortie PV [43] ou le courant [44]. L'organigramme de cette technique est donné à la figure 2.7. La variable X peut être choisie pour être le rapport cyclique, la tension PV ou le courant. Dans le cas du rapport cyclique, le signe de l'étape de perturbation f doit être inversé dans le cas du convertisseur dc-dc boost car la tension est inversement proportionnelle au cycle de service.

### **2.4.3 La méthode perturbation et observation (P&O) MPPT :**

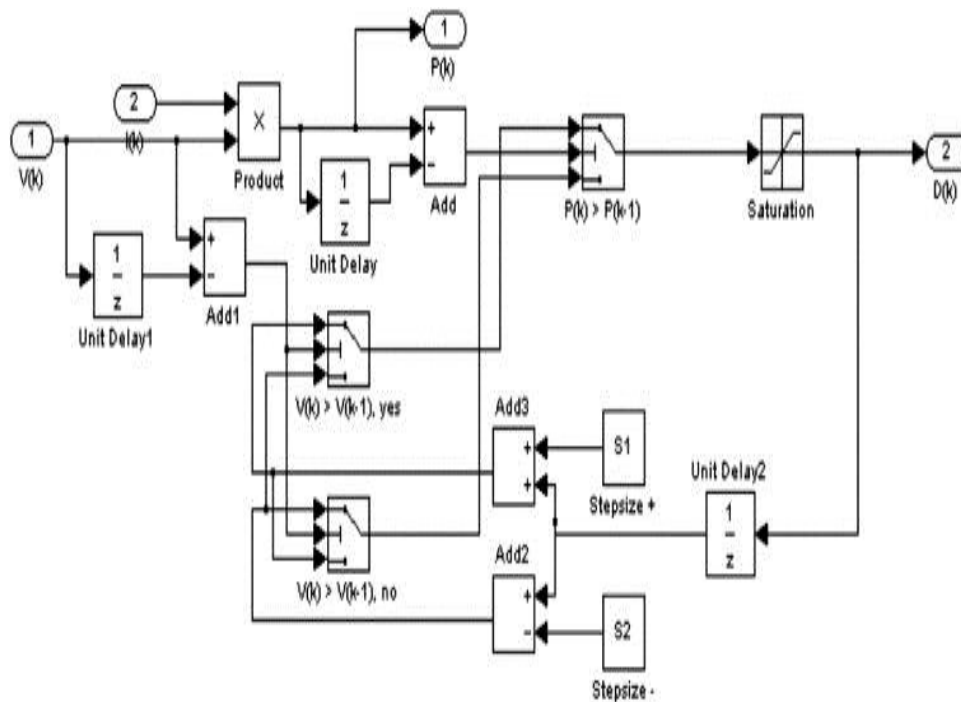
Plusieurs auteurs concentrent leurs travaux sur l'escalade [42,43,52], tandis que d'autres se concentrent sur les méthodes de perturbation et d'observation (P&O) [46,50,77,79]. L'escalade implique une perturbation du rapport cyclique du convertisseur de puissance, et P&O une perturbation de la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque. Dans le cas d'un générateur PV connecté à un convertisseur de puissance, perturber le rapport cyclique du convertisseur de puissance perturbe le courant du générateur PV et par conséquent perturbe la tension du générateur PV. L'escalade et les méthodes P&O sont différentes façons d'envisager la même méthode fondamentale. L'algorithme (P&O) est le plus couramment utilisé en pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre [63]. La figure 2.7 montre l'organigramme du procédé

P&O. Il perturbe périodiquement la tension aux bornes du générateur PV, puis il compare la puissance de sortie PV avec celle du cycle de perturbation précédent [50,63].



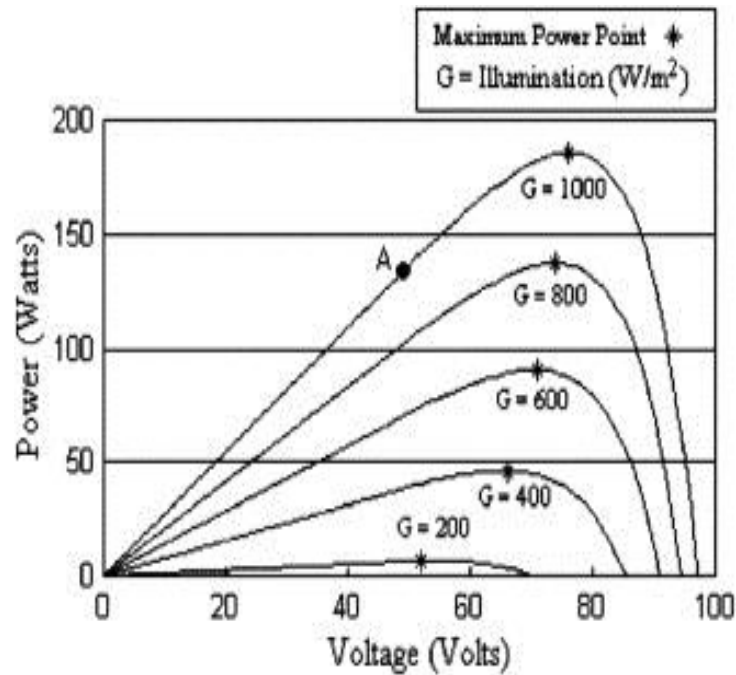
**Figure. 2.7:** Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O) [79]

Comme le montre la Figure 2.7, lorsque la puissance PV et la tension PV augmentent en même temps et vice versa, une taille de pas de perturbation,  $\Delta D$  sera ajoutée au rapport cyclique,  $D$  pour générer le prochain cycle de perturbation afin de forcer le point de fonctionnement vers le MPP. Lorsque la puissance PV augmente et que la tension PV diminue et vice versa, le pas de perturbation sera soustrait pour le prochain cycle de perturbation. Ce processus se poursuivra en continu jusqu'à ce que le MPP soit atteint. Il convient de noter que le système oscillera autour du MPP tout au long de ce processus, ce qui entraînera une perte d'énergie. Par conséquent, la réduction de la taille du pas de perturbation minimisera ces oscillations, mais ralentira le système de suivi MPP. La Figure 2.8 montre les configurations des algorithmes MPPT dans Simulink selon l'organigramme de la méthode P&O expliqué dans la Figure 2.7.



**Figure. 2.8 :** Configurations des algorithmes MPPT dans Simulink pour l'algorithme MPPT (P&O) [46].

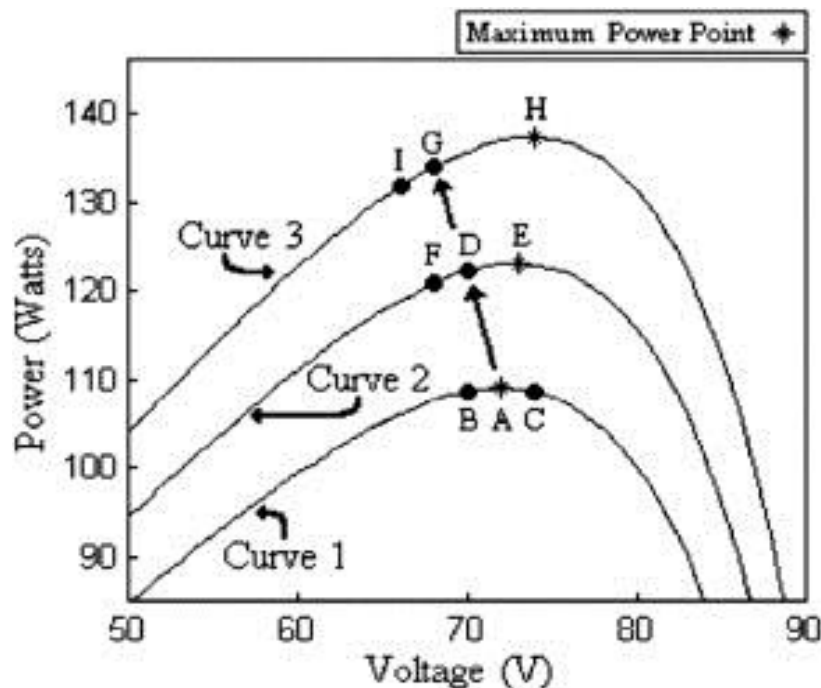
La forme la plus élémentaire de l'algorithme P&O fonctionne comme suit. Considérez la Figure 2.9 qui montre une famille de courbes de puissance du générateur photovoltaïque en fonction de la tension (courbes  $P - V$ ), à différents niveaux d'éclairement ( $G$ ), pour un éclairement uniforme et une température constante. Comme décrit précédemment, ces courbes ont des maxima globaux au MPP. Supposons que le générateur photovoltaïque fonctionne au point A de la Figure 2.9, qui est loin du MPP. Dans l'algorithme P&O, la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque est perturbée par un petit incrément et la variation de puissance résultante,  $\Delta P$ , est mesurée. Si  $\Delta P$  est positif, alors la perturbation de la tension de fonctionnement a rapproché le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque du MPP. Ainsi, d'autres perturbations de tension dans la même direction (c'est-à-dire avec le même signe algébrique) devraient déplacer le point de fonctionnement vers le MPP. Si  $\Delta P$  est négatif, le point de fonctionnement du système s'est éloigné du MPP, et le signe algébrique de la perturbation doit être inversé pour revenir vers le MPP.



**Figure. 2.9 :** Relation puissance-tension du générateur photovoltaïque. [46]

Les avantages de cet algorithme, comme indiqué précédemment, sont la simplicité et la facilité de mise en œuvre. Cependant, P&O a des limites qui réduisent son efficacité MPPT. L'une de ces limitations est qu'à mesure que la quantité de lumière solaire diminue, la courbe  $P - V$  s'aplatit, comme le montre la Figure 2.9. Cela rend difficile pour le MPPT de discerner l'emplacement du MPP, en raison du petit changement de puissance par rapport à la perturbation de la tension. Un autre inconvénient fondamental de P&O est qu'il ne peut pas déterminer quand il a effectivement atteint le MPP. Au lieu de cela, il oscille autour du MPP, changeant le signe de la perturbation après chaque mesure  $\Delta P$ . En outre, il a été démontré que P&O peut présenter un comportement erratique sous des niveaux d'éclairement changeant rapidement [53]. La Figure 2.10 montre une vue rapprochée de la caractéristique  $P-V$  du générateur solaire près du MPP. Considérons le cas où l'éclairement énergétique est tel qu'il génère la courbe  $P-V$  (1) de la figure 2.10. Le MPPT oscille autour du MPP du point  $B$  à  $A$  à  $C$  à  $A$  et ainsi de suite. Supposons ensuite que l'irradiance augmente et que la courbe  $P-V$  du réseau passe à la courbe 2, pendant l'augmentation rapide de l'irradiance solaire et de la puissance de sortie, le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point  $A$  au point  $B$ , le MPPT se déplace réellement de

A à D. Comme le montre la Figure 2.10, cela se traduit par un  $\Delta P$  positif, et le MPPT continuera à perturber dans la même direction, vers le point F. Si l'irradiance continue d'augmenter rapidement, la courbe de puissance PV se déplacera vers G sur la courbe 3 au lieu de vers F sur la courbe 2. Encore une fois, le MPPT verra un  $\Delta P$  positif et supposera qu'il se déplace vers le MPP, continuant à perturber jusqu'au point I. Des points A à D à G à I, le MPPT s'éloigne continuellement du MPP, diminuant l'efficacité de l'algorithme P&O. Cette situation peut se produire les jours partiellement nuageux, lorsque le suivi du MPP est le plus difficile, en raison du mouvement fréquent du MPP.



**Figure. 2.10 :** Illustration du comportement erratique de P&O sous une irradiance en augmentation rapide [46].

Plusieurs améliorations de l'algorithme P&O ont été proposées, et l'une des plus simples implique l'ajout d'une fonction « d'attente » qui provoque une cessation momentanée des perturbations si le signe algébrique de la perturbation est inversé plusieurs fois de suite, indiquant que le MPP a été atteint. Cela réduit l'oscillation autour du MPP en régime permanent et améliore l'efficacité de l'algorithme dans des conditions d'éclairement constant. Cependant, cela rend également le MPPT plus lent à réagir aux conditions atmosphériques changeantes, et

aggrave ainsi le comportement erratique les jours partiellement nuageux. Une autre modification consiste à mesurer la puissance du réseau P1 à la tension du réseau V1, à perturber la tension et à mesurer à nouveau la puissance du réseau, P2, à la nouvelle tension du réseau V2, puis à ramener la tension à sa valeur précédente et à remesurer la puissance du réseau, P1', en V1. À partir des deux mesures à V1, l'algorithme peut déterminer si l'irradiance change. Encore une fois, comme pour les modifications précédentes, l'augmentation du nombre d'échantillons de la puissance du tableau ralentit l'algorithme. De plus, il est possible d'utiliser les deux mesures à V1 pour faire une estimation de combien l'irradiance a changé entre les périodes d'échantillonnage, et d'utiliser cette estimation pour décider comment perturber le point de fonctionnement. Ceci augmente cependant la complexité de l'algorithme et ralentit également le fonctionnement du MPPT [42].

On peut voir que l'incrémentement (décrémentement) de la tension augmente (diminue) la puissance lors du fonctionnement à gauche du MPP et diminue (augmente) la puissance lorsqu'elle est à droite du MPP. Par conséquent, s'il y a une augmentation de puissance, la perturbation subséquente doit être maintenue pour atteindre le MPP et s'il y a une diminution de puissance, la perturbation doit être inversée. Cet algorithme est résumé dans le tableau 2.1.

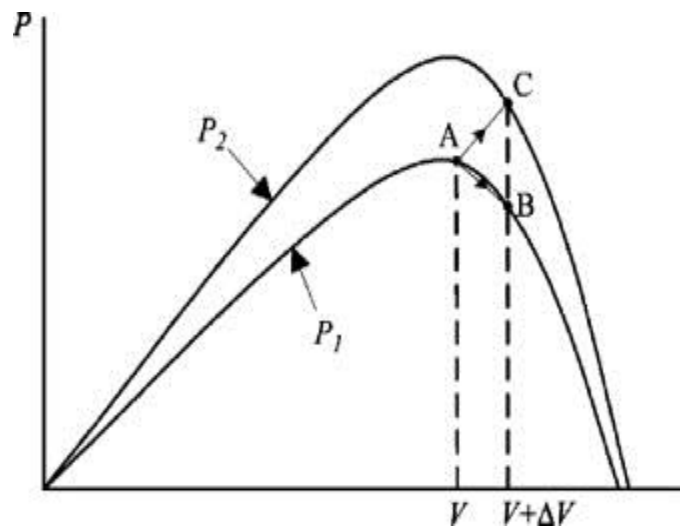
**Tableau 2.1.** Résumé des algorithmes d'escalade et de P&O [42].

<b>Perturbation</b>	<b>Charge en puissance</b>	<b>Prochaine perturbation</b>
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

D'Souza et al [47], Ont souligné que l'algorithme fonctionne également lorsque la tension et le courant instantanés (au lieu de la moyenne) du générateur PV sont utilisés, tant que

l'échantillonnage ne se produit qu'une seule fois dans chaque cycle de commutation. Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le MPP soit atteint. Le système oscille alors autour du MPP. L'oscillation peut être minimisée en réduisant la taille du pas de perturbation. Cependant, une taille de perturbation plus petite ralentit le MPPT. Une solution à cette situation conflictuelle est d'avoir une taille de perturbation variable qui devient plus petite vers le MPP. La commande par logique floue est utilisée pour optimiser l'amplitude de la prochaine perturbation. Un algorithme en deux étapes est proposé, il offre un suivi plus rapide dans la première étape et un suivi plus fin dans la deuxième étape. En revanche, il contourne la première étape en utilisant une équation non linéaire pour estimer un point de fonctionnement initial proche du MPP.

Les méthodes d'escalade et de P&O peuvent échouer dans des conditions atmosphériques qui changent rapidement, comme illustré à la Figure. 2.11. À partir d'un point de fonctionnement A, si les conditions atmosphériques restent approximativement constantes, la perturbation  $\Delta V$  de la tension PV sera inversée en raison d'une diminution de la puissance. Cependant, si l'irradiance augmente et déplace la courbe de puissance de  $P_1$  à  $P_2$  au cours d'une période d'échantillonnage, le point de fonctionnement se déplacera de A à C.



**Figure. 2.11** : Divergence entre l'escalade/P&O et le MPP [42], [46].

Cela représente une augmentation de puissance et la perturbation est maintenue la même. Par conséquent, le point de fonctionnement s'écarte du MPP et continuera de diverger si l'irradiance augmente régulièrement. Pour s'assurer que le MPP est suivi même en cas de changements soudains d'éclairement, Hsiao et Chen [48] utilisent une méthode P&O de comparaison à trois points qui compare le point de puissance réel aux deux précédents avant qu'une décision ne soit prise sur le signe de la perturbation. Ils ont optimisé l'échantillonnage lorsqu'un simple taux d'échantillonnage élevé est utilisé. Ils ont introduit aussi un basculement entre l'algorithme d'escalade traditionnel et un mécanisme d'escalade adaptatif modifié pour éviter toute déviation par rapport au MPP.

Ils ont estimé le courant du générateur photovoltaïque à partir de la tension du générateur photovoltaïque, éliminant ainsi le besoin d'un capteur de courant. Le processeur de signal numérique (DSP) ou le contrôle par micro-ordinateur est plus adapté à l'escalade et au P&O, même si des circuits analogiques et numériques discrets peuvent être utilisés.

#### 2.4.4 Conductance incrémentale (Inc Cond) MPPT :

L'algorithme de conductance incrémentale utilise le signe de la puissance-tension courbe comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dV} = 0, \text{ at MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0, \text{ at the left of the MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0, \text{ at the right of the MPP} \end{array} \right. \quad (2.52)$$

Nous savons que :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I.V)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (2.53)$$

Les conditions en 2.52 peuvent être réécrites comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \text{ at MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, \text{ left pf the MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, \text{ right of the MPP} \end{array} \right. \quad (2.54)$$

Ils donnent les conditions pour atteindre le MPPT en utilisant la conductance  $\frac{I}{V}$  et la conductance incrémentale  $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ . L'incrémentatation conductance MPPT peut alors être construite comme illustré dans l'organigramme de la figure 2.12. La détection d'un changement rapide de l'irradiation est mise en évidence, le fonctionnement à MPP est caractérisé par une conductance incrémentale égale à la conductance réelle, et aucun changement du point de fonctionnement ( $dV = 0$ ), le changement rapide de l'irradiation induit un changement du courant PV, les actions appropriées sont alors prises. La présence d'une courbe puissance-tension à plusieurs pics fait que l'algorithme MPPT n'arrive pas à suivre le MPP global, car les algorithmes P&O et IncCond sont piégés à la première occurrence d'extremum qui peut ou non être le global. Pour résoudre ce problème, des méthodes de calcul logiciel ont été proposées pour suivre le maximum global en utilisant une recherche métaheuristique.

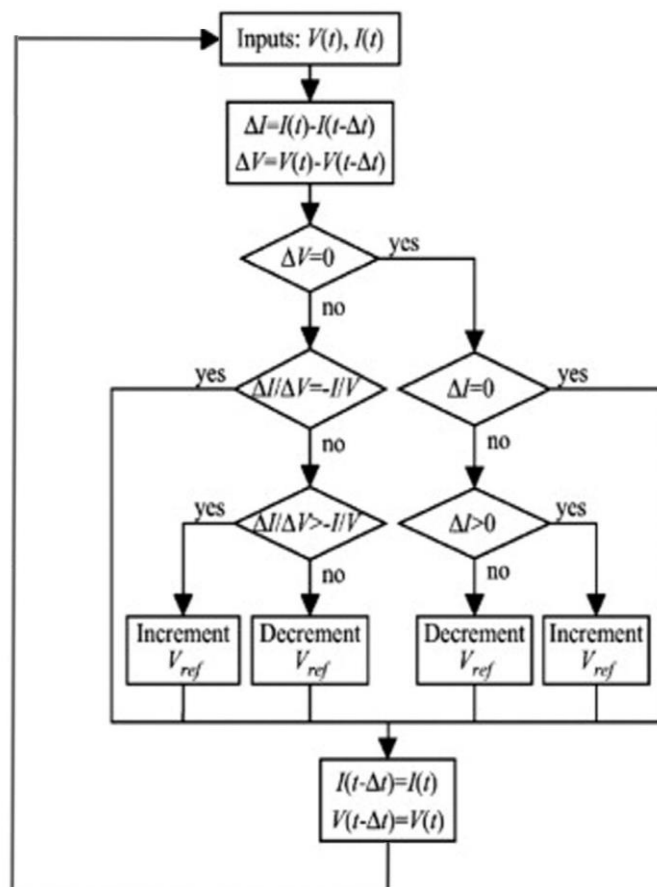


Figure. 2.12 Organigramme de l'algorithme de conductance incrémentielle

### **2.4.5 Les applications des méthodes de calcul souple pour MPPT :**

Travailler avec des données imprécises en utilisant une technique précise peut conduire à une perte de performance et même de stabilité, les algorithmes MPPT basés sur la logique floue et les réseaux neuronaux ont été conçus pour traiter la non-linéarité présente dans la courbe caractéristique des panneaux PV et peuvent également avoir de bonnes performances en présence d'une connaissance incomplète du système contrôlé. Cependant, ces techniques nécessitent un historique du fonctionnement et une expérience de l'installation PV qui peuvent ne pas être disponibles. De plus, les algorithmes ne parviennent pas à suivre le MPP en présence d'une courbe caractéristique à pics multiples.

Le problème de la non-linéarité de la courbe P-V des panneaux photovoltaïques, ainsi que l'effet des défauts et des conditions de fonctionnement qui entraînent la création de multiples points extrêmes, ont conduit à l'utilisation d'algorithmes de recherche métaheuristiques pour suivre le point de puissance maximale globale (GMPP). Masafumi Miyatake et al [55], ont d'abord proposé la mise en œuvre d'un MPPT basé sur l'optimisation de l'essaim de particules pour suivre le GMPP d'un générateur PV soumis à un ombrage partiel. L'algorithme PSO a été proposé pour la première fois par J. Kennedy and R. Eberhart [51], La métaphore la plus pertinente est probablement celle de l'essaim d'abeilles, particulièrement du fait qu'une abeille ayant trouvé un site prometteur sait en informer certaines de ses consœurs et que celles-ci vont tenir compte de cette information pour leur prochain déplacement. Finalement, le modèle s'est révélé être trop simple pour vraiment simuler un comportement social, mais par contre très efficace en tant qu'outil d'optimisation, pour cela plusieurs versions modifiées ont été proposées pour convergence a également comparé d'autres algorithmes d'optimisation comme a été traité par Russell C. Eberhart and Yuhui Shi [56] avec des algorithmes génétiques. La technique PSO a rapporté de meilleures performances en termes de taux de réussite et de qualité de la solution finale [54].

### 2.4.6 Algorithme d'optimisation d'essaim de particules :

La première version de l'algorithme PSO introduite par J. Kennedy and R. Eberhart [51], est basée sur le principe que chaque individu (particule) qui vole dans un essaim de particules dans un espace de recherche donné est caractérisé par une vitesse dynamiquement variable modifiée en fonction de son expérience et celle de ses compagnons. Les variables qui caractérisent la particule se résument comme suit :

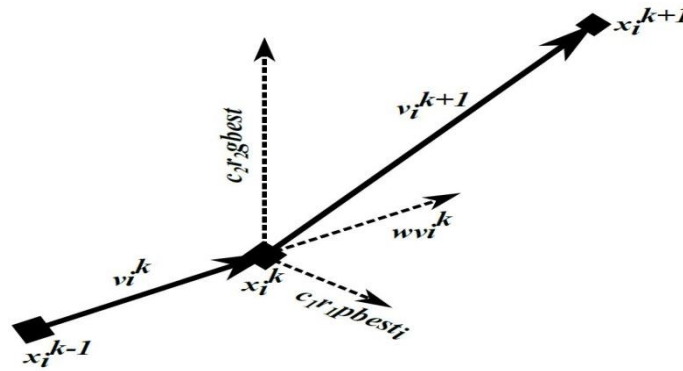
- La position d'une particule donnée ( $i$ ) à une itération donnée ( $k$ ) est notée  $x_i^k$ .
- La position précédente la plus connue qui donne la meilleure condition physique personnelle de cette particule est notée  $pbest_i$ .
- La meilleure position parmi toutes les particules de l'essaim est notée  $gbest$ .
- Le taux de changement dynamique de la position d'une particule ( $i$ ) qui représente sa vitesse à une itération donnée ( $k$ ) est noté  $v_i^k$ .

La vitesse et la position sont mises à jour comme suit :

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest - x_i^k) \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \end{cases} \quad (2.55)$$

Où  $c_1$  et  $c_2$  sont des constantes positives qui ajoutent des poids à la tendance à la meilleure position personnelle ou à la meilleure position de groupe.  $r_1, r_2$  sont des nombres aléatoires dans [0 1]. Un poids d'inertie a été ajouté par Kashif Ishaque and Zainal Salam [45] pour faire un équilibre entre la recherche globale et locale, la recherche globale est prioritaire lorsque  $w$  le facteur de pondération est proche de 1, une recherche locale est facilitée lorsque  $w$  est petit. L'équation PSO actualisée est donnée dans l'équation (2.56).

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest - x_i^k) \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \end{cases} \quad (2.56)$$



**Figure. 2.13 :** Mise à jour de la position de l'essaim de particules

La figure 2.13 donne une représentation graphique du processus de mise à jour de la vitesse dynamique. L'illustration donne une interprétation du problème d'optimisation multidimensionnelle où les variables ne sont pas sur le même axe.

## 2.5 Les facteurs du choix de la technique MPPT

Les facteurs importants qui permettront à l'ingénieur en conversion de puissance de prendre une décision éclairée sur les bonnes techniques MPPT pour des utilisations pratiques sont énumérés et expliqués ci-dessous :

### 2.5.1 Les capteurs

Dans les systèmes PV, des capteurs sont utilisés pour mesurer les valeurs de courant et de tension et, dans certains cas, le niveau d'irradiance et la température. Le nombre de capteurs requis pour mettre en œuvre MPPT affecte également le processus de décision. Pour une application à grande échelle, le nombre de capteurs pouvant être utilisés peut affecter sa complexité et sa précision. De plus, le nombre et le type de capteurs nécessaires dépendent largement de la technique MPPT. Généralement, les capteurs de tension sont moins encombrants que les capteurs de courant, ce qui les rend plus souhaitables pour les applications PV. Les capteurs d'irradiance ou de température sont très coûteux et peu courants.

### **2.5.2 Mise en œuvre**

Une autre considération importante devrait être la simplicité ou la complexité de la technique lors du choix de la meilleure technique MPPT à utiliser pour quelle application. Alors que certains utilisateurs finaux préfèrent des circuits analogiques simples tels que la technique de tension constante et la technique de tension ouverte, d'autres préfèrent travailler avec des circuits numériques tels que P&O et InCond malgré la complexité des circuits et les exigences de programmation.

### **2.5.3 Capacité à détecter plusieurs maximums locaux**

Dans de nombreux cas, les conditions environnementales rendent les panneaux solaires partiellement ou entièrement ombragés. Cela influence les niveaux d'éclairement énergétiques et pose le problème des points maximaux multiple sur le tracé. Étant donné que l'ombrage partiel (provenant d'arbres, d'objets volants ou d'autres bâtiments) peut-être un problème, le MPPT devrait être capable de contourner plusieurs maxima locaux. En outre, une quantité considérable de puissance est perdue si le MPP est mal suivi. Il est donc important de construire un algorithme complexe et flexible qui a la capacité de détecter le point maximum local le plus élevé parmi les multiples points maximaux qui se présenteront. La technique FLC présente un signal plus lisse avec moins de fluctuation en régime permanent.

### **2.5.4 Applications**

Certaines techniques MPPT sont plus adaptées à des applications spécifiques. Par exemple, les techniques d'escalade telles que P&O et InCond se sont révélées plus pratiques pour les applications photovoltaïques. La commande par logique floue et le réseau de neurones sont de bonnes options dans le cas des véhicules solaires car ils nécessitent une convergence rapide au MPP. Les systèmes photovoltaïques utilisés pour l'éclairage public consistent uniquement à recharger les batteries pendant la journée. Ils n'ont pas nécessairement besoin de contraintes fortes ; une mise en œuvre facile et peu coûteuse pourrait être plus importante, rendant les techniques à tension constante et à tension de circuit ouvert plus souhaitables.

### **2.5.5 Vitesse de convergence et efficacité de la technique**

Le temps nécessaire à un système MPPT hautes performances pour converger vers la tension ou le courant de fonctionnement requis doit être faible. Cependant, si la vitesse devient trop rapide, le point réel a tendance à rebondir autour du MPP en raison du bruit présent dans le système de conversion de puissance. Par conséquent, il est préférable de considérer d'abord la précision plutôt que la vitesse. Certes, une méthode précise et rapide serait à privilégier mais là encore il faudra tenir compte du coût de mise en œuvre.

### **2.5.6 Le coût**

En pratique, les techniques analogiques sont moins chères que les techniques numériques. En effet, dans les méthodes numériques, l'utilisation de capteurs nécessitant des microcontrôleurs et une programmation est nécessaire et s'accompagne de complexités système. Les capteurs de tension sont généralement plus coûteux que les capteurs de courant. C'est-à-dire que l'élimination des capteurs réduit le coût d'actualisation du système PV. En matière de coût, le nombre de capteurs détermine les ressources nécessaires pour mettre en place le système.

## **2.6 Comparaison des coûts des différentes techniques**

Une comparaison adéquate des coûts de ces techniques MPPT peut être faite en connaissant la technique (analogique ou numérique) adoptée dans le dispositif de contrôle, le nombre de capteurs et l'utilisation de composants de puissance supplémentaire, compte tenu des autres coûts (composants de puissances, composants électroniques, cartes, etc.) égales pour tous les appareils.

Les techniques CV et OV sont des techniques analogiques et donc moins chères à mettre en œuvre. Ils peuvent donc être sélectionnés s'il est nécessaire de minimiser le coût du système de contrôle. La technique P&O utilise généralement un capteur, d'où le coût de mise en œuvre

est généralement inférieur à celui de la technique InCond, car cette dernière nécessite plus d'un capteur pour une plus grande précision.

Après ces considérations, le tableau 1 résume les principales caractéristiques des techniques MPPT discutées et propose une classification simplifiée en tenant compte des coûts des capteurs, du microcontrôleur et des composants de puissance supplémentaires. Le tableau 2.2 sert de guide simple pour choisir une méthode MPPT appropriée.

**Tableau 2.2** Comparaison des différentes techniques [78].

	<i>MPPT Technique</i>	<i>Control Complexity</i>	<i>Sensed Parameters</i>	<i>Cost</i>	<i>Implementation Complexity</i>	<i>Applications</i>
1	<i>Constant Voltage</i>	<i>Simple</i>	<i>V</i>	<i>Inexpensive</i>	<i>Simple</i>	<i>Stand-alone</i>
2	<i>Open (Circuit) Voltage</i>	<i>Simple</i>	<i>I</i>	<i>Inexpensive</i>	<i>Simple</i>	<i>Stand-alone</i>
3	<i>P&amp;O</i>	<i>Medium</i>	<i>V, I</i>	<i>Expensive</i>	<i>Medium</i>	<i>Stand-alone</i>
4	<i>Modified P&amp;O</i>	<i>Medium</i>	<i>V, I</i>	<i>Expensive</i>	<i>Complex</i>	<i>Stand-alone</i>
5	<i>InCond</i>	<i>Medium</i>	<i>V and I</i>	<i>Expensive</i>	<i>Complex</i>	<i>Stand-alone</i>
6	<i>Fuzzy Logic</i>	<i>Complex</i>	<i>V or I</i>	<i>Expensive</i>	<i>Complex</i>	<i>Grid, Solar Vehicles etc</i>
7	<i>Neural Networks</i>	<i>Complex</i>	<i>V or I</i>	<i>Expensive</i>	<i>Complex</i>	<i>Grid, Pumping, DC motor drives etc.</i>

## 2.5 Conclusion :

La courbe caractéristique non linéaire du générateur PV nécessite l'ajout d'un étage intermédiaire de conversions de puissance afin de suivre le point de fonctionnement optimal en présence de conditions de fonctionnement variables. La présence de pics multiples dans la courbe puissance-tension rend le suivi plus difficile, car les techniques de recherche conventionnelles peuvent être piégées dans un extremum local caractérisé par une faible puissance de sortie.

L'utilisation d'algorithmes de recherche évolutionnaire permet de suivre l'extremum global indépendamment de la forme de la courbe caractéristique puissance-tension.

## Chapitre 03 :

### Diagnostic et surveillance des systèmes

#### Sommaire :

Chapitre 3. Diagnostic et surveillance des systèmes .....	55
3.1. Introduction .....	56
3.2. La définition et l'objectif du diagnostic .....	56
3.2.1. Définition .....	56
3.2.2. Le but du diagnostic .....	57
3.2.3. Concepts et terminologies .....	57
3.3. Différent types de défauts .....	58
3.4. Considérations générales sur les systèmes de diagnostics .....	59
3.4.1. Les critères d'évaluations d'un Système de diagnostic .....	59
3.5. Diverses étapes de diagnostic .....	60
3.5.1. La détection .....	60
3.5.2. La localisation .....	60
3.5.3. L'identification .....	61
3.6. Principe de diagnostic de défaut .....	61
3.6.1. Redondance physique (matérielle) .....	61
3.6.2. Redondance analytique .....	61
3.7. Génération et évaluation de résidus .....	62
3.7.1. Génération de résidus .....	62
3.7.2. Évaluation des résidus .....	63
3.8. Classification des méthodes de diagnostic .....	63
3.8.1. Approche signal .....	63
3.8.2. Méthode sans modèles .....	64
3.8.2.1. La reconnaissance des formes (RDF) .....	65
3.8.2.2. Les réseaux de neurones artificiels (RNA).....	66
3.8.2.3. Un système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS) .....	68
3.8.3. Méthode à base de modèles .....	72
3.8.3.1. Espace de parité .....	72
3.8.3.2. Estimation paramétrique .....	73
3.8.3.3. Estimation d'état (observateur) .....	74
3.9. Objectifs de la supervision .....	75
3.10. La surveillance .....	75
3.11. La surveillance via un réseau de capteurs sans fil .....	76
3.11.1. Réseau de capteurs sans fil pour la météo .....	76
3.11.1.1. Conception du système .....	76
3.11.1.2. Traitement et transmission des données .....	77
3.12. Conclusion .....	78

### **3.1 Introduction :**

En général, l'objectif de la maintenance est d'assurer la disponibilité maximale des installations de production à un coût optimal dans de bonnes conditions de qualité et de sécurité. Pour atteindre ces buts, les chercheurs et les scientifiques ont amélioré plusieurs techniques et approches de surveillance des équipements et des installations industrielles que ce soit à base de modèle ou bien sans modèle.

Le principe général des algorithmes de diagnostic se base sur l'exploitation des données enregistrées (relevées) sur le système et de la connaissance que l'on possède de son fonctionnement sain, sans défaut (pour la détection) ou de son fonctionnement défaillant (pour la localisation). Ces algorithmes développent des symptômes révélant le comportement défectueux et la nature du dysfonctionnement.

Ce chapitre est consacré pour la définition et l'explication détaillée du principe de diagnostic et la terminologie utilisée dans la littérature.

Il y aura également présentation de plusieurs approches et techniques utilisées dans le domaine de la supervision et la surveillance des systèmes, et aussi les principales méthodes de diagnostic.

### **3.2 LA Définition et objectif du diagnostic :**

#### **3.2.1 Définition :**

La définition du diagnostic selon la norme AFNOR et CEI stipule que : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test [57] ».

Cette définition résume les deux tâches fondamentales, du diagnostic :

- Observer les symptômes de la défaillance (détection) ;

- Identifier la cause de la défaillance en utilisant un raisonnement logique basé sur des observations (localisation),

### 3.2.2 Le but du diagnostic :

Le but principal d'un système de diagnostic est la prévision de l'apparition d'un défaut ou une anomalie le plus rapidement et le plus précisément possible. Pour pouvoir expliquer ce principe avec plus de détail et précision, nous allons d'abord définir ce que nous entendons par défaut (terminologies), puis nous rappellerons les fonctions et le principe des diagnostics tels que la détection, la localisation, et l'identification des défauts [58].

### 3.2.3 Concepts et terminologies :

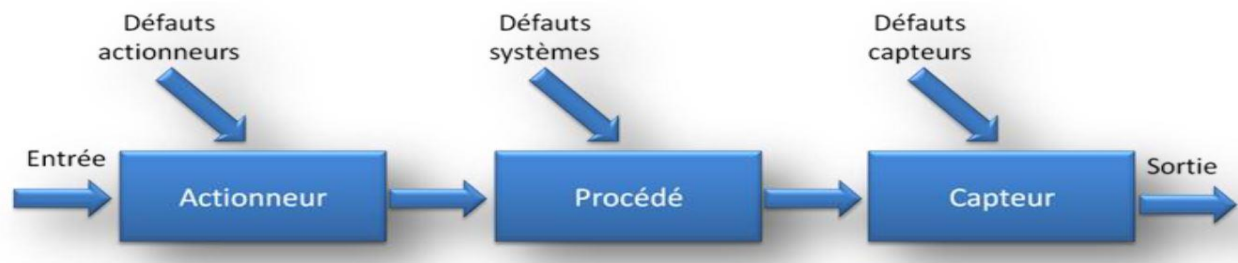
La définition et la terminologie de quelques termes utilisés dans le monde de diagnostic.

- **Une perturbation** Consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, non ou mal, représenté par un modèle de référence.
- **Une anomalie** : Est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique
- **Un défaut** Est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque cette dernière est hors spécification. Les défauts sont classés de la même manière que les défaillances.
- **Une défaillance** est un changement ou une interruption de la capacité de l'ensemble à exécuter la ou les fonctions requises avec les performances spécifiées dans les spécifications techniques.
- **Dysfonctionnement** : Est une anomalie intermittente qui se produit dans la fonction exécutée par l'opération.
- **La panne** Est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.

- **Un résidu** C'est un signal destiné à être un indicateur d'écarts fonctionnels ou comportementaux, nul en l'absence de défauts et non nul en leur présence.
- **Un symptôme** C'est une caractéristique d'un état fonctionnel ou d'un comportement anormal
- **La surveillance** est une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état du système physique, et consiste à enregistrer des informations ainsi qu'à identifier et signaler les écarts de comportement.
- **La sensibilité** Représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter.
- **La supervision** est la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées pour le faire fonctionner en cas de défaillance.

### 3.3 Différent types de défauts :

Un défaut correspond à un écart (une déviation) par rapport au comportement normal d'un système, de sa commande ou de son système d'instrumentation. Les défauts peuvent être aléatoires ou progressifs, dans le cas du vieillissement ou de l'usure. Les défauts peuvent apparaître dans différents endroits du système [58]. Une classification pertinente des défauts peut être basée sur la nature du composant affecté. Nous distinguons donc trois types de défauts liés aux : actionneurs, aux systèmes et aux capteurs (figure 3.1).



**Figure. 3.1** : Divers types de défauts agissant sur un système [58]

- **Défauts actionneurs** : modélisés en général comme des signaux additifs aux signaux d'entrée, ils agissent au niveau de la partie opérative et détériorent ainsi le signal d'entrée du système.
- **Défauts systèmes** : modélisés en général comme des dynamiques additionnelles avec une matrice de distribution, ils s'identifient par la modification des caractéristiques du système.
- **Défauts capteur** : modélisés en général par des signaux additifs aux signaux de sortie, ils fournissent une mauvaise image de l'état physique du système [58].

### 3.4 Considération générale sur les systèmes de diagnostic :

Il existe plusieurs critères pour évaluer la performance d'un système de diagnostic, parmi ceux-ci on peut citer :

- Rapidité ;
- Isolabilité ;
- Robustesse ;
- Adaptabilité ;
- Identification de défauts multiples ;
- La sensibilité

#### 3.4.1 Les critères d'évaluations d'un Système de diagnostic :

- **Rapidité** : lorsqu'il y a une panne dans la chaîne de production, le système de surveillance doit réagir rapidement dans ce cas, ainsi que le système de diagnostic rapide pour éviter les dommages physiques et humains [59].
- **Isolabilité** : Selon [60,61], c'est la capacité du système de surveillance à faire la distinction entre différents schémas de dysfonctionnement du processus. Une panne provoque généralement une série d'alarmes et l'appareil défectueux peut être difficile à détecter. Le

degré de capacité à isoler les défaillances est lié à la structure résiduelle (le signal de détection d'erreur) et à la procédure de détection effectuée.

- **Robustesse** : Il s'agit de vérifier la capacité du système de surveillance à détecter et isoler les erreurs qui affectent le processus de surveillance dans un environnement incertain. Il est à noter que le critère de durabilité concerne non seulement les techniques de génération des déchets, mais aussi les techniques d'évaluation. Une évaluation résiduelle précise est particulièrement pertinente pour le problème de seuil dans le but de réduire les fausses alarmes [59].
- **Sensibilité** : Caractérise la capacité du système de diagnostic à détecter des défauts d'une certaine amplitude, elle dépend non seulement de la structure des résidus, mais aussi du rapport entre le bruit de mesure et le défaut [62].

### 3.5 Diverses étapes de diagnostic :

Le terme diagnostic correspond à la caractérisation de l'erreur, pour mettre en œuvre cette dernière, il faut passer par un certain nombre d'étapes qui sont liées les unes aux autres.

#### 3.5.1 La détection :

Ce processus permet de déterminer si le système fonctionne normalement ou non.

- Probabilité de fausse détection : conduit à des arrêts ou des reconfigurations inutiles,
- Probabilité de non-détection : peut entraîner une panne intolérable des systèmes de sécurité de haut niveau (aéronautique, nucléaire, etc.).

#### 3.5.2 La localisation :

C'est l'identification de l'élément qui a causé le défaut. Il est parfois impossible de localiser les interactions entre les composants du système et les capteurs (instrumentation). La solution consiste à isoler un sous-système avec des composants susceptibles de contenir la ou les défauts [60].

### 3.5.3 L'identification :

L'identification a pour but de caractériser plus précisément le dysfonctionnement et d'identifier les causes qui ont conduit à la panne constatée.

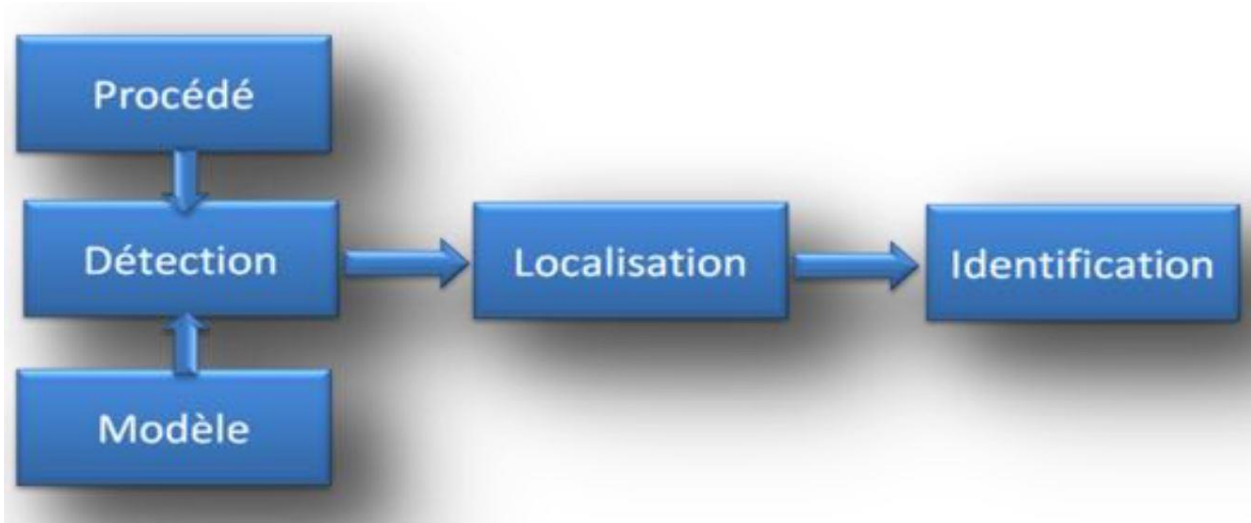


Figure. 3.2 : Différentes étapes de diagnostic [58]

## 3.6 Principe de diagnostic de défaut :

### 3.6.1 Redondance physique (matérielle) :

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs, actionneurs, processeurs et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière. Un principe de vote majoritaire est appliqué sur les valeurs redondantes pour savoir s'il y a une faute ou non. Elle entraîne un coût important en instrumentation, mais fiable, sûr et simple à implanter [58].

### 3.6.2 Redondance analytique

L'analyse de redondance (également appelée analyse en composantes principales des variables instrumentales) est une technique pour deux ensembles de variables, l'un étant dépendant de l'autre. Son objectif est la maximisation de la variance expliquée des variables dépendantes par une combinaison linéaire des variables explicatives. La technique est généralisée aux variables qualitatives ; il donne alors implicitement une mise à l'échelle « optimale » simultanée des variables

qualitatives dépendantes. Des exemples sont tirés de l'enquête néerlandaise sur la situation de la vie de 1977, utilisant la satisfaction à l'égard de la vie et le bonheur comme variables dépendantes. L'analyse aboutit à une échelle de bien-être, définie par les variables explicatives État matrimonial, Scolarité, Revenu et Activité. [64,65].

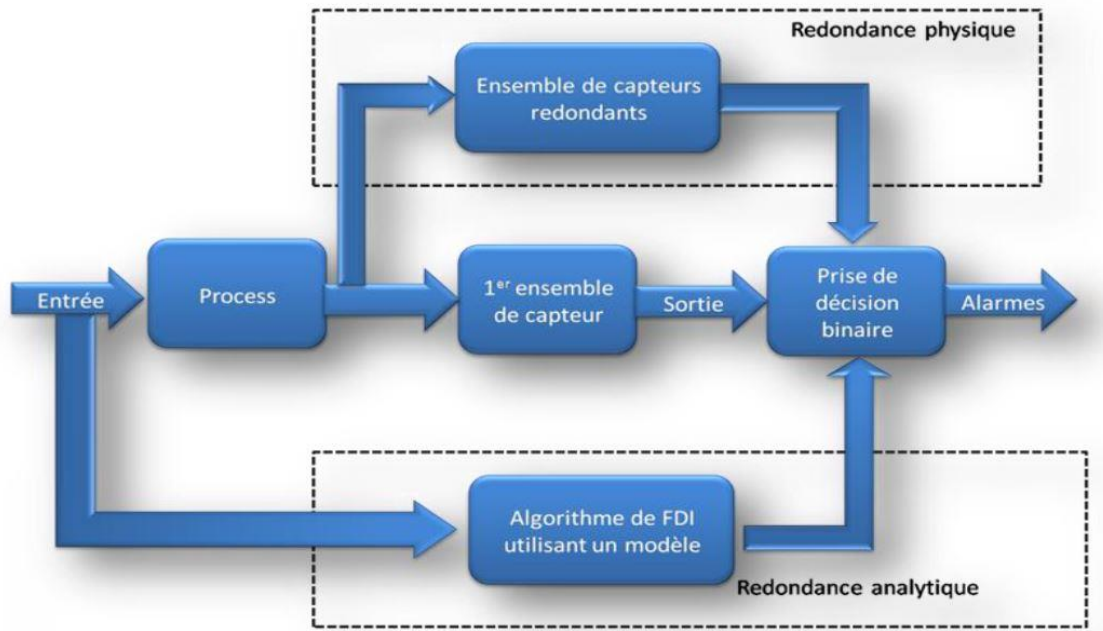


Figure. 3.3 : Redondance analytique et physique [58]

### 3.7 Génération et évaluation de résidus :

Un résidu ou indicateur de faute est un signal habituellement électrique qui exprime une contradiction entre les informations en temps réel et les informations théoriques fournies par un modèle (supposées décrire correctement le processus).

#### 3.7.1 Génération de résidus :

Les résidus générés, en utilisant la technique par redondance analytique, se basent sur les relations nominales du système entre l'entrée  $U$  et la sortie mesurée  $Y$ . Les relations de redondance à évaluer peuvent être considérées comme la dynamique de la relation entrée/sortie. E l'occurrence d'une faute, cette relation n'est jamais satisfaite et des résidus non nuls ne sont obtenus. Ces résidus

sont utilisés pour prendre les décisions appropriées. Ils seront évalués dans la composante de la logique de décision de défaut pour déterminer le temps d'apparition de défaut et localiser l'origine de ce défaut [66].

### **3.7.2 Évaluation des résidus :**

Un résidu tend vers une valeur égale ou proche à zéro dans le cas sans fautes, et s'éloigne d'une manière significative de cette valeur après l'apparition d'un défaut. Il est lié à la différence entre les sorties estimées et les sorties mesurées [67].

## **3.8 Classification des méthodes de diagnostic :**

Les techniques de diagnostic des défauts sont très variées et diverses [68]. On les distingue à partir de leur type de connaissance utilisée pour vérifier la cohérence entre les références et les observations réelles [67]. Ces méthodes de diagnostic se répartissent en deux classes : les méthodes sans modèle et. Les méthodes avec modèle. Dans cette partie, nous expliquons une classification des principales techniques de diagnostic rencontrées dans la littérature.

### **3.8.1 Approche signal :**

Le diagnostic d'une défaillance ou d'une dégradation fait appel le plus souvent à l'utilisation de signatures. Ces signatures contiennent les informations jugées pertinentes par les spécialistes des matériaux pour la détection d'une défaillance ou d'une dégradation. La complexité des signatures dépend de la nature des systèmes et des matériels à diagnostiquer et varie en fonction de l'anomalie recherchée. Cette approche fait appel à des techniques du traitement de signal.

- **Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux [69]**

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuités dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes

se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale des entraînements électriques consiste à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine [70]. Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être :

- ❖ Courants absorbés;
  - ❖ Flux de dispersion;
  - ❖ Tension d'alimentation;
  - ❖ Vitesse rotorique;
  - ❖ Vibrations;
  - ❖ Tension de neutre.
- **Méthode d'analyse temps-fréquence et temps échelle** [71]

L'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier (TF), fournit une bonne description des signaux stationnaires et pseudostationnaires, mais présente de nombreuses limitations quand les signaux à analyser ne sont pas stationnaires. Dans ce cas, la solution serait d'utiliser ce qu'on appelle les outils d'analyse temps-fréquence. Parmi ces méthodes, on peut citer:

- Transformée de Fourier sur une fenêtre glissante;
- Transformée en Ondelettes;
- Transformée de Wigner Ville;
- Transformée d'Hilbert-Huang.

### **3.8.2 Méthodes sans modèles :**

Cette méthode présume que les connaissances du processus se limitent à son observation passée et présente. Elle s'appuie sur l'expertise humaine. L'historique de ce système constitue, une

base de données qui sert à l'extraction de descripteurs dans divers modes de fonctionnements du processus.

### 3.8.2.1 La reconnaissance des formes (RDF) :

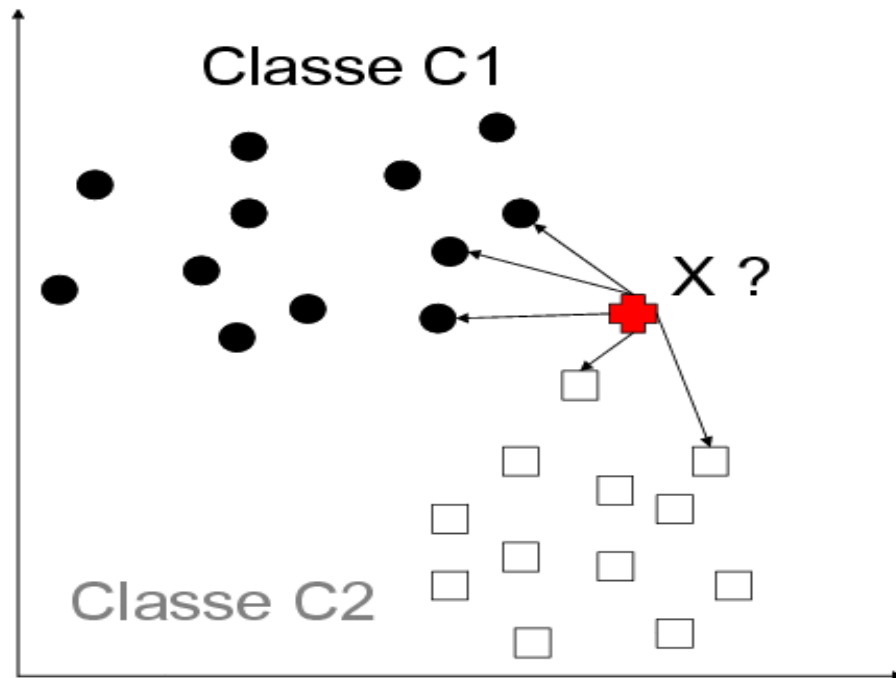
Les techniques de diagnostic qui utilisent la reconnaissance des formes ne sont pas nombreuses [72,73]. Elles se basent sur le problème de reconnaissance de situations significatives d'un système dans un environnement complexe ou noyé dans le bruit. Le principe de la RDF repose sur la représentation numérique du  $k^{\text{ème}}$  objet observé par le vecteur  $x_k = [x_{k1}, \dots, x_{kq}]^k$  Appelé "vecteur forme", où :

$x_{kj}$  indique la  $j^{\text{ème}}$  caractéristique associée à l'objet ;

$k$ : température, pression, débit, fréquence de bruit sonore, etc.

$q$  : la taille du vecteur forme .

Un vecteur de forme est extrait de plusieurs mesures. Les règles de décisions permettent de classer les observations décrites par le vecteur de forme par rapport aux autres fonctionnements avec ou sans défaut. Pour les classer, il faut être en mesure d'établir pour l'un ou l'autre un mode de fonctionnement. Il faut avoir une base de données pour construire la classe correspondant au défaut créé. Une autre méthode consisterait à calculer le vecteur de forme en effectuant les simulations numériques. Dans la dernière configuration, il faut un modèle comportemental précis pour avoir des paramètres proches de la réalité [72].



**Figure. 3.4 :** Principe de la reconnaissance des formes [58]

### 3.8.2.2 Les réseaux de neurones artificiels (RNA) :

Un détecteur RNA a été testé dans de nombreux types de défauts, de classification de défauts, de localisation de défauts et de résistances différentes. Sur la base des résultats obtenus, il a été recommandé que la technique RNN puisse être appliquée dans les installations photovoltaïques pour détecter tout type de défaut. [66]. on peut même l'appliquer à la ligne de transmission d'énergie pour détecter tout type de défaut. Le détecteur de défauts RNA est capable de détecter le défaut, de le localiser et de le classer sur un système photovoltaïque. RNA a des structures efficaces, fiables, précises et capables d'apprentissage. [74]

- **Description des réseaux de neurones artificiels :** C'est une bonne technique qui fonctionne comme le cerveau d'un être humain et qui est également capable d'apprendre (apprentissage). De nombreuses formations sont nécessaires avant que les RNA puissent être appliqués à une installation particulière. Les RNA sont constituées d'un ensemble de

neurones qui sont connectés et disposés en plusieurs couches, leur structure se compose de couches d'entrée, de couches cachées et de couches de sortie [75]

- **Applications du RNA.:** Les systèmes électriques se développent très rapidement et il est important de localiser et d'identifier les défauts sur le système en utilisant des techniques qui sont plus rapides, fiables et précises. RNA a été proposé à cet égard pour traiter la classification des défauts et la localisation des défauts sur l'installation électrique [76].
- **Test de RNA :** Les résistances aux défauts, les emplacements des défauts et d'autres types de défauts ont été utilisés pour tester la détection des défauts RNA et les classificateurs de défauts [59].
- **Les Avantages et les inconvénients des RNA :** Les tableaux ci-dessous donnent un aperçu des avantages et des inconvénients de RNA et les comparent aux résultats de Fuzzy Logic Control. Il est clair que les deux méthodes peuvent résoudre une vaste gamme de problèmes, chacune avec ses avantages et ses inconvénients respectifs. Chaque méthode, à savoir FLC et RNA, peut être appliquée à différents problèmes, chacun avec son objectif d'application spécifique en fonction de la nature et de la complexité du problème à résoudre. Chaque méthode, à savoir FLC et RNA, peut être appliquée à différents problèmes, chacun avec son objectif d'application spécifique en fonction de la nature et de la complexité du problème à résoudre.

- **Les Avantages :**

<b>Logique floue</b>	<b>RNA</b>
Adaptation rapide aux changements	Capacité d'apprentissage par la formation
Haut degré de tolérance à l'incertitude	Détection plus rapide des défauts
Bon fonctionnement sur les régimes de contrôle	Protéger intelligemment le système électrique
Réduire les effets de non-linéarité	Des temps de calcul plus rapides sont nécessaires
Capacité d'apprentissage limitée, nécessite de l'intelligence	Fonctions d'adaptation, pour apprendre à résoudre de nouveaux problèmes
Capacité d'approximation inhérente	Il détecte et classe le défaut
Haute précision de tolérance	Capacités de rejet du bruit par l'IA

- **Les inconvénients**

<b>Logique floue</b>	<b>RNA</b>
Difficile à modéliser mathématiquement, et nécessite des connaissances spécialisées.	Nécessite une analyse minutieuse et approfondie

### 3.8.2.3 Un système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS) :

L'algorithme ANFIS a été introduit par Jang [18], qui consiste en un réseau adaptatif où les entrées sont floutées dans la couche 1 (couche de floutage) à l'aide de fonctions d'appartenance et passent ensuite par des étapes connues sous le nom de couche cachée où elles sont multipliées (couche 2) et normalisées (couche 3) par des poids et ajoutées aux biais. Les paramètres de

pondération sont ajustés à l'aide d'un algorithme d'apprentissage dédié et les règles floues sont utilisées pour obtenir un système d'inférence qui imite une correspondance entrée-sortie souhaitée [18].

Les règles de l'algorithme ANFIS sont données comme suit :

$$\text{Si } T \text{ est } A_i \text{ et } G \text{ est } B_i \text{ alors } z_i = p_i T + q_i G + r_i$$

Où  $A_i$  et  $B_i$  sont des ensembles flous,  $T$  et  $G$  sont des entrées du système qui représentent respectivement la température et le rayonnement solaire. La sortie de chaque règle  $z_i$  a  $p_i$ ,  $q_i$  et  $r_i$  comme paramètres de conception. La sortie du système (couche 5), désignée par PMPP, utilise le 4.6

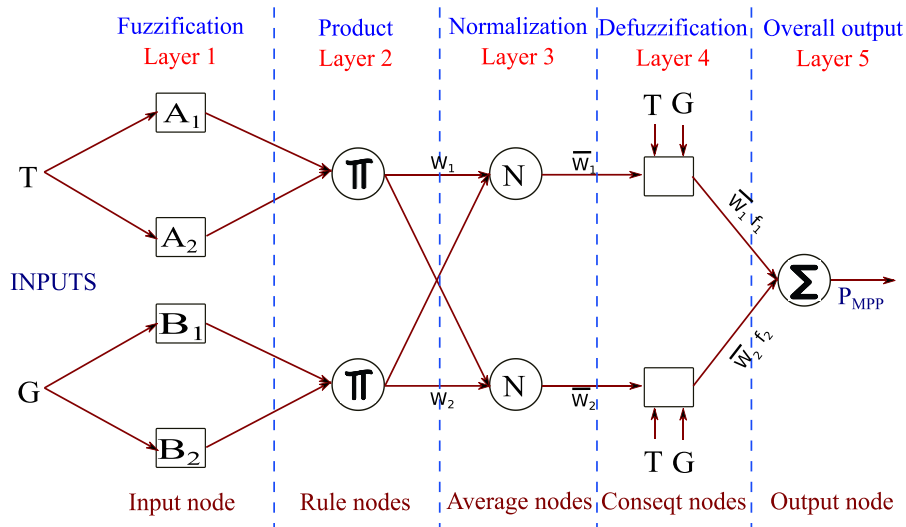


Figure. 3.5. Structure interne du modèle ANFIS [82].

Résultat de la défuzzification (couche 4). La structure du réseau ANFIS est présentée à la figure 3.5

- **Couche de fonction d'appartenance d'entrée :** Chaque nœud adaptatif  $i$  de cette couche a une fonction d'appartenance de nœud.  $O_i^1$  est le degré d'appartenance aux ensembles flous ( $A_1, A_2, B_1, B_2$ ) donnés comme suit :

$$\begin{cases} O_i^1 = \mu_{A_i}(T), & i = 1,2 \\ O_i^1 = \mu_{B_i}(G), & i = 3,4 \end{cases} \quad (3.1)$$

Les fonctions d'appartenance floues  $\mu_{A_i}(T)$  et  $\mu_{B_i}(G)$  (G) sont données dans l'équation (4.2). Ce sont des fonctions d'appartenance en forme de cloche avec une plage de [0,1] qui sont les suivantes :

$$\mu_{A_i}(T) = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{x - c_i}{a_i} \right)^{2b_i} \right]}, i = 1, 2 \quad (3.2)$$

où  $a_i$ ,  $b_i$  et  $c_i$  sont les paramètres de la fonction d'appartenance.

- **Couche de règles** : Chaque nœud est étiqueté M pour cette couche. Sa sortie est la multiplication de toutes les entrées qui représentent également les poids  $\omega_i$  de chaque règle comme dans l'équation (4.3).

$$O_i^2 = \omega_i = \mu_{A_i}(T) \cdot \mu_{B_i}(G), i = 1, 2 \quad (3.3)$$

- **Couche de normalisation** : Les nœuds fixes sont étiquetés N pour cette couche qui calcule le rapport entre le poids de la  $i^{\text{ème}}$  règle et la somme des poids de toutes les règles comme suit.

$$\sum_{i=1}^2 \omega_i, i = 1, 2 \quad (3.4)$$

Les sorties des couches sont des poids normalisés en utilisant l'équation (4.5).

$$O_i^3 = \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^2 \omega_i}, i = 1, 2 \quad (3.5)$$

- **Couche de fonction d'appartenance de sortie** : Chaque nœud adaptatif  $i$  de cette couche a une fonction de nœud donnée par l'équation (4.6).

$$O_i^4 = \bar{\omega}_i \cdot z_i = \omega_i [p_i T + q_i G + r_i], i = 1, 2 \quad (3.6)$$

Où  $p_i$ ,  $q_i$  et  $r_i$  sont des paramètres adaptatifs.

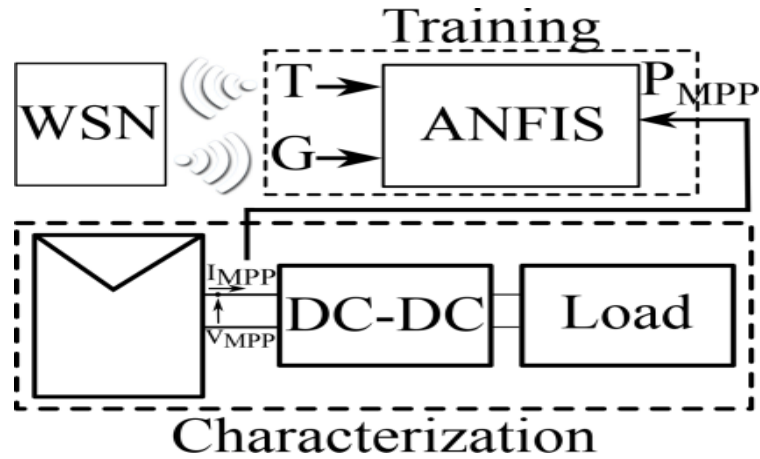
- **Couche de sortie** : Ce nœud est étiqueté S. Il donne la sortie globale comme la somme de ses entrées, comme dans l'équation (4.7).

$$O_i^5 = P_{MPP} = \sum_{i=1}^2 \bar{\omega}_i \cdot z_i = \frac{\sum_{i=1}^2 \omega_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^2 \omega_i} \quad (3.7)$$

L'algorithme de formation du réseau ANFIS est une descente de gradient et la combinaison des moindres carrés qui comporte deux étapes afin d'augmenter son efficacité et de ne pas être piégé dans des minima locaux. Tout d'abord, des paramètres fixes sont considérés. Ensuite, ils sont transmis à l'algorithme d'estimation des moindres carrés, puis ils sont modifiés en utilisant la technique de descente de gradient par rétro propagation basée sur des mesures d'erreur.

➤ **Construction du modèle ANFIS :**

Les données climatiques environnementales sont reçues du WSN et introduites dans la structure ANFIS. Le point d'exploitation de la puissance maximale (MPP) est extrait de la matrice PV, comme le montre la figure 3.6, à l'aide d'un algorithme de caractérisation mis en œuvre dans la station de base qui fait varier le cycle de service contrôlant le convertisseur DC-DC dans la plage [10 % 98 %].



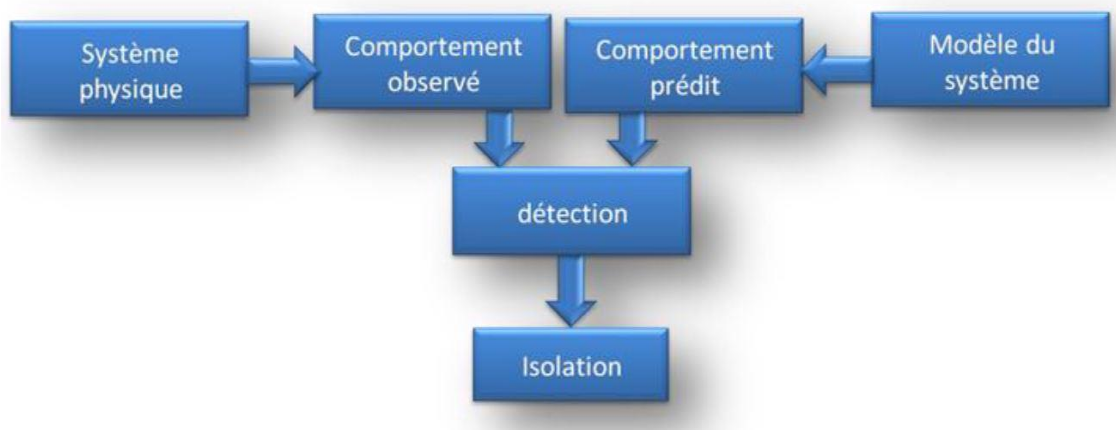
**Figure 3.6.** L'entraînement du modèle ANFIS [82].

Le courant et la tension du générateur photovoltaïque sont acquis en parallèle afin de construire la courbe caractéristique puissance-tension (P-V). Le PMPP est ensuite extrait en recherchant le point

extrême de la courbe P-V. Une base de données est construite afin d'entraîner le modèle ANFIS qui inclut différentes conditions de fonctionnement.

### 3.8.3 Méthode à base de modèles :

L'approche ou bien la technique de diagnostic à base de modèles permet le suivi et la supervision en ligne du système. Elle consiste à embarquer un modèle du système permettant l'estimation de son état. Un défaut est alors détecté par comparaison, en temps réel, entre les mesures issues des capteurs, et de l'état prédit. Le diagnostic est ensuite établi en déterminant l'état (de défaut) du système qui est cohérent avec les mesures et qui permet d'expliquer la faute [77]. Nous marquons trois grandes approches selon la connaissance: l'approche par estimation d'état (à base d'observateur), celle par espace de parité, et enfin celle par l'estimation de paramètres, [77]. La figure suivante montre le principe des approches de diagnostic avec modèles.



**Figure. 3.7 :** Principe des approches de diagnostic avec modèles [58]

#### 3.8.3.1 Espace de parité :

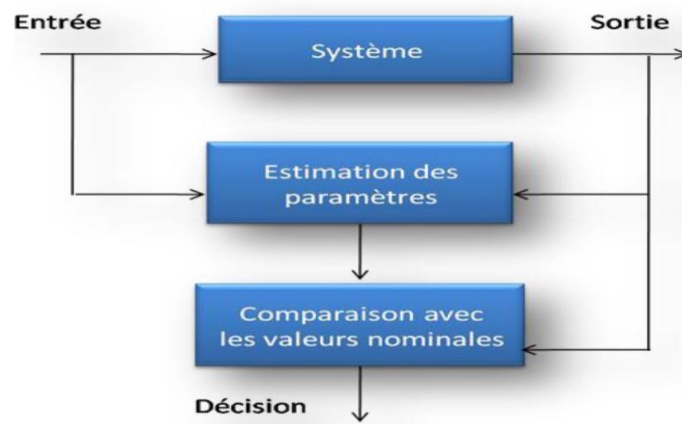
L'espace de parité est un espace dans lequel tous les éléments sont des résidus (ou vecteurs de parité). Les résidus et les vecteurs de parité sont synonymes dans ce contexte. L'espace de parité peut aussi être appelé espace résiduel. L'exaltation (ou équation) qui génère le résidu (vecteur de parité) est appelée relation de parité (ou équation). La tâche de FDI est alors de construire un espace

de parité et d'analyser ses éléments. C'est ce que nous entendons par l'approche de l'espace de parité pour les FDI. [75]

Le terme « parité » a d'abord été utilisé en relation avec les systèmes logiques numériques et la fiabilité des logiciels informatiques pour permettre d'effectuer des « contrôles de parité » pour la vérification des erreurs. Dans le domaine FDI, il a une signification similaire dans le contexte de la fourniture d'un indicateur de la présence d'un défaut (ou d'une erreur) dans les composants du système. [58]

### 3.8.3.2 Estimation paramétrique :

Nous nous sommes principalement intéressés à la théorie des probabilités : quels événements peuvent se produire avec quelles probabilités, étant donné une famille de modèles et des choix pour les paramètres. Ceci n'est utile que dans le cas où nous connaissons la famille de modèles précise et les valeurs des paramètres pour la situation d'intérêt. Mais c'est l'exception, pas la règle, tant pour la recherche scientifique que pour l'apprentissage et l'inférence humains. La plupart du temps, nous sommes dans la situation de traiter des données dont nous ne connaissons pas la source générative.

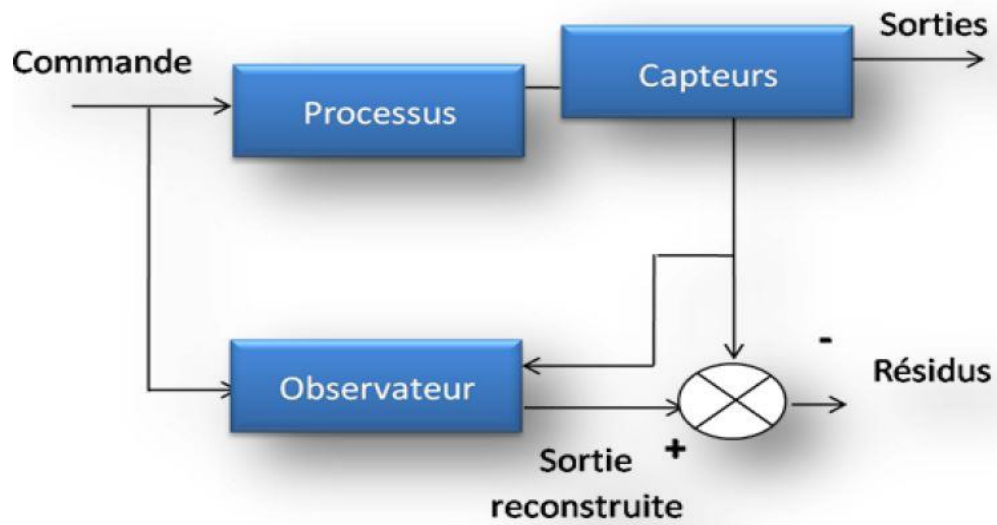


**Figure. 3.8.** Principe de l'approche par estimation des paramètres [58]

### 3.8.3.3 Estimation d'état (observateur) :

Une approche semblable à l'estimation des paramètres est l'estimation de l'état [77]. La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état consiste à comparer des fonctions de sorties

estimées avec les mêmes fonctions de sorties mesurées [80].cette méthode s'est beaucoup développée, car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles[75].Plusieurs techniques d'observation ont été appliquées au diagnostic à l'aide d'un capteur.



**Figure. 3.9** Principe général d'un estimateur de sortie [58]

Une manière brute d'observer les états d'un système consiste à dériver numériquement l'information mesurée grâce aux capteurs. L'expérience a montré que cette méthode a l'inconvénient de donner des résultats erronés à cause de l'amplification du bruit due aux imperfections des mesures.

Pour remédier à ce problème, KALMAN-BUCY ont introduit une solution pour les systèmes linéaires stochastiques. Leur résultat est connu actuellement par le Filtre de KALMAN. Ce Filtre donne aussi de bons résultats pour les systèmes déterministes [81]. Ensuite, LUENBERGER a fondé la théorie d'un observateur qui porte son nom " Observateurs de LUENBERGER". Son idée est d'ajouter au modèle mis sous la forme canonique compagnon (BRUNOVSKY) une correction à l'aide de la mesure fournie par les capteurs.

### **3.9 Objectif de la supervision :**

Actuellement, parmi les principaux objectifs des compagnies d'électricité figurent l'introduction de nouvelles solutions de supervision, le diagnostic et l'évaluation de l'état technique

des actifs et l'évaluation de leur durée de vie, mais aussi, le choix de la maintenance et la possibilité de prolonger la durée de vie des actifs existants sous leur gestion. La supervision de l'équipement électrique doit être effectuée pour recueillir suffisamment d'informations sur l'équipement surveillé pour estimer son état technique. La supervision de l'état implique le développement de systèmes dédiés, dans le cas des systèmes de surveillance et de diagnostic, le problème essentiel est l'analyse des données acquises. Dans certains cas, les données acquises sont facilement converties en informations utiles sur l'équipement, et dans d'autres, ce n'est pas le cas. Pour cette raison, l'importance des paramètres surveillés doit être soigneusement établie avant que les données puissent être acquises.

### **3.10 La Surveillance :**

La surveillance est l'une des techniques de diagnostic les plus étendues, mais il est important de la réaliser de manière efficace en recueillant des données sur les systèmes qui affectent la consommation d'énergie et le confort de l'utilisateur final. De cette manière, les chercheurs ont développé un système de surveillance basé sur le produit commercial disponible, mais dans une perspective de performance énergétique pour mesurer de manière réaliste la consommation d'énergie et les paramètres de confort.

En gros, un système de surveillance est composé de capteurs, de passerelles et d'un système d'acquisition de données. Ces composants sont inclus dans un réseau, qui peut avoir différentes architectures. L'architecture du système de surveillance spécifie la connexion entre les différents composants de l'installation : capteurs, actionneurs et contrôleurs. L'objectif principal du système de surveillance installé la mise en service et d'analyser le comportement du bâtiment en termes d'énergie ainsi que le confort et le comportement des utilisateurs finaux. À cet égard, une étude approfondie des conditions et des systèmes du bâtiment est nécessaire, afin de définir les paramètres à surveiller.

### 3.11 La surveillance via un réseau de capteur sans fil :

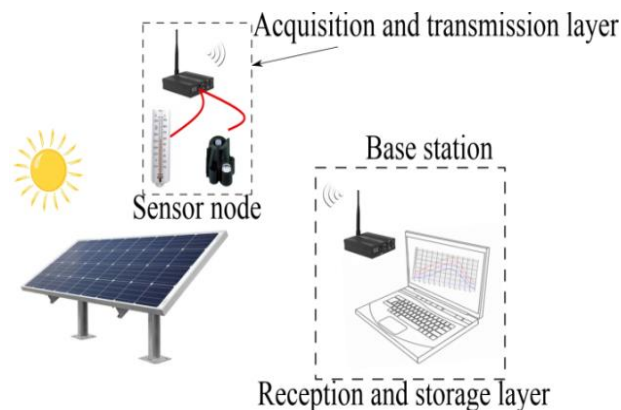
La surveillance en ligne est d'une grande importance pour une gestion efficace de l'énergie dans les systèmes de production d'énergie renouvelable.

Les WSN sont utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour plusieurs raisons, notamment leur compatibilité avec un déploiement distribué, leur alimentation en énergie solaire, leur faible coût et leur facilité de maintenance [11].

#### 3.11.1. Réseau de capteurs sans fil pour la météo :

##### 3.11.1.1 Conception du système :

Le système météorologique sans fil est basé sur deux couches principales : la couche d'acquisition et de transmission (capteurs de température et d'irradiation du panneau PV en plus du microcontrôleur et de l'émetteur-récepteur sans fil), et la couche de réception et de stockage (représente la couche où le traitement et le stockage des données sont effectués).



**Figure. 3.10.** Architecture d'un réseau de capteurs météorologiques sans fil [82].

La figure 3.10 montre l'architecture globale du système conçu, qui peut être considéré comme un réseau de capteurs sans fil (WSN) (un réseau ad hoc de nœuds) composé de capteurs capables de collecter et de transmettre des données de manière autonome. Le WSN est constitué des éléments suivants :

- **Nœud de capteur** : unité de conversion chargée de capturer des quantités physiques (température du panneau PV et rayonnement solaire) et de les transformer en quantités numériques à transférer à la station de base. Les nœuds de capteurs peuvent être divisés en quatre unités principales : unité de capteur ou de nœud, unité de traitement des données, unité de transmission des données et unité d'alimentation.
- **Station de base** : dans le cas d'une topologie centralisée (où une seule station de base est utilisée). La station de base se compose d'une unité de traitement, d'un émetteur-récepteur pour communiquer avec les nœuds de capteurs et d'une autre unité de communication adaptée à la communication avec l'interface utilisateur. Elle est également responsable du stockage des données acquises.

### 3.11.1.2 Traitement et transmission des données :

- **Collecte et étalonnage des données** : Le WSN est conçu pour surveiller les panneaux photovoltaïques en contrôlant la température du panneau et l'irradiation solaire, la quantité physique est d'abord collectée par les capteurs puis transférée sous forme de quantités binaires au microcontrôleur, ce dernier traite les données reçues en corrigeant les valeurs à l'aide d'un ensemble d'équations appelées équations de calibration. Ces données diffusées sont transmises au nœud de gestion pour être analysées, stockées et affichées.
- **Modes de transmission des données** : Il existe plusieurs types de transmission de données du nœud capteur au nœud gestionnaire. Les trois principaux modes sont :
  - **Le mode temporel** : la collecte et le transfert des données sont liés dans le temps, par période de collecte ou en temps réel. Cette période peut être inférieure à quelques secondes ou supérieure à quelques jours selon l'application. Par conséquent, la quantité de données échangées dans le réseau dépend de la fréquence des mesures.

- **Mode événement** : dans ce cas, les données ne sont envoyées que si un événement particulier se produit. Par exemple, un nœud de capteur peut envoyer une alarme si la température du panneau photovoltaïque dépasse un seuil fixe.

- **Mode demande** : dans ce mode, les informations sont envoyées uniquement si l'utilisateur en fait la demande. Ce mode est destiné aux systèmes adaptés à l'utilisateur.

### **3.12 Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'état de l'art des méthodes de surveillance des systèmes industriels. Les principaux éléments d'une démarche de surveillance d'un processus ont été également définis.

Nous avons tout d'abord donné quelques définitions et terminologies utilisées dans ce domaine. Les méthodes de diagnostic traitées dans la littérature se composent de trois étapes essentielles, la détection, la localisation et l'identification. La technique de diagnostic appliquée pour la surveillance des systèmes dépend du type de présentation du système à surveiller (avec ou sans modèle), ainsi que le type de défauts (défaut capteur, actionneur ou système).

## Chapitre 04 :

### Essais expérimentaux, résultats, et discussions

#### Sommaire :

Chapitre 4. Essais expérimentaux, résultats, et discussions.....	79
4.1. Installation expérimentale .....	80
4.2. Caractérisation et construction du modèle ANFIS .....	82
4.3. Optimisation des performances basées sur les métaheuristiques .....	86
4.4. Conclusion .....	92

#### **4.1 Installation expérimentale :**

Les composants utilisés pour mener des expériences conséquentes sont illustrés à la figure 4.1. Lorsque le convertisseur élévateur utilise les condensateurs d'entrée et de sortie avec les mêmes caractéristiques ( $C = 1000 \mu\text{F}$ , nominal pour 160 V) et une inductance de puissance à courant élevé avec les données suivantes ( $L = 250 \mu\text{H}$  nominal pour 8A) avec un interrupteur principal MOSFET à une fréquence de commutation de 30Khz et un redresseur à commutation rapide. L'instrumentation associée comprend un capteur de courant ACS712 et un diviseur de tension pour les mesures de tension. Le WSN comprend des capteurs composés d'un capteur de rayonnement solaire 6450 Davis Instruments et d'un capteur de température LM35 en plus d'un émetteur-récepteur nRF24101+ utilisé comme émetteur de données. Un Arduino Nano est utilisé pour gérer l'acquisition des données dans le WSN et également la communication avec la station de base.

La station de base est composée d'un microcontrôleur Arduino DUE utilisé comme contrôleur de gestion de l'alimentation qui envoie un signal de commande pour modifier le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque à l'aide du convertisseur DC-DC boost illustré à la figure 4.1. La communication avec le nœud de capteur est réalisée à l'aide d'un nRF24101+ qui permet la réception des données météo du WSN. Le stockage des données et l'interface utilisateur sont réalisés à l'aide d'une communication série USB avec l'ordinateur portable illustré à la figure 4.2. Les résultats expérimentaux sont analysés et stockés à l'aide d'un oscilloscope Tektronix DPO5204B illustré à la figure 4.2.

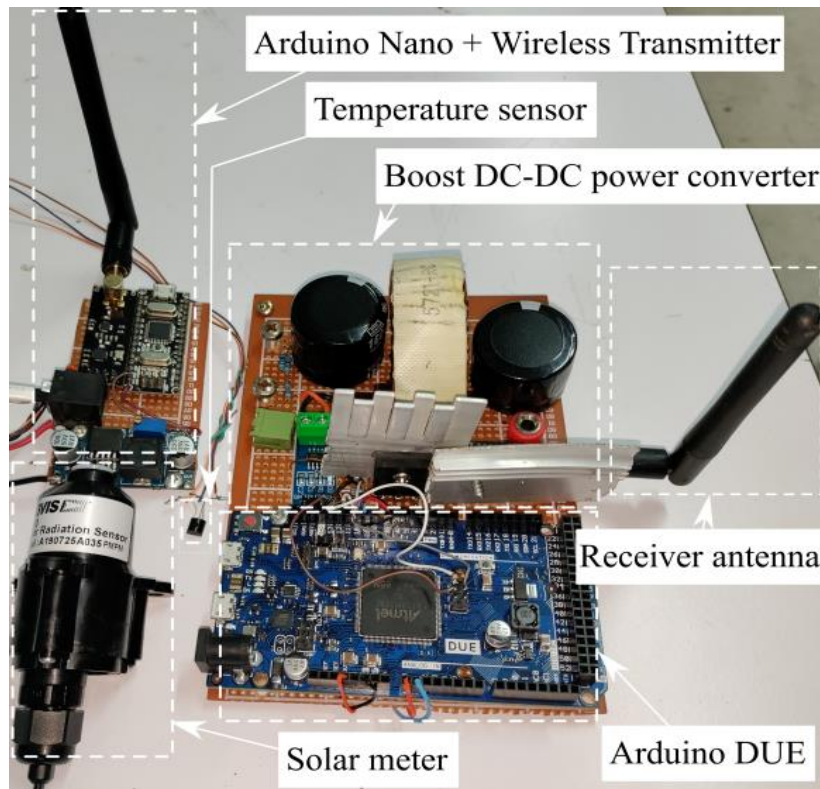


Figure. 4.1 Composants du WSN et de la station de base [82].

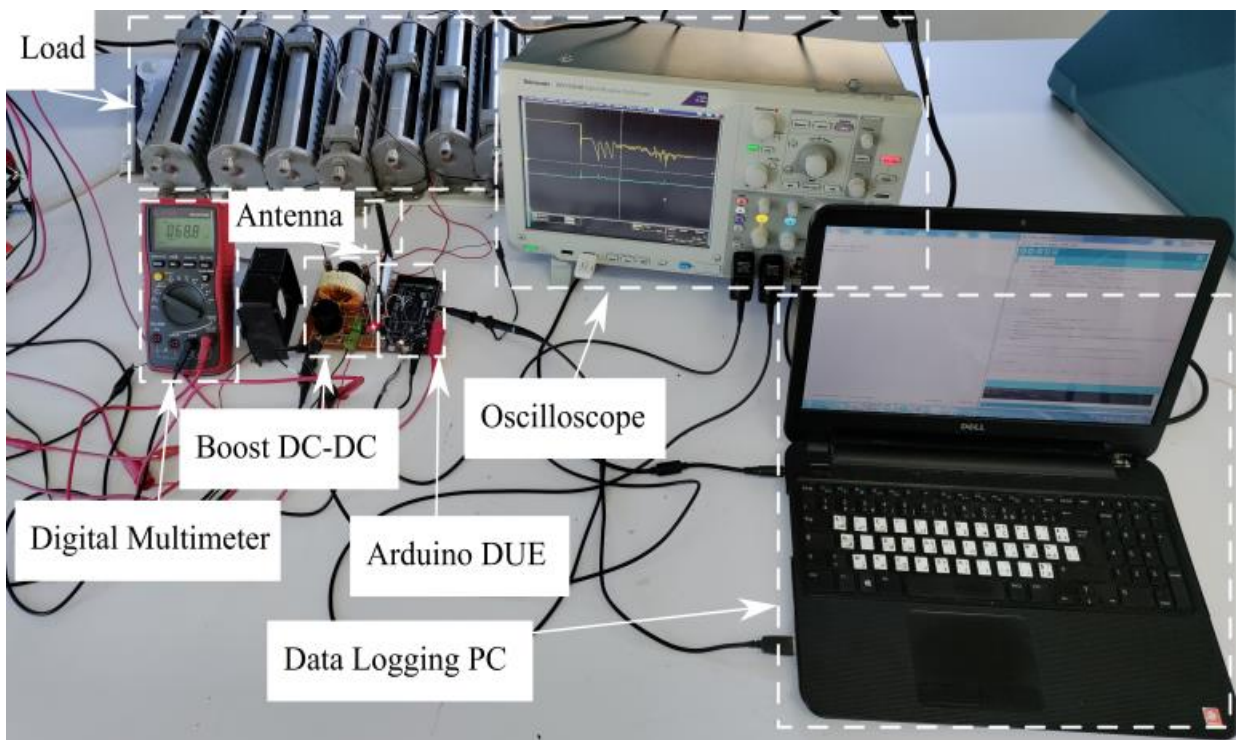


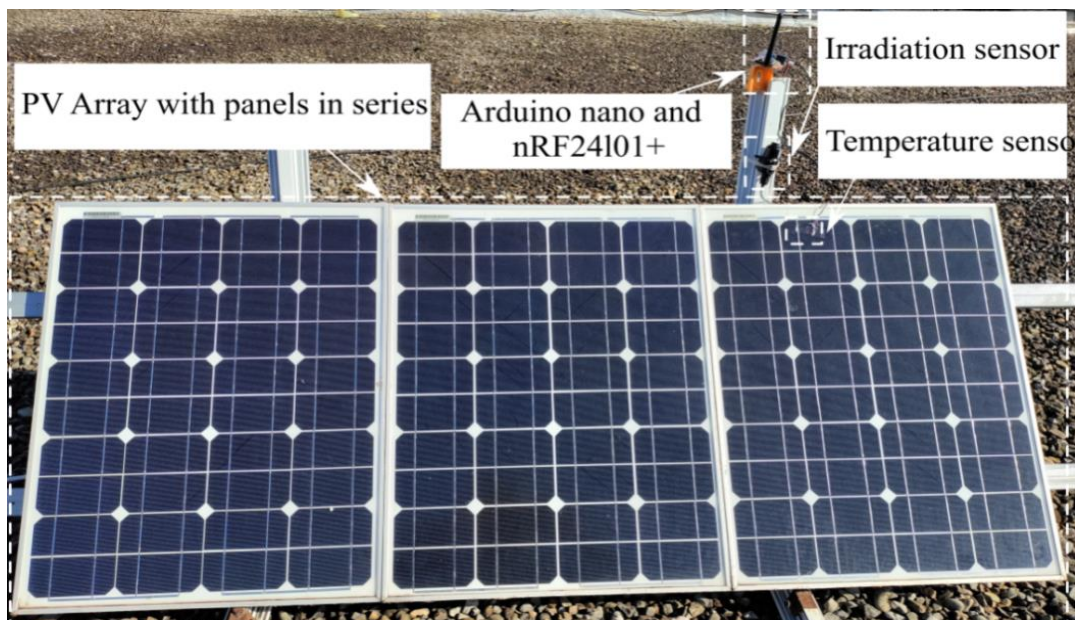
Figure. 4.2 Configuration expérimentale à la station de base [82].

**Tableau 4.1.** Spécifications techniques de panneau photovoltaïque au STC [82]

Spécifications	Values
Irradiance et température au STC	1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C
Puissance maximum (Pmax)	50 Watt
Tension à Pmax (Vmp)	18 V
Courant à Pmax (Imp)	3.06 A
Tension en circuit ouvert (Voc)	21.6 V
Courant de court-circuit (Isc)	3.06 A
Nombre de cellules	20 Cell
Tolérance Puissance	±3%

#### 4.2 Caractérisation et construction du modèle ANFIS :

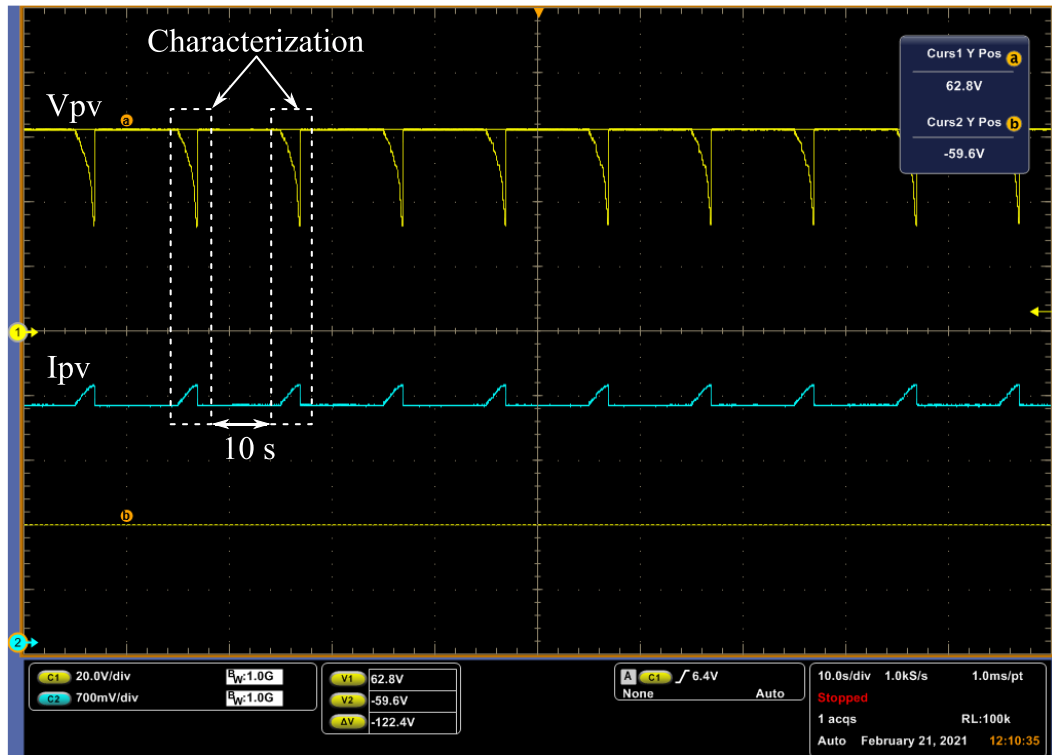
Le générateur PV fonctionne dans des conditions d'irradiation uniformes, comme illustré à la Figure 4.3. Trois panneaux PV avec les spécifications indiquées dans le Tableau 4.1 sont connectés en série pour former le générateur PV, un nœud de capteur composé de capteurs de rayonnement solaire et de température est placé à proximité du Générateur PV (voir Figure 4.3).



**Figure. 4.3** Générateur photovoltaïque et nœud de capteur dans des conditions de fonctionnement uniformes [82].

À la station de base, le WSN envoie des données météorologiques à stocker dans le PC d'enregistrement de données en utilisant un protocole de communication série avec le

microcontrôleur de gestion de l'alimentation (voir Figure 4.2). De plus, la caractérisation du générateur PV est effectuée en balayant la plage de fonctionnement en courant et en tension en utilisant une variation de rapport cyclique périodique dans la plage  $[0, 0,95]$  à un incrément de base de 0,05 et une période de caractérisation de 10s. La figure 4.4 montre la variation de tension et de courant du générateur photovoltaïque au cours de la procédure de caractérisation.

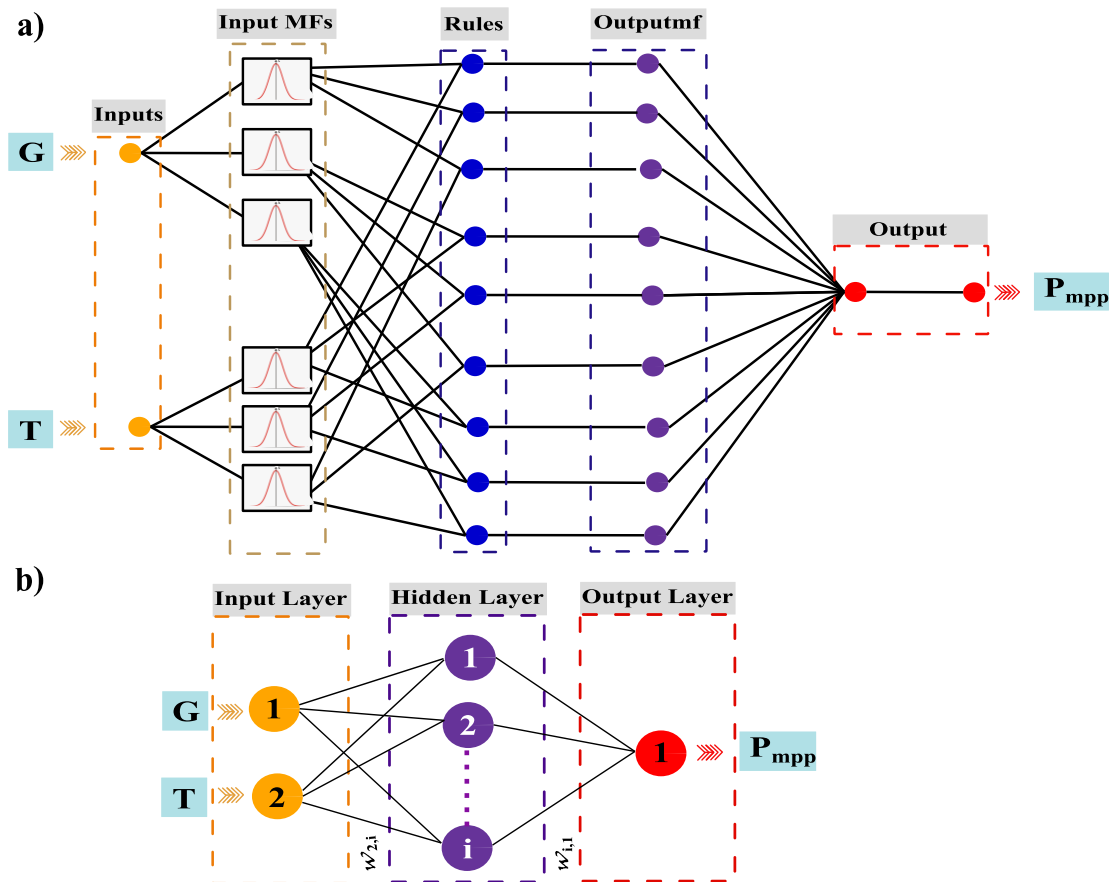


**Figure. 4.4** Caractérisation du générateur photovoltaïque dans des conditions normales de fonctionnement [82].

Les courbes de puissance de caractérisation ont été calculées à partir des résultats obtenus et le MPP correspondant a été calculé en temps réel. Les données météorologiques WSN en plus des valeurs MPP sont envoyées et enregistrées dans le PC d'enregistrement des données de la station de base pour la formation du modèle ANFIS.

La structure ANFIS utilisée pour construire le modèle de prédiction est illustrée à la figure 4.5 (a), où les données d'entrée sont composées des valeurs d'irradiation solaire et de température tandis que la sortie est composée de valeurs MPP obtenues à partir de l'étape de caractérisation. Le

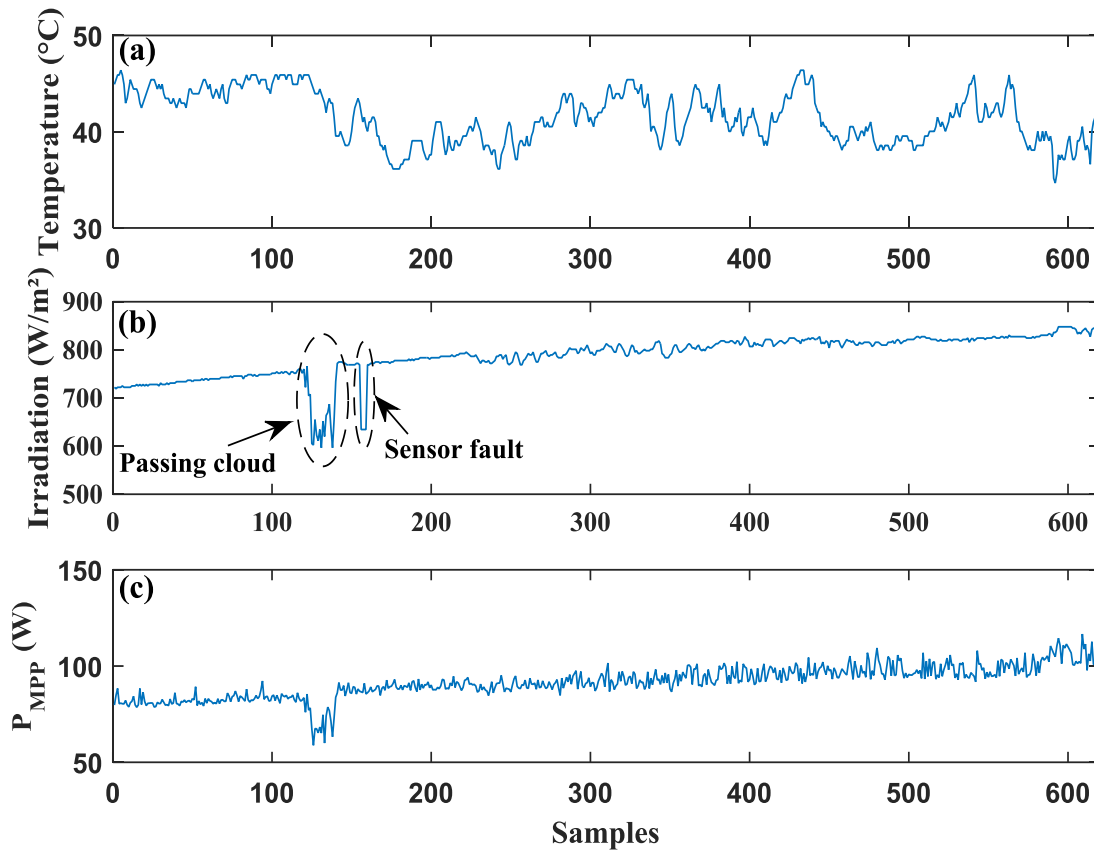
réseau de neurones artificiels (RNA) illustré à la figure 4.5 (b) est utilisé à des fins de comparaison, où les mêmes données d'entraînement que celles du modèle ANFIS sont utilisées pour entraîner les poids de la structure RNA. Le nombre de fonctions d'appartenance pour chaque entrée du modèle ANFIS a été choisi pour être la moitié du nombre de neurones dans la couche cachée de la structure RNA. Au final, le modèle ANFIS contient le même nombre total de fonctions d'appartenance que le nombre de neurones dans la couche cachée du modèle RNA.



**Figure 4.5** Structures d'approximation de fonctions : a) Système d'inférence floue adaptative (ANFIS), b) Réseaux de neurones artificiels (RNA) [82].

Les données d'apprentissage utilisées pour l'apprentissage du modèle ANFIS sont présentées dans la figure 4.6. La plage de variation de température du module PV est de 34,668 °C à 46,39 °C, tandis que l'irradiation varie entre 596,46 W/m<sup>2</sup> et 847,91 W/m<sup>2</sup>. Le profil d'irradiation est caractérisé par des instants qui induisent une perte de puissance due au passage des nuages. Un

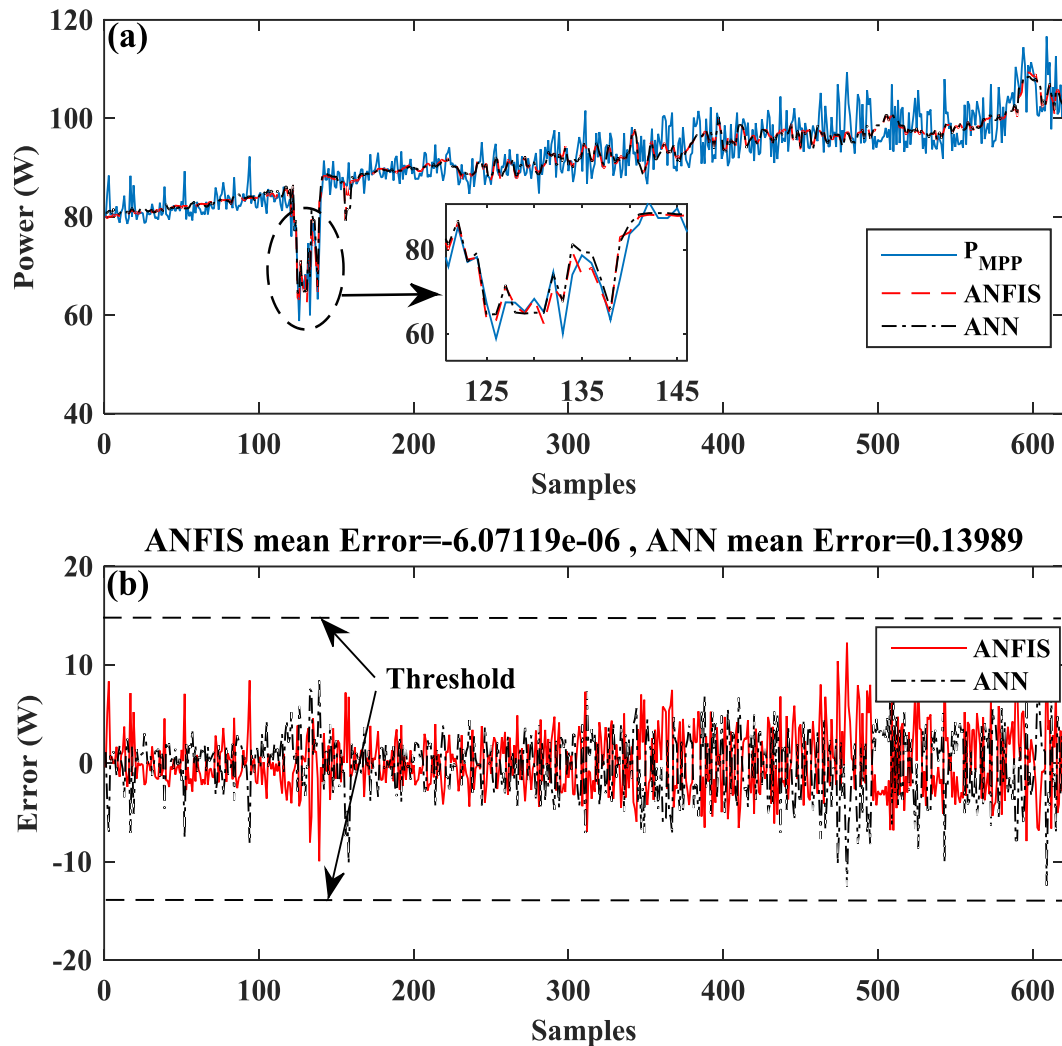
autre changement noté dans l'irradiation est dû au défaut du capteur d'irradiation solaire qui n'affecte pas la puissance de sortie du générateur photovoltaïque.



**Figure. 4.6** Échantillons de données d'entraînement utilisés pour la construction du modèle ANFIS : (a) Température, (°C) (b) Rayonnement solaire (W/m<sup>2</sup>), (c) Points de puissance maximale PMPP (W) [82].

La sortie du modèle ANFIS formé est illustrée à la figure 4.6 (a) qui est comparée à la sortie du modèle de prédiction basé sur RNA et aux MPP du générateur PV (PMPP). L'erreur entre le modèle ANFIS et la puissance de sortie du générateur PV est donnée à la figure 4.7 (b) où un seuil est utilisé pour la détection de fonctionnement anormal. L'erreur moyenne du modèle basé sur ANFIS ( $e=-6.07119e-06$ ) est bien inférieure à l'erreur moyenne du modèle basé sur RNA (0.13989) pour approximativement la même complexité de structure ce qui justifie le choix de l'approche ANFIS. Le seuil utilisé pour détecter l'écart par rapport aux conditions de fonctionnement normales

est déterminé expérimentalement sur la base d'un réglage manuel approprié et peut être ajusté en fonction de la dégradation du système au fil du temps.

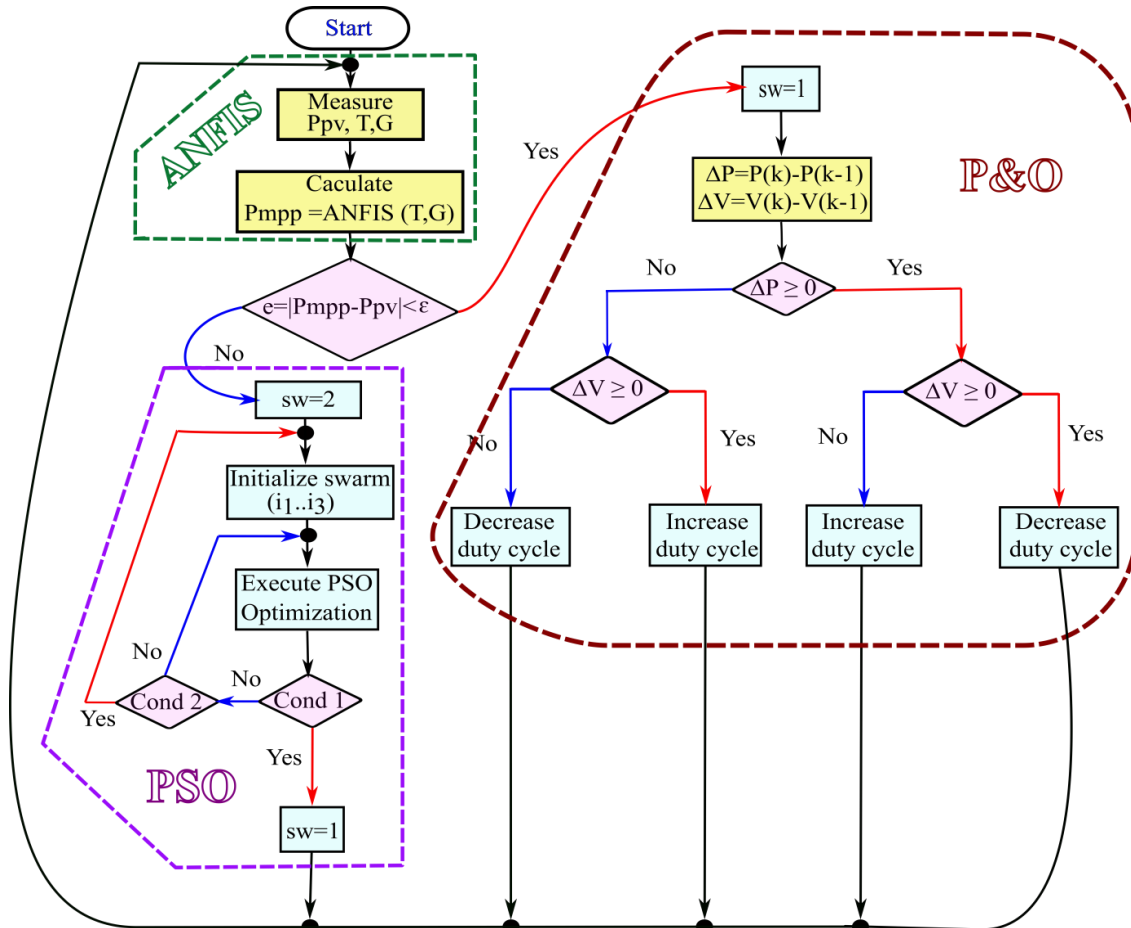


**Figure. 4.7** Sorties des modèles de prédiction : (a) Référence PMPP et sorties des modèles ANFIS et RNA, (b) Erreurs et seuils de détection des modèles ANFIS et RNA [82].

### 4.3 Optimisation des performances basée sur les métaheuristiques :

La figure 4.8 montre l'organigramme de l'algorithme commence par mesurer l'irradiation actuelle, la température et le point de puissance maximale suivis par l'algorithme MPPT ( $P_{pv}$ ). Une mesure d'erreur est évaluée entre la sortie ( $P_{mpp}$ ) du modèle ANFIS aux entrées ( $G$ ,  $T$ ) et le MPP réel du générateur PV ( $P_{pv}$ ). Lorsque la mesure d'erreur contourne un seuil fixe  $\epsilon$ , le commutateur

sw est positionné à 2 qui exécutent le MPPT basé sur PSO, la recherche heuristique du MPP global est lancée jusqu'à ce qu'un changement minimal de puissance entre les particules de recherche soit noté (Cond1). Cond2 indique l'état d'atteinte du nombre limite d'itérations. Sinon (sw = 1), l'algorithme P&O conventionnel est exécuté en continu pour suivre le MPP.

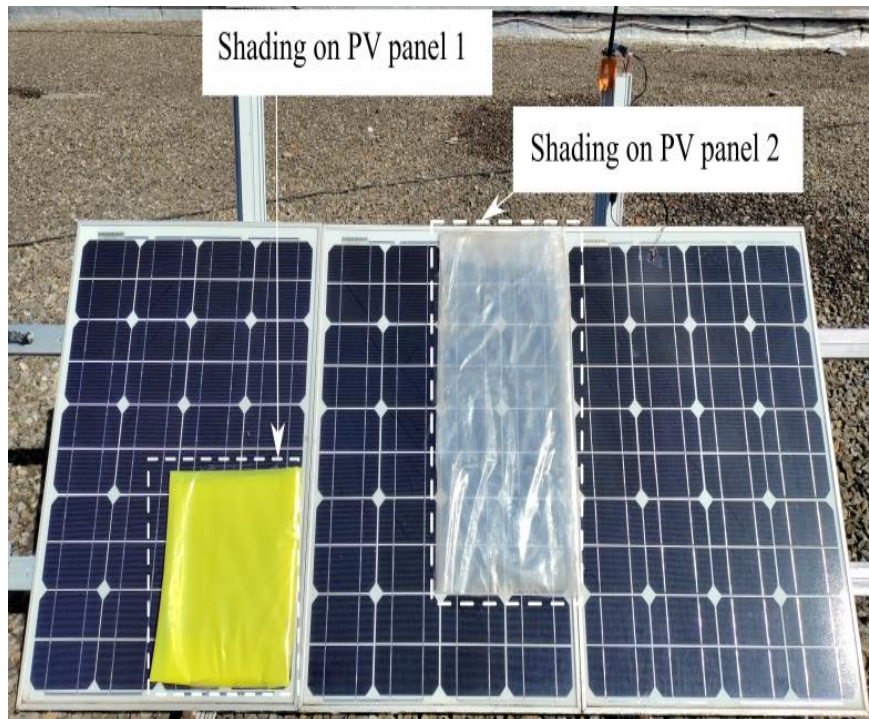


**Figure. 4.8** Organigramme de la surveillance du système PV et de l'optimisation des performances [82].

La condition de fonctionnement d'ombrage partiel a été introduite dans le système de génération d'énergie du générateur photovoltaïque, comme illustré à la figure 4.8. Un modèle spécifique a été choisi afin de démontrer l'incapacité du MPPT Perturb and Observe (P&O) conventionnel à suivre le GMPP qui introduira pertes de puissance supplémentaires.

L'algorithme P&O est exécuté à une fréquence de 10Hz avec un pas de perturbation de ( $\Delta D=0.05$ )

le changement de pas entraîne une perturbation de tension de ( $\Delta V=2V$ )



**Figure. 4.9** Générateur photovoltaïque avec WSN dans des conditions de fonctionnement à ombrage partiel [82].

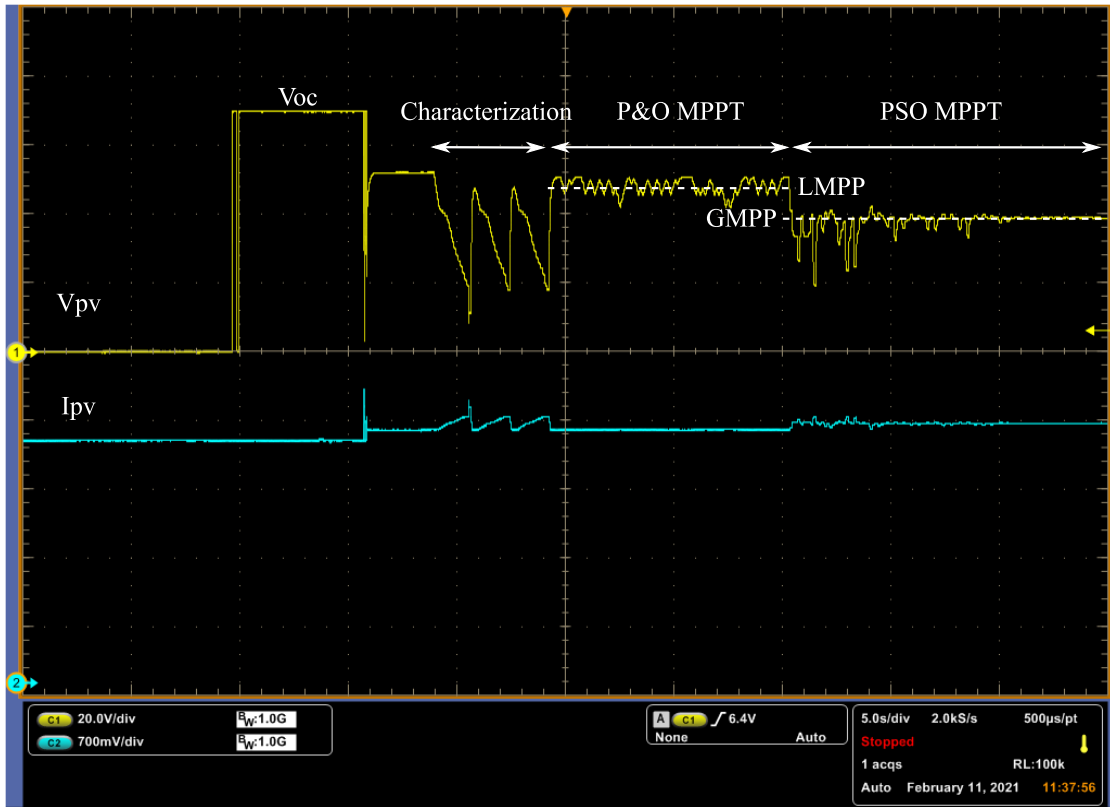
Les performances d'optimisation dans ce travail utilisent l'algorithme Particle Swarm Optimization (PSO) qui peut être remplacé par tout autre algorithme basé sur Swarm. L'algorithme PSO utilise trois particules et se caractérise par les paramètres suivants ( $C1=1.2$ ,  $C2=1.4$ ), qui déterminent respectivement la priorité de recherche locale et globale. Le paramètre de pondération  $w$  est utilisé dans la plage  $[1:0.01]$ , où il donne une grande variation au début de l'optimisation ( $w=1$ ) et minimise les oscillations après convergence ( $w=0.01$ ). Le nombre d'itérations  $Niter=100$  est fixé pour Cond2 dans l'organigramme de la figure 4.8.

Le contrôle direct du rapport cyclique est utilisé pour ajuster le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque à l'aide du convertisseur DC-DC boost à une fréquence d'exécution de 10 Hz. Dans ce cas, aucune boucle de régulation n'est nécessaire ce qui simplifie la mise en œuvre

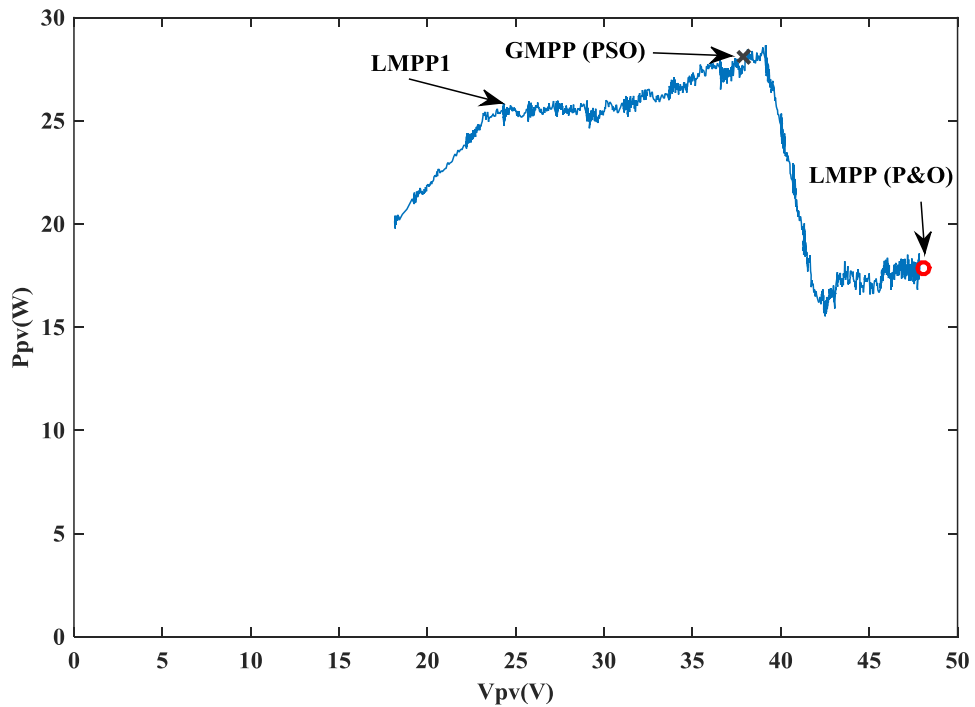
de l'algorithme. Cependant, les changements de charge ne sont pas considérés comme des perturbations potentielles affectant le fonctionnement normal.

Afin d'évaluer les performances de l'algorithme d'optimisation, un scénario expérimental a été programmé dans le microcontrôleur Arduino DUE pour exécuter des tâches séquencées :

- La première tâche consiste en une étape de caractérisation qui permet d'obtenir le véritable point de fonctionnement de puissance maximale réelle qui est utilisé pour évaluer les prochains algorithmes performants (voir figure 4.10). La courbe caractéristique P-V résultante a été enregistrée et tracée sur la figure 4.11 qui montre clairement trois (03) MPP dont un GMPP unique.
- Le MPPT Perturber et Observer (P&O) est ensuite exécuté pendant un laps de temps permettant sa convergence. L'algorithme converge vers le MPP local (LMPP) (illustré à la figure 4.11) qui se caractérise par une puissance nominale inférieure par rapport au GMPP.
- Enfin, une occurrence de défaut est émulée lorsque l'algorithme d'optimisation est lancé pour suivre le MPP global (GMPP). Le GMPPT basé sur les PSO est attribué à une période de temps permettant sa convergence. Le GMPP auquel le PSO MPPT a convergé est illustré à la figure 4.11.



**Figure 4.10** Résultat expérimental du générateur photovoltaïque avec WSN dans des conditions de fonctionnement à ombrage partiel [82].



**Figure. 4.11** Courbe caractéristique puissance-tension en présence d'ombrage partiel [82].

Les résultats expérimentaux obtenus acquis à l'aide d'instruments de mesure dont l'oscilloscope ont été sauvegardés et traités à l'aide du logiciel Matlab. Les résultats sont résumés dans le tableau 4.2 où les points de fonctionnement auxquels les algorithmes MPPT ont convergé sont fournis. L'évaluation des performances de la méthode proposée est donnée dans le tableau 4.3 en termes d'oscillation autour du MPP pour la tension ( $\Delta V$ ) et la puissance ( $\Delta P$ ) qui montrent une diminution considérable des oscillations par rapport au MPPT qui n'inclut pas la détection de défaut (FD) et mécanisme de reconfiguration. Un rendement  $\xi$  plus élevé est également obtenu, ce qui est le principal avantage de l'utilisation d'algorithmes d'optimisation par essaim dans de telles conditions de fonctionnement. L'inconvénient du temps transitoire qui s'avère plus élevé que le P&O conventionnel peut être négligé, car il n'affecte pas l'efficacité énergétique à long term

**Tableau 4.2.** Points de puissance maximum du système PV dans des conditions d'ombrage partiel : ( $G=739.73W/m^2$ ,  $T=32.71^\circ C$ , 11/02/2021,11:37,  $P_{ANFIS}=86.28W$ ) [82].

	<b>V<sub>pv</sub>(V)</b>	<b>I<sub>pv</sub>(A)</b>	<b>P<sub>pv</sub>(W)</b>
<b>LMPP</b>	46.95	0.3812	17.8996
<b>LMPP1</b>	25.74	1.007	25.93
<b>GMPP</b>	39.1531	0.7253	28.3992
<b>MPPT sans FD</b>	48.09	0.371	17.85
<b>Méthode proposée</b>	37.8437	0.7435	28.14

**Tableau 4.3.** Performance des techniques MPPT dans des conditions d'ombrage partiel [82].

	<b><math>\Delta V</math> (V)</b>	<b><math>\Delta P</math> (W)</b>	<b><math>\xi</math> (%)</b>	<b>Tr(s)</b>
<b>MPPT sans FD</b>	8.8813	-10.5492	62.85	0.15
<b>Méthode proposée</b>	0.6156	-0.2592	99.08	0.9708

#### **4.4 Conclusion :**

La stratégie d'extraction de puissance a été mise en œuvre dans une configuration expérimentale efficace qui permet la simulation en porte dans différentes conditions environnementales en plus d'un microcontrôleur à traitement rapide qui permet la mise en œuvre d'algorithmes de contrôle complexes. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la stratégie proposée pour traiter les défauts intermittents avec de bonnes performances transitoires.

### **Conclusion générale :**

Les panneaux solaires photovoltaïques sont largement utilisés dans les zones isolées d'où la nécessité de mettre en place un système de gestion de l'alimentation, et ce, afin de maximiser leur efficacité en présence de perturbations météorologiques et de divers types de défauts.

Les générateurs photovoltaïques sont soumis à des conditions de fonctionnement et à des défauts du système qui affectent leur fonctionnement et induisent des pertes de puissance. L'écart naissant par rapport au fonctionnement normal doit être détecté et des mesures doivent être prises afin d'éviter une défaillance du système. Un réseau de capteurs sans fil a été utilisé dans ce travail comme principal outil de surveillance pour détecter l'état des panneaux photovoltaïques fonctionnant dans des conditions de fonctionnement normales et perturbées. Les données acquises reçues des nœuds de capteurs sans fil sont introduites dans une procédure de formation afin de construire le modèle ANFIS du système PV. Le modèle de prédiction ANFIS montre une meilleure erreur d'approximation par rapport à la structure équivalente basée sur RNA, ce qui justifie son utilisation. Les conditions de fonctionnement anormales sont détectées à l'aide du résidu généré basé sur l'ANFIS et un algorithme MPPT d'optimisation basé sur la métaheuristique est lancé afin de suivre le point de puissance maximale globale et éviter ainsi les pertes de puissance excessives. Les résultats expérimentaux montrent une plus grande efficacité de l'algorithme d'optimisation des performances en présence de conditions de fonctionnement normales et également en cas d'ombrage partiel. D'autres techniques d'intelligence en essaim et d'optimisation basées sur des métaheuristicues peuvent être utilisées afin d'optimiser l'efficacité de conversion de puissance. Des techniques d'approximation de fonctions avec une structure plus simple et des performances améliorées peuvent être utilisées pour remplacer le modèle de prédiction basé sur l'ANFIS qui est la principale référence pour le mécanisme de détection de défauts proposé dans ce travail.

## Conclusion générale

---

En perspective, le schéma présenté dans cette étude peut facilement être modifié pour améliorer ses performances :

- Implémenter d'autres algorithmes d'optimisation basés sur l'essaim afin d'améliorer la réponse transitoire du système PV,
- Réalisation d'une station météo avec une base de données et une interface.
- Mettre en œuvre un bras automatique en se basant sur la station météo pour suivre les meilleures conditions climatiques.

## Bibliographie

- [1] S. R. Madeti and S. N. Singh, “Monitoring system for photovoltaic plants: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 1180–1207, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.088.
- [2] A. Derdar, B. Nadia, A. Mohamed, N. Boutasseta, I. Attoui, and M. S. Bouakkaz, “Modeling of the ND 240QCJ SHARP photovoltaic solar module and study the influence of the variation of the parameters,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 194, pp. 237–245, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.10.079.
- [3] A. Bouraiou *et al.*, “Experimental investigation of observed defects in crystalline silicon PV modules under outdoor hot dry climatic conditions in Algeria,” *Sol. Energy*, vol. 159, pp. 475–487, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.11.018.
- [4] N. Boutasseta, M. Ramdani, and S. Aouabdi, “Performance evaluation of photovoltaic arrays subject to a Line-Ground fault,” in *3rd International Conference on Systems and Control*, Oct. 2013, pp. 83–86, doi: 10.1109/ICoSC.2013.6750839.
- [5] Q. Li, K. Yu, and D. Chen, “SolarDiagnostics: Automatic damage detection on rooftop solar photovoltaic arrays,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 32, p. 100595, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.suscom.2021.100595.
- [6] E. Kabalci and Y. Kabalci, “A wireless metering and monitoring system for solar string inverters,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 96, pp. 282–295, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.10.013.
- [7] D. Saba, Y. Sahli, F. H. Abanda, R. Maouedj, and B. Tidjar, “Development of new

- ontological solution for an energy intelligent management in Adrar city,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 21, pp. 189–203, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.suscom.2019.01.009.
- [8] M. M. Rahman, J. Selvaraj, N. A. Rahim, and M. Hasanuzzaman, “Global modern monitoring systems for PV based power generation: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 4142–4158, Feb. 2018, d-oi: 10.1016/j.rser.2017.10.111.
- [9] A. E. Varjovi and S. Babaie, “Green Internet of Things (GIoT): Vision, applications and research challenges,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 28, p. 100448, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.suscom.2020.100448.
- [10] S. Samara and E. Natsheh, “Intelligent Real-Time Photovoltaic Panel Monitoring System Using Artificial Neural Networks,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50287–50299, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2911250.
- [11] A. Bouraiou *et al.*, “A Temperature Supervision Web Application Based on Wireless Wi-Fi ESP8266 Microcontroller and LM 35 Sensor,” pp. 385–394, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-92038-8\_39.
- [12] A. D. Martin, J. M. Cano, J. Medina-Garcia, J. A. Gomez-Galan, and J. R. Vazquez, “Centralized MPPT Controller System of PV Modules by a Wireless Sensor Network,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 71694–71707, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2987621.
- [13] I. M. Dupont, P. C. M. Carvalho, S. C. S. Jucá, and J. S. P. Neto, “Novel methodology for detecting non-ideal operating conditions for grid-connected photovoltaic plants using Internet of Things architecture,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 200, p. 112078, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112078.
- [14] N. Boutasseta, M. S. Bouakkaz, N. Fergani, I. Attoui, A. Bouraiou, and A. Neçaibia, “Solar

- Energy Conversion Systems Optimization using Novel Jellyfish based Maximum Power Tracking Strategy,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 194, pp. 80–88, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.10.061.
- [15] C. Meira Amaral da Luz, Í. Ferreira Silva, P. dos Santos Vicente, E. Moreira Vicente, F. L. Tofoli, and E. R. Ribeiro, “Maximum power point tracking technique based on sweeping the characteristic curve of the photovoltaic module,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 33, p. 100638, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.suscom.2021.100638.
- [16] R. I. S. Pereira, S. C. S. Jucá, and P. C. M. Carvalho, “IoT embedded systems network and sensors signal conditioning applied to decentralized photovoltaic plants,” *Measurement*, vol. 142, pp. 195–212, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.04.085.
- [17] J. Medina-García, A. D. Martín, J. M. Cano, J. A. Gómez-Galán, and A. Hermoso, “Efficient Wireless Monitoring and Control of a Grid-Connected Photovoltaic System,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 5, p. 2287, Mar. 2021, doi: 10.3390/app11052287.
- [18] J.-S. R. Jang, “ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system,” *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, 1993, doi: 10.1109/21.256541.
- [19] M. S. Bouakkaz *et al.*, “ANFIS-BASED MAXIMUM POWER POINT TRACKING USING GENETIC ALGORITHM TUNED FRACTIONAL-ORDER PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE CONTROLLER AND ON-SITE MEASURED CLIMATIC DATA,” *Int. J. Energy a Clean Environ.*, vol. 22, no. 4, pp. 63–82, 2021, doi: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2020035458.
- [20] N. Boutasseta, M. Ramdani, and S. Mekhilef, “Fault-tolerant power extraction strategy for photovoltaic energy systems,” *Sol. Energy*, vol. 169, pp. 594–606, 2018, doi:

- 10.1016/j.solener.2018.05.031.
- [21] KUMI EN. Technical and economic analysis of a 1mw grid-connected solar. Thesis Submitted to the School of Graduate Studies, KNUST. 2012.
- [22] Aouchiche N. Défauts liés aux systèmes photovoltaïques autonomes et techniques de diagnostic - Etat de l'art. Rev Des Energies Renouvelables, Vol 21, N°2, 247 - 265, 2018.
- [23] Beauvais A, Chevillard N, Paredes MG, Heisz M, Rossi R, Schmela M. Global Market Outlook For Solar Power / 2019 - 2023: Power FS. Mobilising Investments in Emerging Markets. Sol Power Eur 2019.
- [24] Beauvais A, Chevillard N, Paredes MG, Heisz M, Rossi R, Schmela M. Global market outlook for solar power / 2018 - 2022: Connecting african and european developers and investors. Olar Power Eur 2018.
- [25] Petibon S. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. Thèse de doctorat. Université de Toulouse III T-Paul Sabatier, 2010.
- [26] Bun L. Détection et localisation de défauts pour un système PV. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 2011.
- [27] Bessemoulin P, Olivieri J. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. .Physique Atmosphérique La Météorologie 8ème Série - N° 31 - Sept 2000:42–59.
- [28] Nyamsi WW. Vers une méthode automatique d'estimation de la distribution spectrale du rayonnement solaire . Cas du photosynthèse et ultraviolet. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris- ParisTech, 2016.

- [29] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Raies\\_de\\_Fraunhofer](https://fr.wikipedia.org/wiki/Raies_de_Fraunhofer) n.d.
- [30] Cottier J-M, Mermoud A, Viloz M, Graf J. Centrales photovoltaïques Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs. Programme d'action PACER – Energies renouvelables. Office fédéral des questions conjoncturelles; 1996.
- [31] Mambrini T. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Thèse de Doctorat. Université Paris-Sud École doctorale : STITS, 2014.
- [32] Le photovoltaïque–Module 3 – Fonctionnement et Technologies. Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement. Novembre 2010:1-10.
- [33] M. G.Villalva, J.R.Gazoli, and E.R.Filho.“Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays ”.In: IEEE Transactions on Power Electronics 24.5 (2009),pp.1198–1208. ISSN: 0885-8993. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2013862 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4806084>.
- [34] M. G.Villalva,Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho.“Modeling and circuit based simulation of photovoltaic arrays ”.In: 2009 Brazilian Power Electronics Conference. Vol.14.1.IEEE, 2009, pp.1 244–1254. ISBN: 978-1-4244-3369-8. DOI: 10.1109/COBEP.2009.5347680.  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5347680>.
- [35] Jing Jun Soon and Kay-Soon Low.“Photovoltaic Model Identification Using Particle Swarm Optimization With Inverse Barrier Constraint”. In: IEEE Transactions on Power Electronics 27.9 (2012),pp.3975–3983. ISSN: 0885-8993. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2188818. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6165376/>.

- [36] Jyri Kivimaki et al. "Revisited Perturbation Frequency Design Guide- line for Direct Fixed-Step Maximum Power Point Tracking Algorithms". In: IEEE Transactions on Industrial Electronics 64.6 (2017),pp.4601–4609. ISSN: 02780046. DOI: 10.1109/TIE.2017.2674589.
- [37] Jyri Kivimaki et al. "Design Guide lines for Multi-Loop Perturbative Maximum Power Point Tracking Algorithms ".In: IEEE Transactions on Power Electronics 8993.c (2017), pp.1–1. ISSN: 0885-8993. DOI: 10.1109/ TPEL.2017.2683268. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7879313/>.
- [38] M.G. Villalva,T.G.de Siqueira,and E.Ruppert. "Voltage regulation of photovoltaic arrays:small-signal analysis and control design ".In: IET Power Electronics 3.6 (2010),p.869. ISSN: 17554535. DOI: 10.1049/ietpel.2008.0344. URL: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-pel.2008.0344>.
- [39] Mohammed Khorshed Alam et al. "A Comprehensive Review of Catastrophic Faults in PV Arrays : Types, Detection ,and Mitigation Techniques". In: IEEE Journal of Photovoltaics 5.3 (2015),pp.982–997. ISSN: 2156-3381. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2397599. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7045450/>.
- [40] E.E van Dyk et al. "Long-term monitoring of photovoltaic devices". In: Renewable Energy 25.2 (2002),pp.183–197. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/S0960-1481(01)00064-7. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148101000647>.
- [41] E.E. van Dyk and E.L. Meyer. "Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules ".In: Renewable Energy 29.3 (2004),pp.333–344. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00250-7. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148103002507>.

- [42] Trishan Eswam and Patrick L Chapman. “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques”. In: IEEE Transactions on Energy Conversion 22.2 (2007), pp.439–449. ISSN: 0885-8969. DOI: 10.1109/TEC.2006.874230. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4207429>.
- [43] E Koutroulis, K Kalaitzakis, and N C Voulgaris. “Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system”. In: Power Electronics, IEEE Transactions on 16.1 (2001), pp. 46–54. ISSN: 0885-8993. DOI: 10.1109/63.903988.
- [44] Panagiotis E. Kakosimos and Antonios G. Kladas. “Implementation of photovoltaic array MPPT through fixed step predictive control technique”. In: Renewable Energy 36.9 (2011), pp.2508–2514. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2011.02.021. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148111001121>.
- [45] Kashif Ishaque and Zainal Salam. “A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition”. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 19 (2013), pp. 475–488. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.032. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.032> <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112006442> <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006442>.
- [46] Eltawila, M.A., Zhao, Z.: ‘MPPT techniques for photovoltaic applications’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2013, 25, pp. 793–813.
- [47] D’Souza NS, Lopes LAC, Liu X. An intelligent maximum power point tracker using peak current control. In: Proceedings of 36th annual IEEE power electronics specialists conference; 2005. p.172–7..

- [48] Hsiao YT, Chen CH. Maximum power tracking for photovoltaic power system. In: Proceedings of the conference record of 37<sup>th</sup> IAS annual meetin industry applications conference; 2002. p. 1035–40.
- [49] [http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Fichier:Sch\\_install\\_autonome.jpg](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Fichier:Sch_install_autonome.jpg)
- [50] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, Vitelli M. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. IEEE Transactions on Power Electronics 2005; 20(4): 963–73.
- [51] J. Kennedy and R. Eberhart. “Particle swarm optimization ”. In: Proceedings of ICNN’95 International Conference on Neural Networks. Vol. 4. IEEE, pp. 1942–1948. ISBN: 0-78032768-3. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/488968/>.
- [52] Weidong Xiao and W.G. Dunford. “A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems”. In: 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551). Vol. 3. IEEE, 2004, pp. 1957–1963. ISBN: 0-7803-8399-0. DOI: 10.1109/PESC.2004.1355417. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1355417/>.
- [53] K.H. Hussein. “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions ”. In: IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution 142.1 (1995), p. 59. ISSN: 13502360. DOI: 10.1049/ip-gtd:19951577. URL: [http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-gtd{\\\_}19951577](http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-gtd{\_}19951577).
- [54] Emad Elbeltagi, Tarek Hegazy, and Donald Grierson. “Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms”. In: Advanced Engineering Informatics 19.1 (2005), pp. 43–53. ISSN: 14740346. DOI: 10.1016/j.aei.2005.01.004. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474034605000091>.

- [55] Masafumi Miyatake et al. "Maximum Power Point Tracking of Multiple Photovoltaic Arrays: A PSO Approach". In: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 47.1 (2011), pp.367–380. ISSN: 00189251. DOI: 10.1109/TAES.2011.5705681. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5705681>.
- [56] Russell CEberhart and Yuhui Shi. "Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization". In: Evolutionary Programming VII. 1998, pp.611–616. ISBN: 978-3-540-64891-8. DOI: 10.1007/BFb0040812. URL: <http://link.springer.com/10.1007/BFb0040812>.
- [57] M. Benkaci, "Surveillance des systèmes mécatronique d'automobile par des méthodes d'apprentissage." Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2011.
- [58] khenfer Riad « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques » thèse de Docteur en Sciences Université Ferhat Abbes - Setif-1. le 05 Mars 2015.
- [59] H. Hacene, "Identification et surveillance de processus dynamiques complexes par logique floue. Application à un échangeur de chaleur." Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2007.
- [60] D. Berdjag, "Méthodes algébriques pour la décomposition de modèles comportementaux: Application à la détection et à la localisation de défaillances." Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I, 2007.
- [61] R. Fellouah, "Contribution au diagnostic de pannes pour les systèmes différentiellement plats." INSA de Toulouse, 2007.
- [62] F. Castang, "Synthèse robuste de filtres de diagnostic pour la surveillance à base de modèle des systèmes multivariables et incertains." Bordeaux 1, 2003

- [63] Youngseok J, et al. Improved perturbation and observation method (IP&O) of MPPT control for photovoltaic power systems In : Proceedings of 31 st IEEE Photovoltaic specialists conference; 2005.
- [64] C. Christophe, "Surveillance des systèmes non linéaires: Application aux machines électriques." 2001.
- [65] R. J. Patton, "Fault detection and diagnosis in aerospace systems using analytical redundancy," *Comput. Control Eng. J.*, vol. 2, no. 3, pp. 127–136, 1991.
- [66] M. Benkaci, "Surveillance des systèmes mécatronique d'automobile par des méthodes d'apprentissage." Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2011.
- [67] R. Mrani Alaoui, "Conception d'un module de diagnostic à base de suites de bandes temporelles en vue de la supervision des procédés énergétiques: application en ligne à un générateur de vapeur." Lille 1, 2004
- [68] H. Derbel, "Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides." Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2009.
- [69] Youcef Soufi « Modélisation et diagnostic d'une association convertisseur machine électrique »Thèse de Doctorat en Sciences ; Université de Annaba 2012 Algérie.
- [70] Medoued Ammar « Surveillance et diagnostic des défauts des Machines électriques : applications aux moteurs asynchrones » thèse de Docteur en Sciences, Université du 20 Août 1955-Skikda, le 08 / 03 / 2012.
- [71] Leila Nacib , Salah Saad, Saadi Sakhara, "A Comparative Study of Various Methods of Gear Faults Diagnosis", *Journal of Failure Analysis and Prevention*; October 2014, Volume 14, Issue 5, pp 645-656.
- [72] G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances," These Dr. l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2004

- [73] R. Bensaadi and H. Mouss, “Diagnostic de défaillances par Reconnaissance de Formes.”
- [74] O. Ondel, “Diagnostic par reconnaissance des formes: Application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone.” Ecole Centrale de Lyon, 2006.
- [75] A. O. Molina, “Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic.” INSA de Toulouse, 2005.
- [76] J.-P. Haton and M.-C. Haton, *L’intelligence artificielle*. Presses universitaires de France, 1989.
- [77] Marcelo Gradella Villalva JRG, Ernesto Ruppert Filho. Analysis and simulation of the P&O Algorithm Using a Linearized PV array model .In: Proceedings of industrial electronics conference, IECON’ 09; 2009.p.231–6.
- [78] O. Ezinwanne, F. Zhongwen, and L. Zhijun, “Energy Performance and Cost Comparison of MPPT Techniques for Photovoltaics and other Applications,” *Energy Procedia*, vol. 107, pp. 297–303, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.156.
- [79] Chee Wei T, Green TC, Hernandez-Aramburo CA. A current mode controlled maximum power point tracking converter for building integrated photovoltaics. In: Proceedings of European conference on power electronics and applications; 2007.
- [80] V. Cocquempot, “Contribution à la surveillance des systèmes industriels complexes.” Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I, 2004.
- [81] R. E. Kalman and R. S. Bucy, “New results in linear filtering and prediction theory,” *J. Fluids Eng.*, vol. 83, no. 1, pp. 95–108, 1961.
- [82] A. Derdar, B. Nadia, A. Mohamed, N. Boutasseta, , M. S. Bouakkaz, I. Attoui, N. Fergani, A. Bouraiou “Photovoltaic energy generation systems monitoring and performance optimization using wireless sensors network and metaheuristics,” *Sustainable Computing: Informatics and Systems.*, vol. 35, pp. 100684, 2022, doi: 10.1016/j.suscom.2022.100684.