

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**

Filière : **Electromécanique**

Spécialité : **Electromécanique**

Présenté par : **Gharbi Thamir Salah Eddine**
Merabet Mohammed Aymen

Thème

**Technique d'intelligence artificiel pour l'étude de l'état de santé
des panneaux solaires**

Soutenu publiquement, le 22/06 /2025, devant le jury composé de :

Dr. Boucerredj Leila	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
Pr. Moussaoui Abdelkrim	Professeur	Univ. Guelma	Président
Dr. Chaabi Lilia	MCB	Univ. Guelma	Examineur

Juin 2025

Remerciement

"فَاذْكُرُونِي أَذْكُرْكُمْ وَاشْكُرُوا لِي وَلَا تَكْفُرُونِ"

Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui nous a accordé la patience, la force et la volonté nécessaires pour mener à bien ce projet.

*Nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères à notre encadrante, Dr. **Boucerredj Leila**, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses conseils précieux et son soutien tout au long de ce travail. Son encadrement rigoureux et bienveillant a grandement contribué à la réussite de ce projet.*

*Nous saisissons également cette opportunité pour remercier les membres du jury (Monsieur le président du jury **Pr. Moussaoui Abdelkrim** et l'examineur le **Dr. Chaabi Lilia**) d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à fin d'améliorer notre travail.*

Nous remercions également l'ensemble des enseignants et membres du département de Génie Électrique pour la qualité de la formation qu'ils nous ont dispensée durant notre parcours universitaire.

Nos remerciements vont aussi à nos camarades et collègues pour leur entraide, leur collaboration et leurs encouragements.

Enfin, nous exprimons toute notre reconnaissance à nos familles pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur patience tout au long de notre formation



Dédicace

À nos chers parents,

Pour leur amour inestimable, leur patience infinie et leur soutien indéfectible à chaque étape de notre parcours. Leur confiance en nous a été une lumière dans les moments difficiles, et leur présence, un pilier solide dans notre vie. Ce mémoire est avant tout le fruit de leurs sacrifices, de leur générosité et de leurs prières silencieuses.

À nos frères et sœurs, Pour leur compréhension, leur affection et leur soutien moral constant. Ils ont été notre refuge et notre source de réconfort tout au long de ce chemin.

À notre encadrante, DR. LEILA BOUCERREDJ,

Pour sa précieuse supervision, ses conseils avisés, sa disponibilité et son accompagnement sincère. Grâce à son expertise et son implication, ce travail a pu voir le jour dans les meilleures conditions.

À nos amis : OUSSAMA, DBDOU, KIMOU, BILEL

Merci pour votre amitié fidèle, vos encouragements et vos moments de partage qui ont égayé ce parcours académique.

Et enfin,

À tous nos camarades et collègues de promotion,

Avec qui nous avons partagé des souvenirs inoubliables, des défis communs et de beaux moments d'entraide. Ce travail est aussi le reflet de cette belle aventure collective.

Avec toute notre gratitude et notre affection.

Table des matières

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux	X
Résumé.....	XI
Abstract	XII
المخلص.....	XIII
Introduction générale	1
<i>Chapitre I: Généralités Sur Les Systèmes Photovoltaïques</i>	
I.1 Introduction	3
I.2 Définition et fonctionnement des systèmes photovoltaïques.....	3
I.2.1 Définition des énergies renouvelables et classification.....	3
I.2.2 Importance du photovoltaïque dans la transition énergétique	6
I.2.3 Avantages et limites du solaire par rapport aux autres sources d'énergie	7
I.2.4 État actuel du marché photovoltaïque au niveau mondial et national	8
I.4 Types de systèmes photovoltaïques et des panneaux photovoltaïques	10
I.4.A-Types de systèmes photovoltaïques	10
I.4.1 Système photovoltaïque autonome.....	10
I.4.2 Système photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau	11
I.4.3 Système avec stockage d'énergie électrique « Storage » connecté au réseau électrique..	12
I.4.B-Types des panneaux photovoltaïques.....	14
I.5 Les différents montages des panneaux photovoltaïques	15
I.5.1 Le montage de panneaux PV en série	15
I.5.2 Le montage des panneaux en parallèle.....	15
I.6. Cellule photovoltaïque	16
I.6.1. Types des cellules photovoltaïques.....	17
I.6.1.1. La cellule mono- cristallin	17
I.6.1.2. La cellule poly- cristallin.....	18

I.6.1.3. La cellule amorphe à couche mince	18
I.6.1.4. La cellule solaire HIT	18
I.6.2. Caractéristique électrique d'une cellule PV.....	19
I.6.2.1. La courbe courant-tension.....	19
I.6.2.2. Le courant de court-circuit I_{cc} (pour $V_{co} = 0$)	19
I.6.2.3. La tension de circuit ouvert V_{co} (pour $I_{cc} = 0$).....	20
I.6.2.4. La puissance maximale, Le point de puissance maximale (PPM).....	20
I.6.2.5. Facteur de forme (FF).....	20
I.6.2.6. Rendement de la conversion (η).....	20
I.7. Le module photovoltaïque.....	21
I.8 Performances et rendement des systèmes photovoltaïques	21
I.8.1 Facteurs influençant le rendement : température, encrassement, ombrage	22
I.8.2 Courbes I-V et P-V : Analyse des performances d'un module solaire	22
I.8.3 Effet des conditions climatiques sur la production d'énergie	23
I.9 Conclusion.....	23

Chapitre II: Les systèmes photovoltaïques et leur supervision

II.1 Introduction.....	25
II.2 Importance de la supervision des systèmes photovoltaïques	25
II.2.1 Rôle de la surveillance dans l'optimisation des performances.....	25
II.2.2 L'importance des systèmes de surveillance solaire	25
II.3 Méthodes de supervision traditionnelles.....	26
II.3.1 Techniques de mesure et d'évaluation des performances	26
II.3.2 Technologies de surveillance des panneaux solaires	27
II.3.3 Méthode de surveillance	28
II.4 Identification et classification des pannes dans un système PV	29
II.4.1 Défaut d'ombrage	30
II.4.2 Les points chauds ou Hot-spots	31
II.4.4 Défauts de la diode de by-pass et diode anti-retour	33
II.4.5 Délaminage.....	33

II.5 Les défauts les plus fréquents dans une installation photovoltaïque	34
II.5.1 Défauts dans le générateur photovoltaïque	34
II.5.2 Défauts dans la boîte de jonction.....	36
II.5.3 Défauts dans le système de câblage	36
II.5.4 Défauts dans le système de protection	37
II.5.5 Défauts de l'onduleur.....	39
II.5.6 Défauts dans le système d'acquisition des données.....	40
II.6 Optimisation des performances des systèmes photovoltaïques	41
II.6.1 Détection des problèmes et maintenance proactive	41
II.6.2 Optimisation de l'orientation et de l'inclinaison	41
II.6.3 Gestion de l'ombrage	41
II.6.4 Contrôle de la température	41
II.7 Conclusion	42

Chapitre III : L'intelligence artificielle

III.1 Introduction.....	44
III.2 Définition.....	44
III.3 Historique de l'IA	45
III.4 Techniques d'intelligence artificielle pertinentes	46
III.4.1 Apprentissage automatique	46
III.4.2 Réseaux de neurones	47
III.4.3 Algorithmes de classification et de régression	47
III.5 Applications de l'IA dans le secteur de l'énergie.....	48
III.5.1 Optimisation des systèmes de stockage d'énergie par l'intelligence artificielle	48
III.5.2 Prédiction de la demande énergétique grâce à l'intelligence artificielle.....	48
III.5.3 Applications pratiques de l'intelligence artificielle dans le stockage d'énergie.....	48
III.5.4 Intégration de l'intelligence artificielle dans les réseaux de batteries	49
III.5.5 Gestion intelligente des flux énergétiques en utilisant l'IA	49
III.5.6 Défis et opportunités de l'intelligence artificielle pour le stockage d'énergie	49
III.6.1 Surveillance et détection d'anomalies	50

III.6.2. Maintenance prédictive.....	51
III.6.3. Réparation et optimisation des performances	51
III.7 Enjeux et défis de l'IA.....	51
III.7.1 Éthique et biais algorithmiques	51
III.7.2 Sécurité et protection des données.....	52
III.7.3 Régulations et cadre législatif de l'IA	52
III.7.4 Impact de l'IA sur l'emploi et les compétences du futur	52
III.8 Conclusion	53

Chapitre IV

Étude de l'état de santé d'un système photovoltaïque par l'intelligence artificielle

IV.1 Introduction	55
IV.2 Méthodologie de l'étude	55
IV.2.1 Description des données collectées et des outils d'analyse utilisés	55
IV.2.2 Analyse des performances des centrales solaires.....	55
IV.2.3 Optimisation du système.....	57
IV.3 Surveillance d'un système PV	58
IV.3.1 Présentation des performances photovoltaïques – Année 2023	59
IV.3.2 Analyse annuelle des performances photovoltaïques – Année 2023.....	62
IV.3.3 Conclusion	63
IV.4 Calcul et comparaison énergétique générale	63
IV.5 Étude de l'état de santé des panneau solaire par les réseaux neuronal récurrent :	64
IV.5.1 Définition des réseaux neuronaux récurrent (RNN).....	64
IV.5.2 Architecture de RNN.....	66
IV.5.3 Étude de performance par les RNN.....	67
Analyse de la Puissance (W).....	680
Analyse de l'Énergie (Wh)	68
Analyse de l'État de santé.....	69
Discussion	69
1. Puissance générée (courbe orange)	711

2. Efficacité de l'onduleur (courbe rouge)	71
3. Analyse globale.....	72
4. Implications pratiques	722
5. Conclusion.....	723
IV.6 Conclusion.....	723
Conclusion générale.....	75
Les références.....	77

Liste des figures

Chapitre I : Généralités Sur Les Systèmes Photovoltaïques

Figure I. 1: Énergie solaire	4
Figure I. 2: Énergie éolienne.....	4
Figure I. 3: Énergie hydraulique	5
Figure I. 4: Biomasse	5
Figure I. 5: Géothermie	5
Figure I. 6: Hydrogène renouvelable	6
Figure I. 7: Évolution annuelle des installations solaires photovoltaïques sur les marchés clés.....	9
Figure I. 8: Part annuelle des installations connectées au réseau centralisé et distribué 2013-2023	9
Figure I. 9: Système photovoltaïque autonome : éléments caractéristiques (champ photovoltaïque, onduleur, accumulateur, utilisateur)	11
Figure I. 10: système photovoltaïque grid-connected : éléments caractéristiques (champ photovoltaïque, onduleur, compteur, utilisateur, réseau électrique).....	12
Figure I. 11: Système photovoltaïque avec storage connecté au réseau : éléments caractéristiques (champ PV, onduleur, compteur, utilisateur, réseau électrique)	13
Figure I. 12: Système photovoltaïque avec storage connecté au réseau	13
Figure I. 13: panneaux photovoltaïques	14
Figure I. 14: panneaux thermiques	14
Figure I. 15: panneaux hybrides.	15
Figure I. 16: Montage de 2 panneaux en série	15
Figure I. 17: Montage de 2 cellules en parallèle	16
Figure I. 18: Structure basique d'une cellule photovoltaïque	17
Figure I. 19: Types des cellules photovoltaïques	18
Figure I. 20: Caractéristique électrique I-V d'une cellule PV.	19
Figure I. 21: Module photovoltaïque.....	21
Figure I. 22: Courbes I-V et P-V.....	23

Chapitre II : Les systèmes photovoltaïques et leur supervision

Figure II. 1: Capteur thermique.....	27
Figure II. 2: Capteur de luminosité	28
Figure II. 3: Capteur de courant et de tension	28
Figure II. 4: Exemples de défauts d'ombrage].....	31
Figure II. 5: Défaut de point chaud	32
Figure II. 6: Fissures dans les cellules PV	32
Figure II. 7: Défauts de la diode de by-pass et diode anti-retour	33

Chapitre IV : Étude de l'état de santé d'un système photovoltaïque par l'intelligence artificielle

Figure IV. 1 : Fonctionnement de la chaîne de production et d'acheminement d'énergie solaire	56
Figure IV. 2: Localisation et aperçu des trois centrales photovoltaïques étudiées	57
Figure IV. 3: Les panneaux solaires	58
Figure IV. 4: l'onduleur hybride	59
Figure IV. 5: Représentation graphique de la tension, du courant et de la puissance en fonction du temps Mars	600
Figure IV. 6: Représentation graphique de Irradiation et Température moyenne en fonction du temps de Mars.....	600
Figure IV. 7: Représentation graphique de la tension, du courant et de la puissance en fonction du temps Juin.....	611
Figure IV. 8: Représentation graphique de Irradiation et Température moyenne en fonction du temps de Juin	611
Figure IV. 24: Représentation graphique de la tension, du courant et de la puissance en fonction du temps Décembre.....	6262
Figure IV. 25: Représentation graphique de Irradiation et Température moyenne en fonction du temps de Décembre	6262
Figure IV. 26: Les réseaux de neurones récurrents	65
Figure IV. 27: Architecture des réseaux de neurones récurrents.	66
Figure IV. 28: Représentation graphique de la puissance annual générée par le système (2023 à gauche), et de l'efficacité de l'onduleur (à droite).....	7070

Liste des tableaux

Chapitre II : Les systèmes photovoltaïques et leur supervision

Tableau II. 1: Défauts du générateur photovoltaïque	30
Tableau II. 2: Différents défauts dans le générateur photovoltaïque	34
Tableau II. 3: Différents défauts dans la boîte de jonction	36
Tableau II. 4: Différents défauts dans le système de câblage	37
Tableau II. 5: Différents défauts dans le système de protection	38
Tableau II. 6: Différents défauts de l'onduleur	39
Tableau II. 7: Différents défauts dans le système d'acquisition des données	40

Chapitre IV : Étude de l'état de santé d'un système photovoltaïque par l'intelligence artificielle

Tableau IV. 1: Analyse comparative entre la puissance maximale et l'énergie maximale générées par les panneaux solaires en 2023	58
Tableau IV. 2: Tableau Comparatif des résultats de simulation pour la prédiction pour l'année 2023	63
Tableau IV. 3 : Tableau Comparatif des résultats de simulation pour la prédiction pour l'année 2023	68

Résumé

Ce mémoire porte sur l'amélioration de la performance et de la fiabilité des installations photovoltaïques grâce à l'intelligence artificielle. Dans le cadre d'un stage chez SONEGGAZ, des données réelles issues d'une centrale solaire ont été collectées (tension, courant, irradiation, température). Ces données ont été analysées à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique et de réseaux de neurones pour détecter les anomalies, anticiper les pannes et évaluer l'état des panneaux. Les résultats montrent que l'IA offre une meilleure capacité de diagnostic par rapport aux méthodes traditionnelles, contribuant ainsi à une gestion plus efficace et durable des systèmes photovoltaïques.

Abstract

This thesis explores the use of artificial intelligence (AI) to improve the efficiency and reliability of photovoltaic (PV) systems. Real data collected during an internship at SONELGAZ—covering voltage, current, solar irradiation, and temperature—was analyzed using machine learning and artificial neural networks. The AI-based approach enabled early fault detection, accurate health assessment, and better maintenance planning. Results demonstrated superior performance compared to traditional diagnostic methods, highlighting AI's potential for smarter, more sustainable management of solar energy systems.

الملخص

تستكشف هذه الأطروحة استخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة وموثوقية أنظمة الطاقة الكهروضوئية. خلّلت بيانات حقيقية جُمعت خلال فترة تدريب في شركة سونلغاز، شملت الجهد والتيار والإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، باستخدام تقنيات التعلم الآلي والشبكات العصبية الاصطناعية. أتاح النهج القائم على الذكاء الاصطناعي الكشف المبكر عن الأعطال، وتقييم الحالة الصحية بدقة، وتحسين تخطيط الصيانة. وأظهرت النتائج أداءً متفوقاً مقارنةً بأساليب التشخيص التقليدية، مما يُبرز إمكانات الذكاء الاصطناعي في إدارة أنظمة الطاقة الشمسية بذكاء واستدامة أكبر.

Introduction générale

Introduction générale

Face à l'augmentation de la demande énergétique mondiale et aux préoccupations environnementales croissantes, le recours aux énergies renouvelables s'impose comme une nécessité. Parmi celles-ci, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place centrale du fait de sa disponibilité, de sa propreté et de sa capacité à s'adapter à différentes échelles d'utilisation. Toutefois, les performances des systèmes photovoltaïques peuvent être affectées par de nombreux facteurs externes (irradiation, température, encrassement) et internes (vieillesse, pannes, dégradations), rendant nécessaire une supervision efficace et continue.

Dans ce contexte, l'intelligence artificielle (IA) offre des solutions novatrices pour l'analyse, le diagnostic et la prévision de l'état de santé des installations photovoltaïques. L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'apport des techniques d'IA dans l'évaluation des performances des panneaux solaires et la détection automatique des défauts, en exploitant des données réelles issues d'une centrale solaire.

Pour mener à bien cette étude, ce travail s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente les généralités sur les systèmes photovoltaïques, en détaillant leur principe de fonctionnement, leurs composants, les types de panneaux et les facteurs influençant leur rendement.

Le deuxième chapitre est consacré à la supervision des systèmes photovoltaïques. Il traite des différentes méthodes de surveillance, des types de défauts rencontrés dans les installations, ainsi que des outils de diagnostic traditionnels.

Le troisième chapitre explore les fondements de l'intelligence artificielle, en mettant l'accent sur les techniques pertinentes pour la supervision énergétique, notamment les réseaux de neurones et l'apprentissage automatique.

Enfin, le quatrième chapitre est dédié à l'application pratique de l'IA dans le diagnostic de l'état de santé des panneaux solaires. Il décrit la méthodologie suivie, l'exploitation des données collectées auprès de la centrale SONEGAS, les résultats obtenus et leur interprétation.

À travers cette démarche, ce mémoire ambitionne de démontrer le rôle clé que peut jouer l'intelligence artificielle dans la gestion intelligente des systèmes solaires, en vue d'une production énergétique plus fiable, plus durable et plus efficace.

Chapitre I

Généralités Sur Les Systèmes Photovoltaïques

I.1 Introduction

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont des dispositifs qui convertissent l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ils sont composés principalement de panneaux solaires, d'un onduleur pour transformer le courant continu en courant alternatif, et parfois d'un système de stockage (batteries).

Ils peuvent être utilisés pour alimenter des habitations, des industries ou des réseaux électriques, contribuant ainsi à la transition énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Leur performance dépend de plusieurs facteurs, tels que l'ensoleillement, l'orientation des panneaux et la qualité des équipements.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques. On a commençant par une définition et le fonctionnement des systèmes photovoltaïques. Ensuite, l'historique du photovoltaïques.

Puis les types de système photovoltaïques et des panneaux solaire, et les différents Caractéristique électrique d'une cellule. Après, nous étudierons leurs performances et rendement. Et à la fin en clôture par une conclusion.

I.2 Définition et fonctionnement des systèmes photovoltaïques

I.2.1 Définition des énergies renouvelables et classification

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine. Les énergies renouvelables sont également parfois désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres », par abus de langage. En effet, si les énergies renouvelables ont bien souvent des avantages écologiques, elles ne sont pas pour autant « vertes » ou « propres » dans le sens où elles ont aussi des conséquences environnementales importantes [1].

Classement et liste des énergies renouvelables

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes.

➤ Énergie solaire

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques).

Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) [1].



Figure I. 1: Énergie solaire [2]

➤ Énergie éolienne

Dans le cas de l'énergie éolienne, l'énergie cinétique du vent entraîne un générateur qui produit de l'électricité. Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables éoliennes : les éoliennes terrestres, les éoliennes off-shore, les éoliennes flottantes... Mais le principe reste globalement le même pour tous ces types d'énergies renouvelables [1].



Figure I. 2: Énergie éolienne [2]

➤ Énergie hydraulique

L'énergie cinétique de l'eau (fleuves et rivières, barrages, courants marins, marées) actionne des turbines génératrices d'électricité.

Les énergies marines font partie des énergies hydrauliques [1].



Figure I. 3: Énergie hydraulique [2]

➤ **Biomasse**

L'énergie est issue de la combustion de matériaux dont l'origine est biologique (ressources naturelles, cultures ou déchets organiques). On en distingue trois catégories principales [1] : Le bois, Le biogaz, Les biocarburants



Figure I. 4: Biomasse [2]

➤ **Géothermie**

L'énergie est issue de la chaleur émise par la Terre et stockée dans le sous-sol. Selon la ressource et la technologie mise en œuvre, les calories sont exploitées directement ou converties en électricité [1].



Figure I. 5: Géothermie [2]

➤ Hydrogène renouvelable

L'hydrogène est un gaz qui peut être utilisé comme un vecteur énergétique, notamment pour produire de l'énergie électrique grâce à des piles à combustible. En soi, l'hydrogène n'est pas une ressource renouvelable à proprement parler. Il s'agit d'un gaz que l'on ne trouve que rarement « tel quel » dans la nature, et qui se renouvelle peu.

On doit donc le plus souvent produire l'hydrogène à partir de ressources qui, elles, sont très abondantes ou se renouvellent, comme l'eau. Il faut alors utiliser de l'énergie pour transformer l'eau en hydrogène, et lorsque cette énergie est d'origine renouvelable (par exemple, de l'électricité issue de productions renouvelables) on qualifie parfois (un peu abusivement) cet hydrogène de « renouvelable » ou d'hydrogène vert [1].



Figure I. 6: Hydrogène renouvelable [2]

1.2.2 Importance du photovoltaïque dans la transition énergétique

Lorsque l'on pense au développement durable et à la nécessaire transition énergétique, on a alors en tête l'abandon devenu indispensable des ressources d'énergie fossiles. Qu'il s'agisse du charbon, du pétrole, du gaz naturel ou encore de l'exploitation de l'énergie nucléaire, toutes ces ressources énergétiques centralisées et polluantes n'ont pas un caractère renouvelable. À l'inverse, utiliser l'énergie du vent (éolien), de l'eau (hydraulique) de la terre (géothermie) ou encore du soleil (solaire) est une démarche responsable et durable.

L'énergie solaire est depuis plusieurs décennies maintenant une des réponses les plus adaptées pour s'inscrire dans le cadre de la transition énergétique.

- L'énergie solaire est une ressource inépuisable, issue des rayons émis par le soleil. Bien que tous les pays du monde ne disposent pas d'un accès équivalent au soleil, tous peuvent exploiter son énergie !

- Le solaire est aussi une énergie polyvalente. En effet, son exploitation permet à la fois de produire de la chaleur et de l'électricité.
- L'exploitation des rayons du soleil entraîne peu d'émissions de gaz à effet de serre.
- L'énergie solaire est une énergie abordable. Le coût d'installation de panneaux solaires thermiques ou de panneaux photovoltaïques a considérablement diminué au fur et à mesure que la technologie a progressé. En parallèle de cette baisse du coût de l'installation, la capacité d'énergie émise par les panneaux a augmenté rendant le coût de l'énergie très attractif [3].

I.2.3 Avantages et limites du solaire par rapport aux autres sources d'énergie

L'énergie solaire présente de nombreux avantages qui en font une option attrayante pour la production d'électricité ou la production de chaleur pour l'habitat de la population.

En premier lieu, l'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable et surtout inépuisable. Elle utilise les rayons du soleil, une ressource disponible partout en sur le globe. Que vous viviez au Nord ou au Sud, les rayons du soleil vous offrent la possibilité de produire à longueur de journée votre propre électricité verte et décarbonée.

L'utilisation de l'énergie solaire produite par les panneaux photovoltaïques sur le toit de votre habitat permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et contribue à la transition vers des sources d'énergie plus propres.

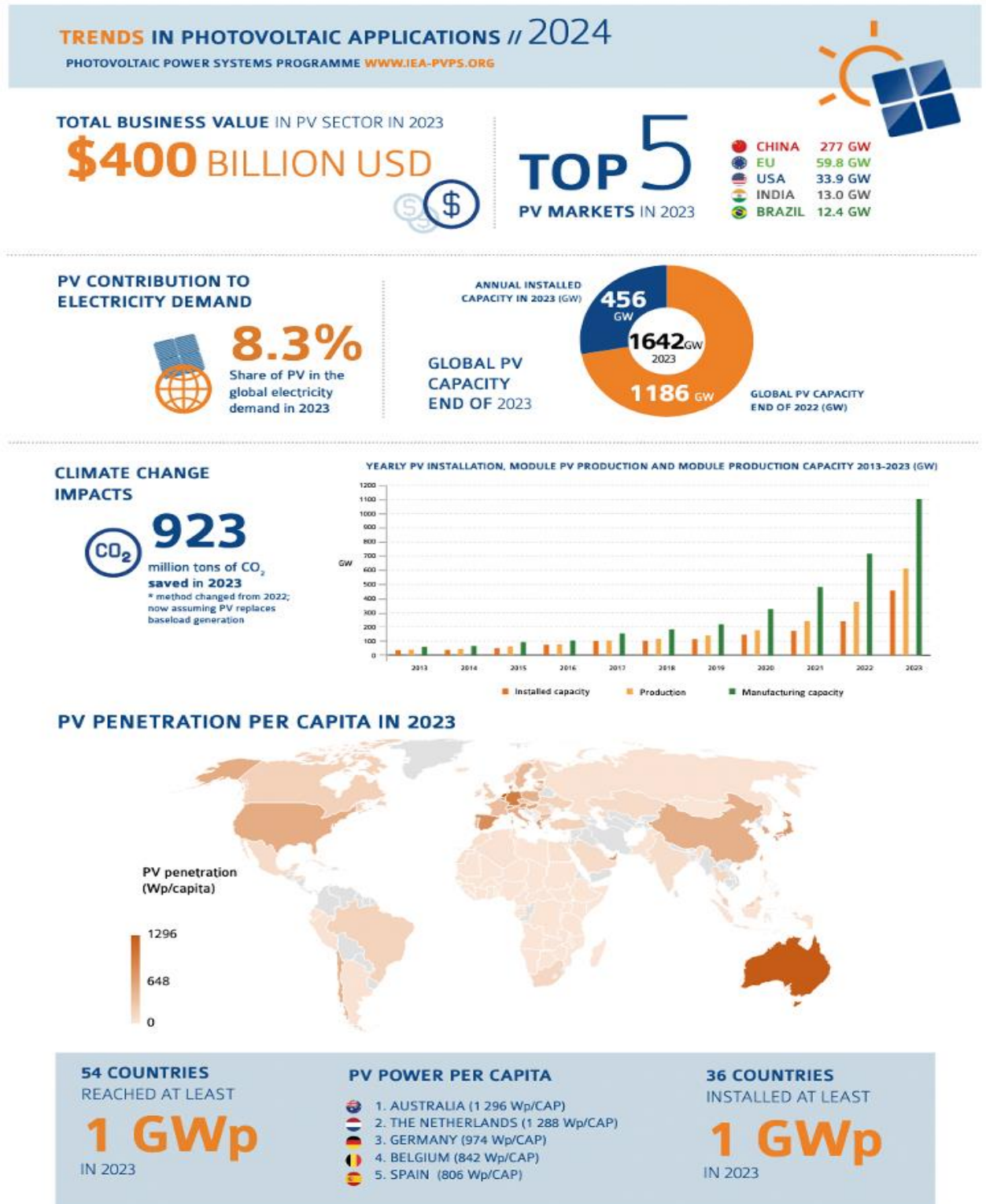
Un autre avantage de taille de l'énergie solaire est qu'elle ne produit pas de gaz à effet de serre ni de polluants atmosphériques lors de son utilisation pour la production d'électricité. Cela a un impact positif sur la qualité de l'air que l'on respire et contribue à la lutte contre le changement climatique.

De plus, l'installation de panneaux photovoltaïques sur les toits des habitations, des bâtiments commerciaux ou des centrales solaires permet de générer de l'électricité localement. Ceci permet aux propriétaires de réaliser directement des économies sur leur facture d'électricité et ainsi de réduire leur dépendance aux augmentations du prix des fournisseurs du réseau. L'installation de panneaux photovoltaïques est un excellent investissement qui s'avère très rentable dans le temps.

Consommer l'électricité solaire que vous avez vous-même produite et qui alimente directement tous les appareils de votre habitat s'appelle l'autoconsommation. Elle vous permet d'atteindre une certaine indépendance énergétique. Si votre installation est complétée par une batterie, vous pouvez atteindre une autonomie proche des 100% [4].

I.2.4 État actuel du marché photovoltaïque au niveau mondial et national

456 GW d'installations photovoltaïques ont été mis en service en 2023, le parc mondial atteint 1642 GW. La capacité de production de modules approche quant à elle les 1100 GW/an, cette valeur est bien supérieure à la production de 2023 car les fabricants de modules anticipent une forte croissance de la demande dans les années à venir [5].



Alors que la demande européenne dépassait les 90 % du marché mondial du photovoltaïque en 2010, elle n'en représente plus que 13 % en 2023. La demande se concentre d'abord en Chine, qui représente à elle seule plus de la moitié des nouvelles capacités installées en 2023, suivi par l'Union européenne, les USA (env. 6%) et l'Inde (env. 2%) [5].

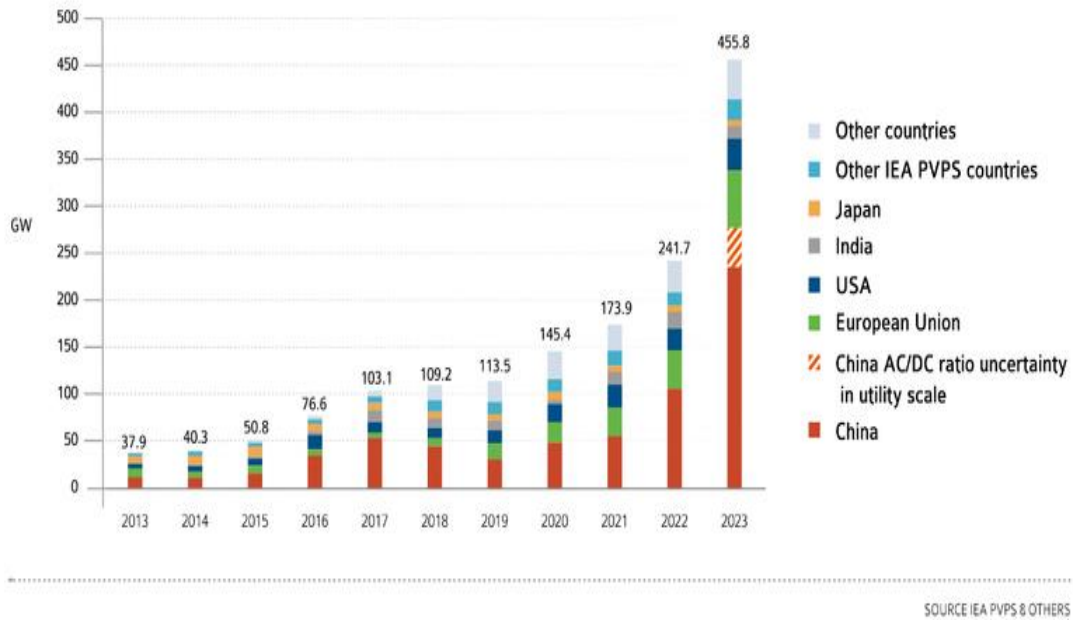


Figure I. 7: Évolution annuelle des installations solaires photovoltaïques sur les marchés clés [5]

Les grandes installations au sol ("Grid-connected centralized") représentent 60 % du volume installé dans le monde en 2023. Les autres installations ("Grid-connected distributed") sont pour l'essentiel des systèmes en toiture [5].

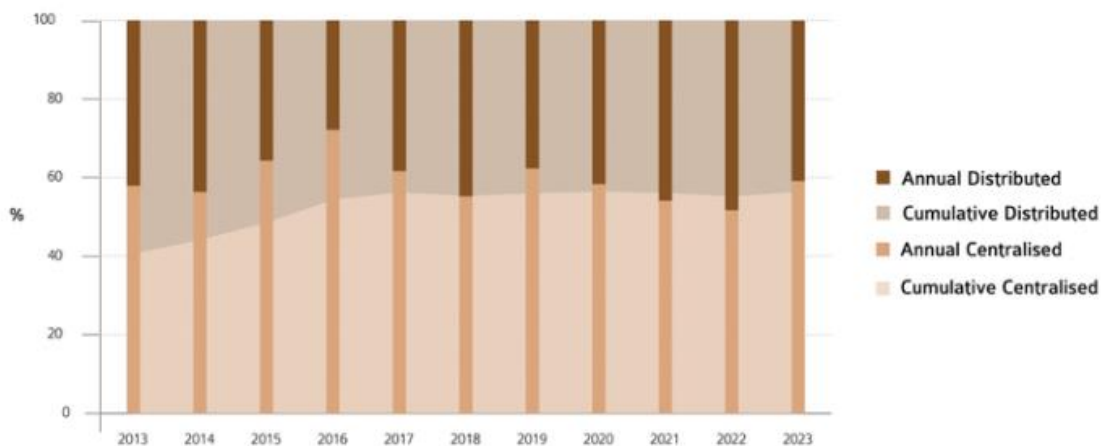


Figure I. 8: Part annuelle des installations connectées au réseau centralisé et distribué 2013-2023 [5]

Représentant 85 % du marché en 2010, le tarif d'achat en guichet ouvert reste le principal système de soutien utilisé dans le monde en 2020 (52 % du marché). La décennie a vu l'émergence de nouveaux modèles tels que les appels d'offres, ou le soutien à l'autoconsommation. Les subventions à l'investissement se maintiennent à 15 % du marché mondial, alors que le système de certificats verts reste très peu utilisé [5].

I.3 Histoire du photovoltaïque

L'énergie solaire est propre et renouvelable. La Terre reçoit sous forme de lumière du Soleil plus de 10 000 fois l'énergie que l'humanité consomme. En effet, la surface du globe reçoit annuellement de l'énergie solaire ayant une puissance allant de 85 à 290 W/m². Et cette énergie est inépuisable car elle est entretenue par les réactions nucléaires qui ont lieu dans le soleil. Bien que la ressource ait toujours existé, son utilisation est assez récente dans l'histoire de l'humanité. On voit apparaître les premières réalisations technologiques solaires au XIX^e siècle mais c'est véritablement pendant la deuxième partie du XX^e siècle que l'énergie solaire commence à apparaître comme une source d'énergie importante, particulièrement avec le développement du photovoltaïque. C'est dans le cadre de la course à l'espace entre les États-Unis et l'Union soviétique que la recherche et développement dans cette énergie fait un bond. Puis peu à peu, à partir des années 1970, l'énergie photovoltaïque prend place dans l'industrie terrestre. L'histoire de l'énergie solaire ne peut se comprendre sans tenir compte de celles des énergies concurrentes (principalement les combustibles fossiles) et des contraintes économiques auxquelles elle est soumise [6].

I.4 Types de systèmes photovoltaïques et des panneaux photovoltaïques

I.4.A-Types de systèmes photovoltaïques

Il existe différents types de systèmes photovoltaïques :

I.4.1 Système photovoltaïque autonome

Le premier des 2 types de systèmes photovoltaïques est le système solaire autonome, ou système en îlot, c'est un type d'installation photovoltaïque qui n'est pas connecté au réseau électrique national, mais qui est connecté à un système autonome de stockage d'énergie – batteries électriques – qui stockent l'électricité produite par l'installation et la restituent

aux utilisateurs au moment où ils en ont besoin [7].

STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

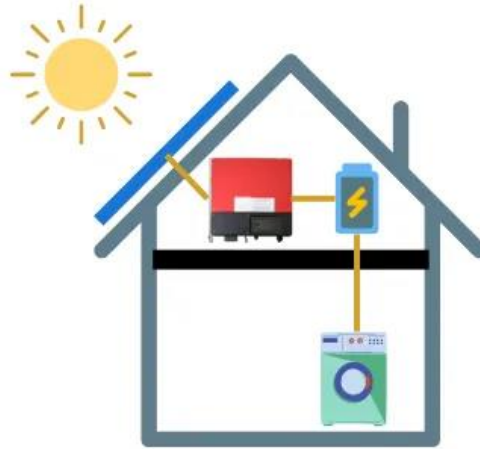


Figure I. 9: Système photovoltaïque autonome : éléments caractéristiques (champ photovoltaïque, onduleur, accumulateur, utilisateur) [7]

Les éléments typiques d'un système autonome sont les suivants : Champ photovoltaïque ; onduleur ; accumulateur ; régulateur de charge.

I.4.2 Système photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau

Le deuxième des 2 types de systèmes photovoltaïques est le système photovoltaïque couplé au réseau, ou grid-connected, c'est un système solaire connecté au réseau électrique national. Dans ce type d'installation, le réseau électrique national devient un réservoir infini de stockage dans lequel l'énergie provenant de sources renouvelables est injectée lorsque l'installation produit et que l'utilisateur ne consomme pas et depuis lequel l'électricité est prélevée au moment du besoin, lorsque l'installation ne produit pas (la nuit) [7].

GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

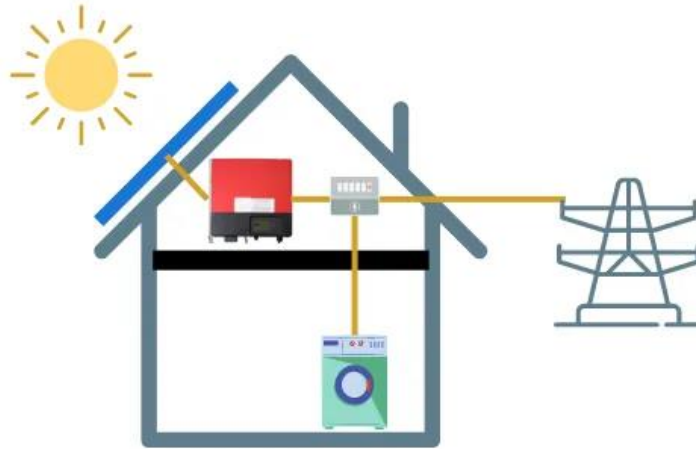


Figure I. 10: système photovoltaïque grid-connected : éléments caractéristiques (champ photovoltaïque, onduleur, compteur, utilisateur, réseau électrique) [7]

Le schéma d'installation photovoltaïque grid-connected se compose de plusieurs éléments :

- Panneau solaire
- Onduleur
- Compteur de production
- Compteur d'échange

I.4.3 Système avec stockage d'énergie électrique « Storage » connecté au réseau électrique

Parmi les types de systèmes photovoltaïques, le plus courant aujourd'hui est le modèle avec stockage d'énergie électrique, connecté au réseau électrique.

Il s'agit d'un système innovant dans lequel l'énergie produite est d'abord stockée dans les systèmes de Storage (ou de stockage) et, une fois que la capacité des batteries est atteinte, l'énergie résiduelle est injectée dans le réseau électrique national. Pour cette caractéristique, il est également appelé système photovoltaïque hybride [7].

Une installation photovoltaïque « Storage » connectée au réseau électrique se compose de :

- Panneau solaire
- Batteries lithium-ion
- Onduleur
- Compteur de production
- Compteur d'échange

GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH ENERGY HARVESTING

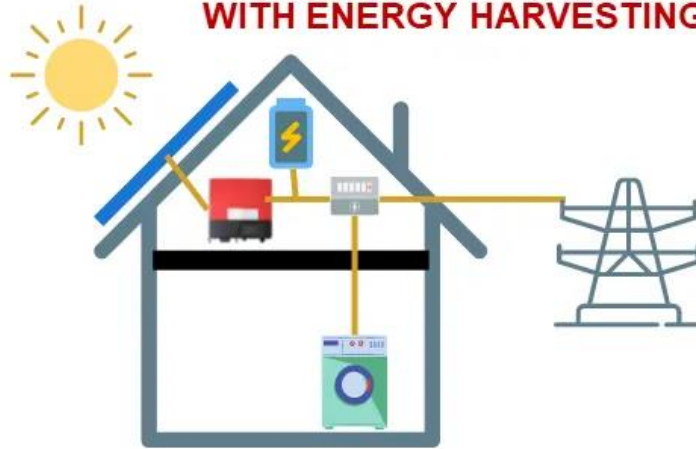


Figure I. 11: Système photovoltaïque avec storage connecté au réseau : éléments caractéristiques (champ PV, onduleur, compteur, utilisateur, réseau électrique) [7]

Les principales caractéristiques à prendre en compte dans un système de stockage photovoltaïque domestique sont les suivantes :

- La puissance du système de stockage, c'est-à-dire la capacité de stockage de l'électricité
- La durée de vie de la batterie au lithium
- L'activité de l'onduleur
- L'efficacité en accumulation et en recharge
- La taille et le poids du stockage [7]

GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH ENERGY HARVESTING

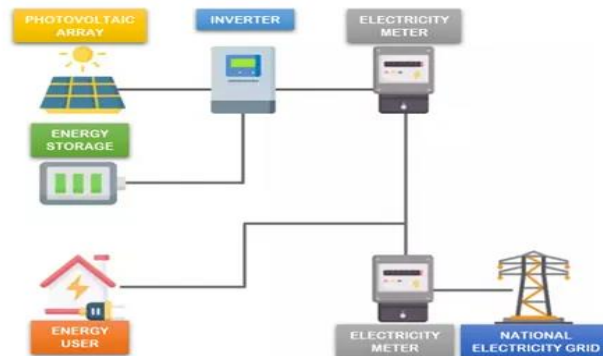


Figure I. 12: Système photovoltaïque avec storage connecté au réseau [7]

I.4.B-Types des panneaux photovoltaïques

Il existe trois grandes catégories de panneaux solaires :

- **Les panneaux photovoltaïques** : convertissent la lumière du soleil en électricité ;
- **Les panneaux solaires thermiques** : produisent de la chaleur grâce aux rayons lumineux ;
- **Les panneaux hybrides** : allient conversion de l'énergie solaire en électricité et en chaleur.

Au-delà de ces 3 familles, les panneaux solaires se déclinent en plusieurs sous-catégories, chacune conçue pour répondre à des contextes et des besoins différents [8].

Technologie solaire	Types de panneaux solaires associés	Description
Photovoltaïque	- Monocristallin - Polycristallin - Amorphe (couches minces) - Bifacial - Shingled	Conversion de la lumière en électricité avec des cellules en silicium ou autres matériaux, adaptées à divers besoins.
Thermique	- Capteurs plans non vitrés - Capteurs plans vitrés - Tubes sous vide - Capteurs à air	Transformation de l'énergie solaire en chaleur pour chauffer de l'eau ou de l'air.
Hybride (PV/T)	- PV/T eau - PV/T air (aérovoltaique)	Production simultanée d'électricité et de chaleur à partir d'un seul module.



Figure I. 13: panneaux photovoltaïques



Figure I. 14: panneaux thermiques



Figure I. 15: panneaux hybrides.

I.5 Les différents montages des panneaux photovoltaïques

I.5.1 Le montage de panneaux PV en série

Intégration d'une centrale photovoltaïque dans le réseau isolé d'ADRAR (PIAT) Pour une installation sur mesure, on raccorde les panneaux en série ou en parallèle, voire une combinaison des deux. Le montage de panneaux photovoltaïques en série est l'option à retenir pour additionner les voltages des panneaux en préservant un ampérage identique. On relie le pôle positif d'un panneau au pôle négatif de l'autre qui a le même ampérage. En effet si l'on relie deux panneaux d'ampérage différent, l'ensemble s'aligne sur l'ampérage le plus faible figure (I.15) [9].

Branchement de panneaux en série

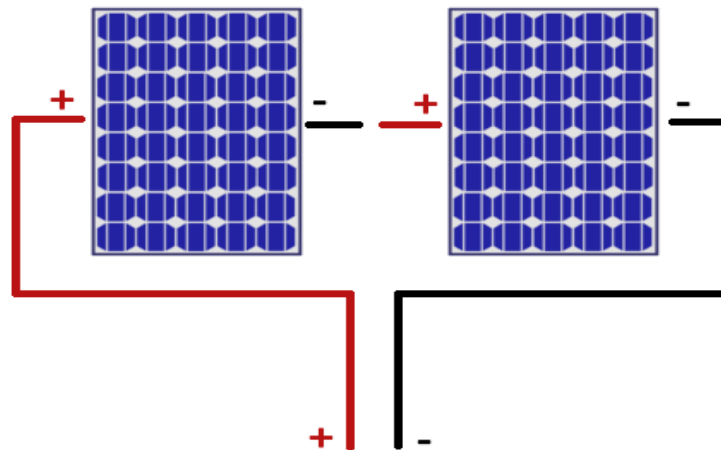


Figure I. 16: Montage de 2 panneaux en série [9]

I.5.2 Le montage des panneaux en parallèle

Le montage des panneaux photovoltaïques en parallèle additionne les intensités tandis que la tension reste identique. Ce type de raccordement influe donc sur l'ampérage et non sur le voltage. Les bornes positives des panneaux sont reliées entre elles, de même que les bornes

négligables. On choisit ce type de branchement lorsque l'on souhaite une forte intensité. Afin d'éviter les risques de surtension et de court-circuit, on relie des panneaux de même voltage. On peut par contre utiliser des panneaux d'intensité différente afin d'atteindre l'ampérage désiré figure (I.16) [9].

Branchement de panneaux en parallèle

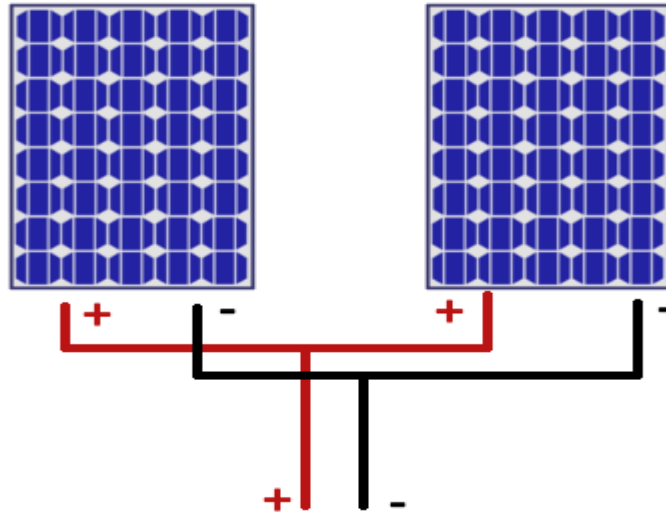


Figure I. 17: Montage de 2 cellules en parallèle [9]

I.6. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque (PV) est une technique de collecte d'énergie qui transforme l'énergie solaire en électricité utilisable grâce à un phénomène appelé "effet photovoltaïque". Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques qui utilisent toutes des semi-conducteurs pour interagir avec les photons du soleil afin de générer un courant électrique.

La cellule photovoltaïque est composée de plusieurs couches de matériaux, chacune ayant une fonction spécifique. La couche la plus importante d'une cellule photovoltaïque est la couche semi-conductrice spécialement traitée. Elle est composée de deux couches distinctes (type p et type n - voir figure I.17-), et c'est elle qui convertit réellement l'énergie du soleil en électricité utile par un processus appelé effet photovoltaïque. De chaque côté du semi-conducteur se trouve une couche de matériau conducteur qui "collecte" l'électricité produite. Notez que la face arrière ou ombragée de la cellule peut se permettre d'être entièrement recouverte par le conducteur, tandis que la face avant ou éclairée doit utiliser les conducteurs avec parcimonie pour éviter de bloquer une trop grande partie du rayonnement solaire pour qu'il n'atteigne le semi-conducteur. La dernière couche qui est appliquée uniquement sur le côté éclairé de la cellule est le revêtement antireflet. Comme tous les semi-conducteurs sont

naturellement réfléchissants, la perte par réflexion peut être importante. La solution consiste à utiliser une ou plusieurs couches d'un revêtement antireflet (similaire à ceux utilisés pour les lunettes et les appareils photo) pour réduire la quantité de rayonnement solaire qui est réfléchi à la surface de la cellule [10].

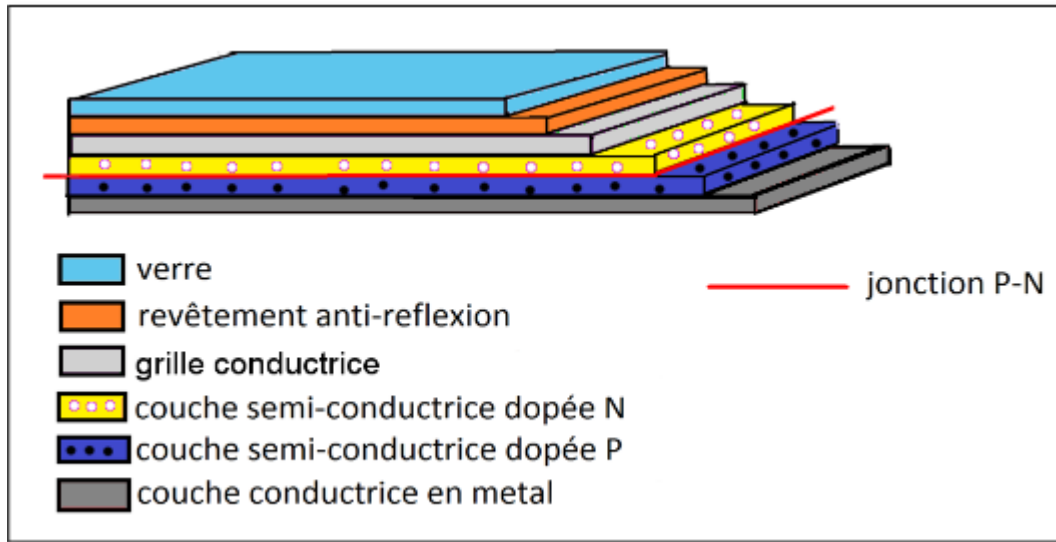


Figure I. 18: Structure basique d'une cellule photovoltaïque

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [10].

I.6.1. Types des cellules photovoltaïques

Il existe trois technologies principales des cellules solaires à base de silicium : cellule en silicium monocristallin, polycristallin et cellule en silicium amorphe avec une quatrième technologie qui consiste à la mise en contact des deux matériaux, appelé cellule hétérojonction, elle est reçue par dépôt de silicium amorphe hydrogéné ultrafines sur le substrat cristallin (mono et poly) (Figure I.18), à chaque type de cellule correspond un rendement et un coût [11-12].

I.6.1.1. La cellule mono- cristallin

Cette cellule est constituée d'un monocristal scindé en deux couches. C'est la cellule qui a le meilleur rendement (12- 16% ; jusqu'à 23% en laboratoire), la cellule qui est la plus proche du modèle théorique mais aussi celle qui a le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée, elle est identifiée par leur forme carrée avec 4 côtés coupés.

I.6.1.2. La cellule poly- cristallin

La conception de la cellule multi- cristallin étant la plus facile, elle est composée d'une accumulation de cristaux. Elles proviennent également du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : 11% - 14% (18% en laboratoire). Elle est identifiée par leur forme carrée.

I.6.1.3. La cellule amorphe à couche mince

Cette catégorie a un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium déposé sur un support généralement flexible. Elle est utilisée couramment dans de petits produits de consommation tel que des calculatrices solaires ou encore des montres.

I.6.1.4. La cellule solaire HIT

Une cellule solaire HIT est composée d'une tranche de silicium cristallin mono-mince entourée de couches de silicium amorphe ultra-minces [12]. L'acronyme HIT signifie "hétérojonction avec couche mince intrinsèque". Les cellules HIT sont produites par la multinationale japonaise d'électronique Panasonic. Les cellules solaires HIT présentent un meilleur coefficient de température que les cellules solaires conventionnelles p/n homojonction c-Si. Par conséquent, on peut obtenir plus de puissance avec les cellules solaires HIT en utilisation réelle que les cellules solaires c-Si conventionnelles.

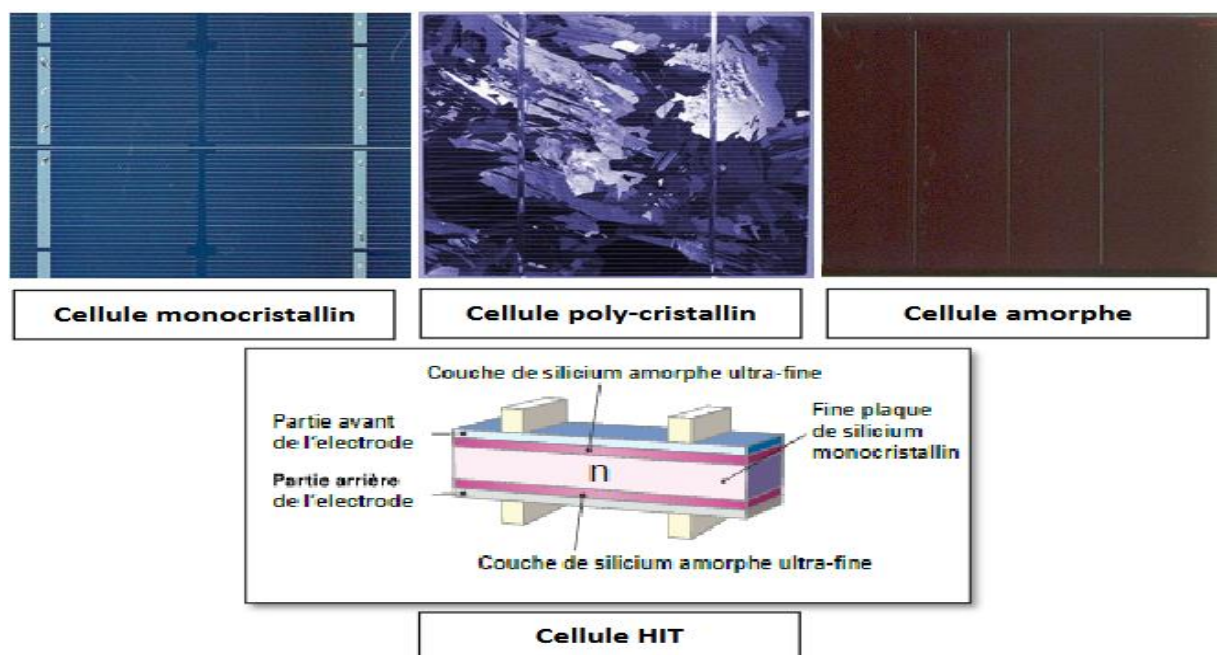


Figure I. 19: Types des cellules photovoltaïques

I.6.2. Caractéristique électrique d'une cellule PV

En fonctionnement nominal, les cellules PV sont utilisées pour produire de l'énergie avec une tension de circuit ouvert (V_{co}) et de courant de court-circuit (I_{cc}) qui correspond au courant quand la cellule est court-circuitée, il est proportionnel à la surface de la cellule et dépend de l'intensité de lumière absorbée par la cellule. La tension de circuit ouvert (V_{co}) est la tension aux bornes de la cellule quand il n'y a pas de courant (figure I.19) [13].

I.6.2.1. La courbe courant-tension

La caractéristique I-V est la caractéristique essentielle de la cellule solaire qui répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier des conditions d'ensoleillement et de température. Il y a trois points importants dans cette courbe (Figure I.19) [13] :

- Le point A où la tension est égale à zéro et le courant est maximum (courant de court-circuit I_{cc}).
- Le point B c'est le point de fonctionnement optimal auquel la cellule fournit sa puissance maximale.
- Le point C où le courant est égal à zéro et la tension est maximale (tension de circuit ouvert, V_{co}).

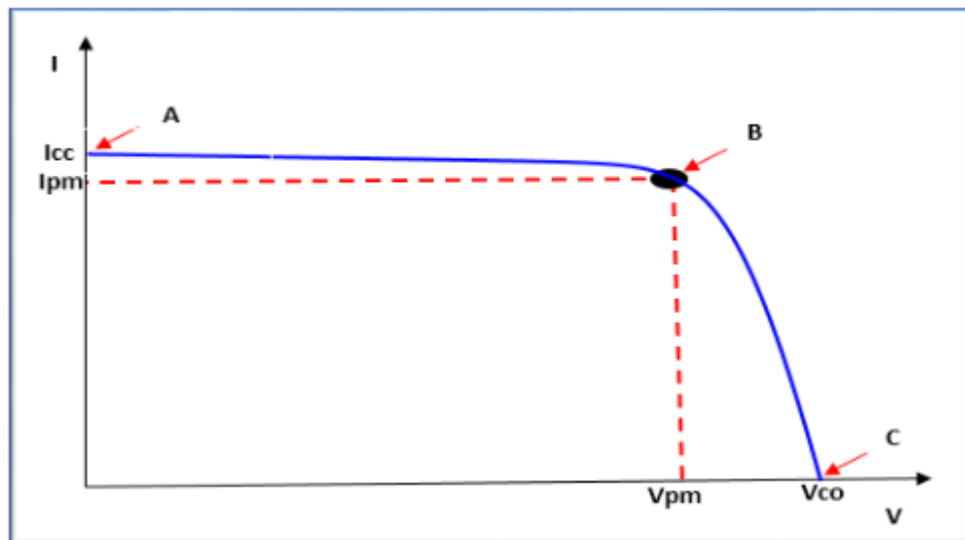


Figure I. 20: Caractéristique électrique I-V d'une cellule PV.

I.6.2.2. Le courant de court-circuit I_{cc} (pour $V_{co} = 0$)

Le courant de court-circuit I_{cc} : c'est le courant maximal généré par la cellule lorsqu'elle est soumise à un court-circuit $V = 0$ pour un éclairage « plein soleil », Il est directement proportionnel à l'énergie rayonnante reçue sur la surface de la cellule. On obtient sa valeur

en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule. Puisque $R_s \ll R_{sh}$ on peut mettre $I_{cc} \approx I_{ph}$ [13].

I.6.2.3. La tension de circuit ouvert V_{co} (pour $I_{cc} = 0$)

La tension de circuit ouvert V_{co} : c'est la tension aux bornes de la cellule sans charge où le courant généré $I = 0$. En négligeant le courant qui passe dans la résistance parallèle R_{sh} , le V_{co} , s'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule [13].

I.6.2.4. La puissance maximale, Le point de puissance maximale (PPM)

La cellule solaire fournit des puissances différentes selon le point de fonctionnement dans lequel elle est utilisée. Le point où la puissance maximale est prévue, est appelé le point de puissance maximale (PPM). Comme la puissance d'un point de fonctionnement correspond toujours à la surface $V \times I$, cette zone doit être au maximum dans le cas de PPM. Où les valeurs du courant et de la tension associée au PPM sont appelés I_{PPM} et V_{PPM} [13].

$$P_{PPM} = V_{PPM} \times I_{PPM} \quad (I.1)$$

I.6.2.5. Facteur de forme (FF)

Le FF est défini comme le rapport entre la puissance maximale de la cellule solaire et le produit de V_{oc} et I_{cc} , de sorte que : Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes, et il diminue avec la température [13], son expression est donnée par :

$$FF = (\text{puissance maximale délivrée sur la charge}) / (V_{co} \times I_{cc}) \quad (I.2)$$

$$FF = \frac{V_{PPM} \times I_{PPM}}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{P_{PPM}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (I.3)$$

I.6.2.6. Rendement de la conversion (η)

C'est la grandeur la plus importante dans l'étude d'une cellule solaire. Le rendement d'une cellule solaire est déterminé par la proportion de la puissance reçue qui est convertie en électricité et est défini comme suit [13] :

$$\eta = \frac{P_{PPM}}{P_{opt}} = \frac{P_{PPM}}{E \times S} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{E \times S} \quad (I.4)$$

Où,

S : La surface de la cellule solaire.

E : Rayonnement solaire.

I.7. Le module photovoltaïque

L'énergie produite par une seule cellule photovoltaïque n'est pas suffisante pour un usage général. Normalement, une seule cellule photovoltaïque génère une tension et un courant de sortie relativement faibles. Le module PV est construit en connectant des groupes de cellules PV en série et en parallèle avec leurs dispositifs de protection, ce qui représente l'unité de conversion dans le système de production. En connectant de nombreuses cellules en série, la tension du module PV est augmentée et les pertes par conduction dans les câbles sont minimisées, tandis que la connexion en parallèle des cellules augmente le courant. Un module PV représente l'élément de base pour la production d'énergie PV à grande échelle. La plupart des modules commerciaux sont composés de 36 ou 72 cellules.

Les modules se composent d'une face avant transparente, des cellules PV encapsulées et d'une face arrière. Le matériau de la face avant est généralement constitué de verre trempé et à faible teneur en fer (Figure I.20). Le rendement d'un module PV est inférieur à celui d'une cellule PV car une partie de l'irradiation solaire est réfléchiée par la couverture en verre et l'ombre portée du cadre [14,15].

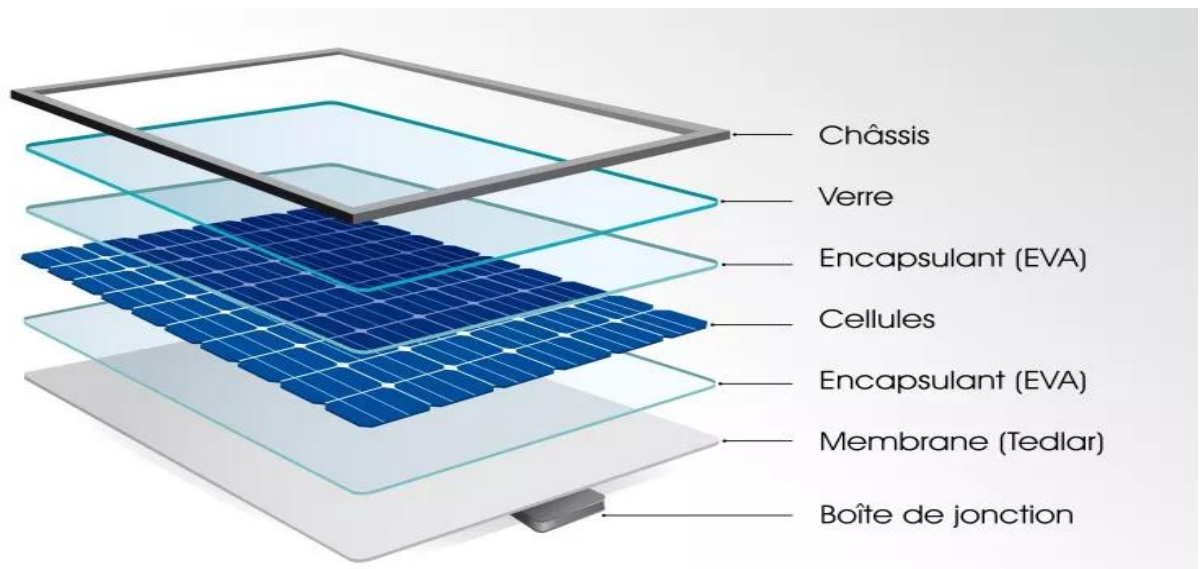


Figure I. 21: Module photovoltaïque

I.8 Performances et rendement des systèmes photovoltaïques

Le rendement d'un système photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs environnementaux et technologiques. Les performances d'un module solaire sont évaluées à travers des courbes caractéristiques et l'analyse des conditions climatiques qui influencent la production d'énergie.

I.8.1 Facteurs influençant le rendement : température, encrassement, ombrage

Le rendement d'un module photovoltaïque est principalement affecté par trois facteurs :

Température : Une augmentation de la température des cellules photovoltaïques entraîne une diminution de la tension en circuit ouvert (V_{oc}) et donc une baisse du rendement global du module. Chaque type de cellule possède un coefficient de température qui indique la perte de rendement par degré Celsius supplémentaire.

Encrassement : L'accumulation de poussière, de pollens, de particules fines ou de neige sur la surface du module réduit la quantité de lumière atteignant les cellules solaires, ce qui entraîne une diminution de la puissance de sortie. Un nettoyage régulier permet d'optimiser la production d'énergie.

Ombrage : Un ombrage partiel, même sur une seule cellule, peut entraîner une baisse significative du rendement. Cela est dû à la connexion en série des cellules, où une cellule ombrée agit comme une résistance qui limite le courant global du module. Des solutions comme l'utilisation de diodes bypass permettent de réduire ces pertes [16].

I.8.2 Courbes I-V et P-V : Analyse des performances d'un module solaire

Les performances d'un module photovoltaïque sont évaluées à l'aide des courbes caractéristiques :

Courbe I-V (Intensité-Tension) : Cette courbe montre la relation entre l'intensité (I) et la tension (V) du module. La puissance maximale est obtenue au point de puissance maximale (MPP - Maximum Power Point), où le produit est optimal [17].

Courbe P-V (Puissance-Tension) : Cette courbe permet d'identifier le MPP en observant le point où la puissance est maximale. Un suivi du point de puissance maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracking) est nécessaire pour optimiser la production d'énergie.

L'analyse de ces courbes est essentielle pour diagnostiquer des dysfonctionnements (cellules endommagées, encrassement, problèmes d'interconnexion) [17].

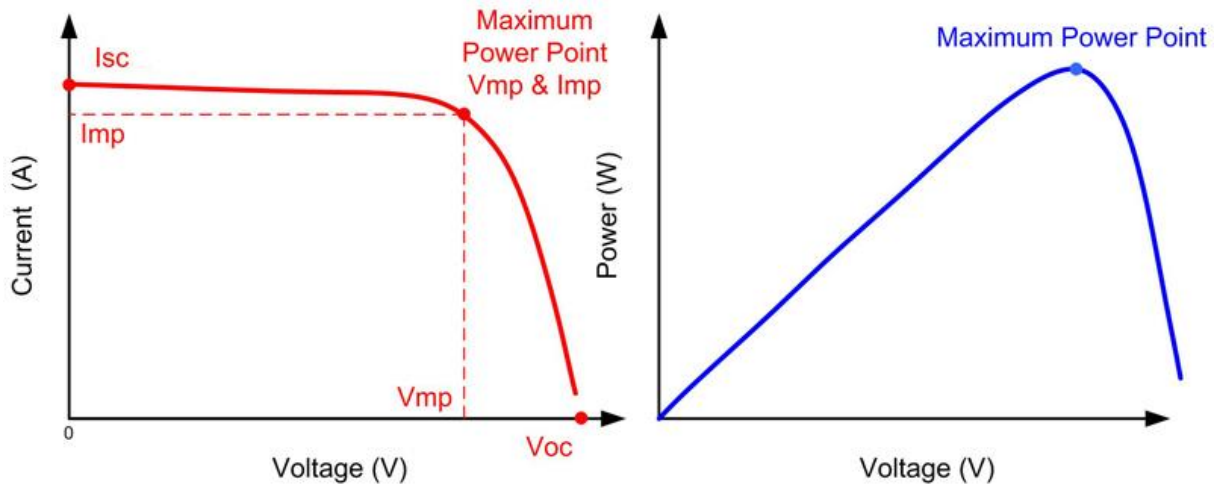


Figure I. 22: Courbes I-V et P-V [17]

I.8.3 Effet des conditions climatiques sur la production d'énergie

Les conditions climatiques jouent un rôle crucial dans la performance des systèmes photovoltaïques [18] :

Irradiation solaire : L'énergie produite est directement proportionnelle au niveau d'ensoleillement. Une forte irradiation augmente la puissance de sortie du module, tandis qu'un ciel nuageux réduit la production.

Température ambiante : Une température élevée entraîne une diminution du rendement des cellules photovoltaïques en raison de la baisse de la tension en circuit ouvert.

Humidité et précipitations : Une humidité élevée peut accélérer le vieillissement des modules, tandis que la pluie peut aider à nettoyer la surface des panneaux, améliorant ainsi leur rendement.

Vent : Il peut avoir un effet bénéfique en refroidissant les modules et en limitant l'élévation de la température, réduisant ainsi les pertes thermiques [18].

I.9 Conclusion

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

Chapitre II

*Les systèmes photovoltaïques et leur
supervision*

II.1 Introduction

Les systèmes photovoltaïques permettent de convertir l'énergie solaire en électricité, offrant une solution durable et renouvelable pour la production d'énergie. Pour garantir leur efficacité et leur longévité, une supervision continue est essentielle. Celle-ci permet de surveiller la performance des panneaux, de détecter d'éventuelles pannes et d'optimiser la production. Grâce aux technologies modernes, comme les capteurs intelligents et l'analyse des données, la supervision améliore la gestion et la rentabilité des installations photovoltaïques.

Dans ce chapitre, nous présentons l'importance de la supervision des systèmes photovoltaïques. Ensuite, les méthodes de supervision traditionnelles.

Puis l'identification et classification des pannes dans un système PV (Défauts électriques, Défauts environnementaux, Problèmes liés aux onduleurs et systèmes de stockage). Après, nous étudierons l'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques. Et à la fin en clôture par une conclusion.

II.2 Importance de la supervision des systèmes photovoltaïques

II.2.1 Rôle de la surveillance dans l'optimisation des performances

Les systèmes de surveillance solaire jouent un rôle crucial dans l'optimisation des performances des solutions solaires connectées au réseau. Ces systèmes fournissent des données en temps réel sur la production d'énergie solaire et permettent aux utilisateurs de surveiller et de gérer efficacement leur production solaire. Dans cet article, nous explorerons l'importance des systèmes de surveillance solaire dans les solutions connectées au réseau et discuterons de la manière dont ils peuvent améliorer l'efficacité et la fiabilité globales des systèmes d'énergie solaire [19].

II.2.2 L'importance des systèmes de surveillance solaire

Les systèmes de surveillance solaire sont des composants essentiels des solutions sur réseau car ils permettent aux utilisateurs de suivre les performances de leurs panneaux solaires et de s'assurer qu'ils fonctionnent à leur capacité maximale. En surveillant les indicateurs de performance clés tels que la production d'énergie, l'efficacité du système et les conditions météorologiques, les utilisateurs peuvent identifier tout problème ou inefficacité potentiel de leurs systèmes d'énergie solaire. Ces données en temps réel peuvent aider les utilisateurs à identifier et à résoudre rapidement les problèmes, minimisant ainsi les temps d'arrêt et maximisant la production d'énergie [20].

II.3 Méthodes de supervision traditionnelles

II.3.1 Techniques de mesure et d'évaluation des performances

L'évaluation et la mesure des performances des panneaux solaires sont essentielles pour garantir leur efficacité et leur rentabilité. Voici les principales techniques utilisées :

A-Mesure de l'Irradiation Solaire

L'irradiation solaire est la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface et est mesurée en kilowattheures par mètre carré (kWh/m²). La mesure précise de cette irradiation est cruciale pour évaluer la performance des panneaux solaires. Deux méthodes principales sont utilisées [21] :

Capteurs sur site : Des instruments tels que des pyranomètres ou des cellules de référence sont installés à proximité des panneaux pour mesurer directement l'irradiation reçue. Cette méthode offre une grande précision mais nécessite une maintenance régulière.

Données satellitaires : Des estimations de l'irradiation sont obtenues à partir de données satellitaires, réduisant ainsi les coûts et la maintenance associés aux capteurs physiques. Cependant, cette méthode peut être moins précise que la mesure directe.

B-Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT)

Les systèmes MPPT (Maximum Power Point Tracking) sont conçus pour optimiser la puissance extraite des panneaux solaires en ajustant constamment la charge électrique pour maintenir les panneaux à leur point de puissance maximale. Ces systèmes analysent en temps réel la sortie des panneaux et ajustent la résistance du circuit pour maximiser l'efficacité énergétique [21].

C-Surveillance et analyse des performances

La surveillance continue des systèmes photovoltaïques permet de détecter rapidement les anomalies et d'assurer un fonctionnement optimal. Les données collectées peuvent inclure :

Paramètres Électriques : Tension, courant, puissance produite.

Conditions Environnementales : Température ambiante, vitesse du vent.

Ces informations sont utilisées pour comparer la performance réelle à la performance attendue, identifier les baisses de rendement et planifier des actions correctives [21].

D-Évaluation du rendement des cellules photovoltaïques

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie solaire reçue. Ce rendement dépend de plusieurs facteurs, notamment :

Type de Cellule : Les cellules en silicium monocristallin, polycristallin ou à couches minces ont des rendements différents.

Conditions de Fonctionnement : Température, irradiance, angle d'incidence de la lumière. Des tests normalisés, tels que ceux définis par la norme IEC 61215, sont utilisés pour évaluer ces rendements dans des conditions standardisées.

En combinant ces différentes techniques de mesure et d'évaluation, il est possible d'assurer une performance optimale des installations photovoltaïques et de maximiser leur contribution à la production d'énergie renouvelable [21].

II.3.2 Technologies de surveillance des panneaux solaires

La technologie de surveillance des panneaux solaires a considérablement évolué au fil des ans pour répondre aux besoins croissants de l'industrie solaire en matière de performance, de fiabilité et de maintenance. Voici quelque capteur pour la surveillance des panneaux photovoltaïques [22] :

Capteur thermique : mesure la température des panneaux pour détecter les surchauffes et les variations thermiques.



Figure II. 1: Capteur thermique [22]

Capteur de luminosité : mesure l'intensité lumineuse pour évaluer l'irradiance solaire et l'efficacité de la conversion photovoltaïque telle que le Solarimètre :

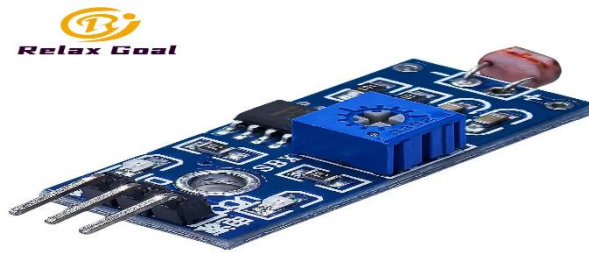


Figure II. 2: Capteur de luminosité [22]

Capteur de courant et de tension : surveille les paramètres électriques pour détecter les variations de performance et les pannes potentielles. On parle ici pour l'ampèremètre.

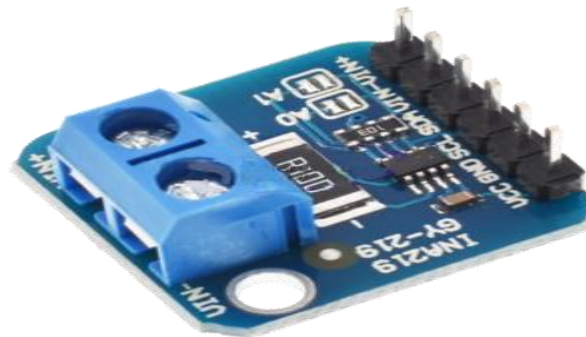


Figure II. 3: Capteur de courant et de tension [22]

Il Ya aussi les systèmes de surveillance à distance citons comme exemple :

Système de télémetrie : transmet les données des capteurs à distance via des réseaux sans fil ou une connexion internet.

Plateformes IOT (internet des objets) : intègre les capteurs à des réseaux IOT pour une surveillance en temps réel et une gestion à distance [22].

II.3.3 Méthode de surveillance

La surveillance efficace des panneaux photovoltaïques est cruciale pour assurer le bon fonctionnement et la durabilité des installations solaires. Cette surveillance repose sur l'utilisation de différentes méthodes et technologies permettant de collecter, d'analyser et d'interpréter des données essentielles concernant les performances des panneaux, les conditions environnementales et l'état général du système. Dans cette section, nous explorerons en détail les différentes méthodes de surveillance disponibles, en mettant l'accent sur les techniques de collecte de données, les outils d'analyse et les approches préventives pour maintenir et optimiser les performances des installations photovoltaïques [23].

On commence avec la première méthode :

La surveillance en temps réelle et en temps périodique : La surveillance en temps réel assure une vigilance continue grâce à des capteurs intégrés et des systèmes de communication instantanés. Cette approche permet une détection immédiate des problèmes et une réaction rapide aux fluctuations de performance ou aux dysfonctionnements. En comparaison, la surveillance périodique consiste en des inspections programmées à des moments spécifiques, manuellement ou automatiquement. Bien qu'elle offre moins d'immédiateté, cette méthode peut s'avérer plus économique et suffisante pour des applications moins critiques [23].

Méthode de collecte de données : Les capteurs intégrés aux panneaux solaires sont conçus pour mesurer divers paramètres comme la température, la tension, le courant et la luminosité. Ces informations sont ensuite transmises à un système de surveillance central pour être analysées.

Parallèlement, les stations météorologiques situées à proximité des panneaux collectent des données environnementales telles que la température, l'humidité, la vitesse du vent et l'irradiance solaire. Ces données sont essentielles pour évaluer l'impact des conditions météorologiques sur les performances des panneaux solaires [23].

Analyse des données et interprétation des résultats : Les logiciels d'analyse avancée sont équipés d'algorithmes sophistiqués pour traiter les données recueillies. Leur rôle est de détecter les anomalies et les tendances, offrant ainsi des insights précieux sur les performances des panneaux solaires. De plus, l'utilisation croissante de l'intelligence artificielle et des techniques d'apprentissage automatique permet d'analyser des volumes massifs de données. Cette approche permet d'identifier des modèles ou des anomalies qui pourraient échapper à une analyse manuelle [23].

En combinant ces différentes méthodes et approches, les opérateurs de parcs solaires peuvent mettre en place des systèmes de surveillance robustes et efficaces. Cela leur permet d'assurer une maintenance proactive, de détecter précocement les problèmes et d'optimiser en permanence les performances des installations photovoltaïques.

II.4 Identification et classification des pannes dans un système PV

Les systèmes PV peuvent être soumis à plusieurs défauts durant leur fonctionnement, et on peut distinguer deux types principaux [24] :

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

Les différents défauts que nous pouvons trouver dans un système PV sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II. 1: Défauts du générateur photovoltaïque [23]

Composant	Default
Générateur PV	• Feuilles d'arbre, déjections, pollution, sable, neige etc. • Détérioration des cellules, fissure, échauffement des cellules • Pénétration de l'humidité, dégradation des interconnexions, • Corrosion des liaisons entre les cellules • Modules de performances différentes • Module arraché ou cassé • Modules court-circuités, modules inversés
Boite de jonction	• Rupture du circuit électrique • Court-circuit du circuit électrique • Destruction de la liaison • Corrosion des connexions
Câblage et connecteur	• Circuit ouvert • Court-circuit • Mauvais câblage (module inversé) • Corrosion des contacts • Rupture du circuit électrique
Protection (Diode by-pass et diode anti-retour)	• Destruction des diodes. • Absence ou non fonctionnement de diodes • Inversion de la polarité des diodes au montage

II.4.1 Défaut d'ombrage

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

- **Ombrage dur** : qui se produit si les panneaux PV sont ombragés par un matériau solide Par exemple bâtiment ou poussière, qui entraine une baisse de tension.

• **Ombrage doux (léger) :** qui peut être causé par les nuages, qui affecte le courant mais Non pas la tension Les deux influent négativement sur les performances du module PV. En effet, les cellules Ombrées se comportent comme une résistance au courant généré. Elles chauffent et le Phénomène de hot spot se produit [24] :



Ombrage



Poussière



Déjection d'oiseau



Neige

Figure II. 4: Exemples de défauts d'ombrage [23]

II.4.2 Les points chauds ou Hot-spots

Le phénomène des points chauds est un problème relativement fréquent dans les générateurs photovoltaïques actuels. Il comporte à la fois un risque pour la durée de vie du module photovoltaïque et une diminution de son efficacité opérationnelle lorsque des cellules PV sont associées en série, le courant circulant dans l'ensemble est limité par le courant généré par la cellule la moins performante ou la moins éclairée. Ainsi, une cellule qui ne recevrait pas la même quantité de lumière que le reste de l'ensemble, produirait un courant plus faible c'est ce qu'on appelle l'ombrage partiel. Si l'une d'elles était partiellement ombragée le courant ne pouvait plus circuler. La cellule accumulait alors le courant produit en amont et se comportait comme un récepteur. Elle dissipait une puissance sous forme de chaleur pouvant dépasser les 100°C ce qui pouvait la faire griller si le point chaud est causé par un

shunt (court- circuit d'une cellule) ou une erreur dans l'interconnexion entre les cellules générant également un shunt

Le point chaud est directement lié à une erreur de fabrication de la cellule ou du module PV. En outre, si une cellule génère un courant plus faible que le reste des cellules (appelée mésappariement). Un point chaud apparaît sous la forme d'une cellule entière fonctionnant à une température Plus élevée que le reste des cellules. Elle peut être considérée aussi comme une erreur de fabrication du module photovoltaïque. Le hot spot pourrait causer des dommages à la cellule ou l'encapsulant dans un court laps de temps de fonctionnement [25].



Figure II. 5: Défaut de point chaud [23]

II.4.3 Fissures dans les cellules

Les fissures constituent un facteur important de dégradation des modules PV. À cause de réduire le cout de fabrication des panneaux PV pour économiser le silicium l'épaisseur et la surface du silicium de cellules sont modifiées (de 300 μm à moins de 20 μm) donc cette modification rendait les cellules plus fragiles et sensibles aux fractures au cours de leur manipulation et au cours du stockage.

Cependant, le risque de choc électrique et de pénétration de l'humidité devient plus élevé. Les casses, les bris de verre et les fissures sont généralement suivies des autres types de dégradation tels que la corrosion, la décoloration, la délamination [25].



Figure II. 6: Fissures dans les cellules PV [23]

II.4.4 Défauts de la diode de by-pass et diode anti-retour

La diode de by-pass est une des solutions pour protéger les cellules de l'ombrage partiel elle évite la polarisation inverse, le hot spot et destruction du module. Cette diode se place, en général, en parallèle avec une branche de dix-huit cellules. On peut constater plusieurs défauts de cette dernière, ces défauts sont en général des défauts de fabrication ces défauts peuvent être apparus suite à la rupture de la connexion de la diode. Donc dans un panneau photovoltaïque on peut trouver une diode déconnectée, une diode équivalente à une impédance quelconque, une diode court-circuitée et une diode inversée. De la même manière que pour la diode de by-pass, la diode anti-retour est exposée aux mêmes types de défauts envisagés pour la diode anti-retour : court-circuit, impédance quelconque, circuit ouvert et diode inversée [25].

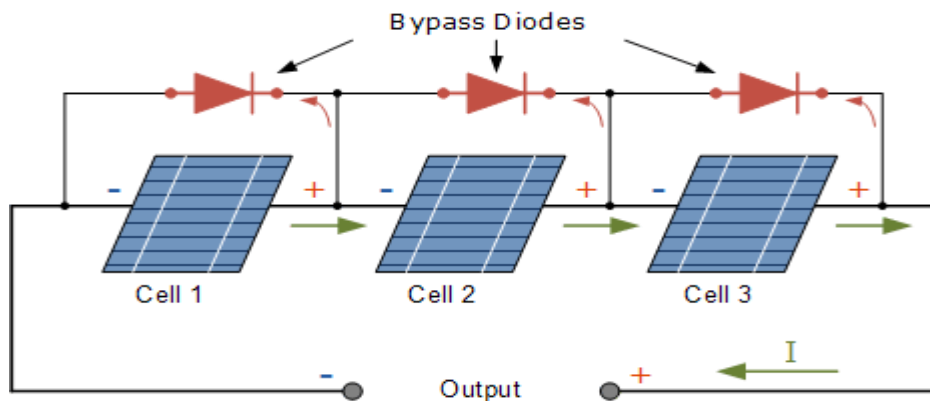


Figure II. 7: Défauts de la diode de by-pass et diode anti-retour

II.4.5 Délaminage

Le délaminage est la conséquence de la perte d'adhérence entre les différentes couches du module PV et le détachement subséquent de ces couches. Il peut apparaître entre encapsulant et cellules polymères ou entre les cellules et la vitre avant. Le délaminage est un problème majeur, car il peut conduire à deux effets : une diminution de la lumière, où la réflexion augmente, ainsi que la pénétration de l'eau à l'intérieur de la structure de module.

Le délaminage est plus grave s'il se produit dans les extrémités du module car, outre les pertes de puissance, il entraîne des risques électriques sur le module et l'installation. La figure présente un exemple de la façon dont un décollement extrême peut détruire un module PV [25].

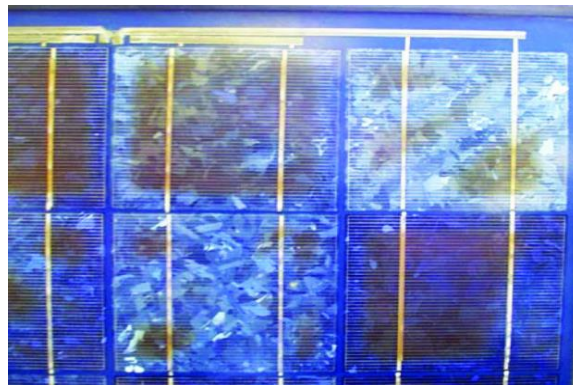


Figure II.7: Défaut de délaminage [23]

II.5 Les défauts les plus fréquents dans une installation photovoltaïque

II.5.1 Défauts dans le générateur photovoltaïque

Dans le tableau suivant, on résume les différents défauts dans le générateur photovoltaïque.

Tableau II. 2: Différents défauts dans le générateur photovoltaïque [23]

Défaut	Conséquence
Salissure (pollution, sable, neige)	Perte de puissance
Inversion des liaisons de sortie	Module mal câblé, diminution des Performances
Air marin, Couple galvanique dû au mélange de matériau de la jonction module/support	Corrosion
Dégradation des modules par Vandalisme	Diminution des performances, Non fonctionnement de l'installation
Vol des modules	Non fonctionnement de l'installation
Mauvaise orientation et/ou inclinaison des modules	Ombrage, diminution des performances
Module mal ou pas ventilé	Échauffement
Module mal fixé	Déplacement du module, diminution des Performances
Modules non câblés	Diminution des performances
Fissure	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules, diminution des performances
Rouille par infiltration d'eau	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules

Mauvaise isolation entre modules et onduleur	Court-circuit, destruction du module, Incendie
Détérioration des joints d'étanchéité	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules
Déformation du cadre des Modules	Infiltration d'eau
Corrosion du cadre des modules	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules
Délaminage	Diminution des performances, échauffement
Foudre	Détérioration des modules
Tempête, Faiblesse au vent des Structures	Module arraché, cassé
Pénétration de l'humidité	Hot spot, augmentation du courant de fuite, corrosion, perte d'adhérence et d'isolation, diminution de la résistance de CC à la terre
Foudre sur l'installation	Destruction des modules
Modules de performances Différentes	Diminution des performances du champ
Sortie par le bas des boîtes de connexions impossibles	Mauvais câblage
Support mécanique des modules inadéquat ou mal posé	Efforts mécaniques importants sur les Modules
Inclinaison des modules trop Faible	Stagnation d'eau, dépôt de terre, prolifération de champignons, problème d'étanchéité
Panneaux inaccessibles	Panneaux inaccessibles
Chaleur	Échauffement, détérioration des joints

II.5.2 Défauts dans la boîte de jonction

Dans le tableau suivant, on résume les différents défauts dans boîte de jonction.

Tableau II. 3: Différents défauts dans la boîte de jonction [23]

Défaut	Conséquence
Absence de parafoudre ou protection foudre inadaptée	Destruction en cas de foudre
Presse-étoupe mal serré	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Liaison de mise à la terre non fixée ou sectionnée	Pas de mise à la terre
Boîte de jonction sans presse-étoupe	Pas d'étanchéité, corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Presse-étoupe en caoutchouc	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Infiltration d'eau par les vis de Fixation	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Boîte de jonction non repérée	Problème pour contrôle et Maintenance
Déconnexion des soudures	Arc électrique, incendie, diminution des performances
Boîtier infesté d'insectes	Rupture du circuit électrique
Fourreaux non prévus pour usage extérieur	Destruction de la protection
Liaison sans protection	Destruction de la liaison
Pénétration de l'eau ou de l'humidité	Corrosion des connexions, des diodes, des bornes, incendie

II.5.3 Défauts dans le système de câblage

Dans le tableau suivant, on résume les différents défauts dans le système de câblage.

Tableau II. 4: Différents défauts dans le système de câblage [23]

Défaut	Conséquence
Mauvais dimensionnement des câbles	Chute de tension >3 %, échauffement
Connexion desserrée ou Cassée	Arc électrique, incendie, destruction de la boîte de jonction, destruction des diodes
Principe de câblage en goutte d'eau non respecté	Mauvais câblage
Câbles inter module de section trop faible par rapport au presse-étoupe	Corrosion des contacts, rupture du circuit Electrique
Bornes rouillées	Faux contacts, circuit ouvert, arc Electrique
Câbles non fixés	Boucle de câblage, circuit ouvert
Mauvais câblage	Court-circuit, claquage des diodes anti- retour, destruction des connecteurs (circuit ouvert), aléas de fonctionnement sur disjoncteur
Toron	Boucle électromagnétique
Câbles d'arrivée des sous-champs entamés lors du dénudage	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Absence de graisse de Silicon	Humidité
Câble mal dénudé	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Câble rongé par des rats	Faux contacts, circuit ouvert, arc Electrique
Modification du câblage par l'usager non compétent	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Boîte de connexion décollée	Connexion des cellules en série Endommagée

II.5.4 Défauts dans le système de protection

Dans le tableau suivant, on résume les différents défauts dans le système de protection.

Tableau II. 5: Différents défauts dans le système de protection [23]

Défaut	Conséquence
Protections inappropriées ou mal dimensionnées	Court-circuit, hot spot, incendie, arrêt de l'installation
Interrupteur, disjoncteur Inapproprié	Arc électrique, incendie, destruction à l'ouverture
Disjoncteur différentiel non conforme à la norme	Non déclenchement, tension entre neutre et terre
Armoire électrique posée à même le sol à l'extérieur	Dysfonctionnement en cas de pluie
Parafoudre non connecté à la Terre	Pas de protection
Impossibilité de déconnecter les modules par branche	Problème de sécurité
Pas de possibilités de sectionnement extérieur au coffret	Problème de sécurité
Mauvaise dissipation de la chaleur des diodes	Échauffement
Sous dimensionnement des diodes de bypass	Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction
Absence de protection contre les courants inverses	Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction
Diode mal connectée	Non fonctionnement des diodes, absence de protection contre les courants inverses
Inversion de la polarité des diodes au montage	Non fonctionnement des diodes, court- circuit, hot spot
Phénomènes de résonance	Non fonctionnement des fusibles et des protections de surtension
Dégradation à cause de la Lumière	Non fonctionnement des diodes de Bypass
Échauffement des diodes placées dans un endroit mal ventilé	Température de destruction atteinte

Vieillessement des Disjoncteurs	Non fonctionnement des disjoncteurs
---------------------------------	-------------------------------------

II.5.5 Défauts de l'onduleur

Dans le tableau suivant, on résume les différents défauts de l'onduleur.

Tableau II. 6: Différents défauts de l'onduleur [23]

Défaut	Conséquence
Dégradation à cause de la chaleur	Détérioration de l'onduleur, des Connexions
Faux contact, Fusible fondu, Bobine des filtres, thyristors, capacités en défaut	Arrêt de l'onduleur
Surtension	Déconnexion de l'onduleur
Foudre sur le réseau	Surtension, destruction de l'onduleur
Tension du générateur inférieure à la limite basse de l'onduleur	Déconnexion de l'onduleur
Onduleur sous dimensionné	Destruction de l'onduleur
Problème d'interface avec le réseau	Découplage de l'onduleur
Défaut d'isolement	Détérioration de l'onduleur
Surchauffe des onduleurs	Diminution des performances
Onduleur installé dans un lieu non Etanche	Panne de l'onduleur
Onduleur mal fixé	Chute de l'onduleur
Onduleur surdimensionné	Perte de puissance, diminution des performances
Visserie et bouton de commande Oxydés	Réglage impossible
Mauvais choix de la tension nominale d'entrée	Diminution des performances
Pile de sauvegarde HS	Perte de données

Témoins de défaut d'intensité allumé en permanence	Mauvaise information sur l'intensité
Onduleur non mis à la terre	Disjoncteur différentiel non Actif
Perte de la mémoire (mauvaise manipulation du technicien)	Perte de données
Afficheur de cristaux liquide endommagé ou illisible	Pas d'information sur le Fonctionnement

II.5.6 Défaits dans le système d'acquisition des données

Dans le tableau suivant, on résume les différents défauts dans le système d'acquisition des données.

Tableau II. 7: Déférents défauts dans le système d'acquisition des données [23]

Défaut	Conséquence
Coupure de courant	Perte de données
Sonde de température ou d'ensoleillement non câblée	Mesure impossible
Défaut de paramétrage	Enregistrement de fausses Données
Mauvais câblage des shunts de mesure	Mesure impossible ou Erronée
Afficheur de données mal placé (trop haut)	Données non visibles
Carte électronique mal positionnée	Touches inactives, défaut de Commande
Non configuré pour l'acquisition des Données	Pas de donnée enregistrée
Armoire fermée par le service de maintenance ou présence d'un code	Lecture des données par l'exploitant impossible
Bornier de mesures et de sonde de température trop proches	Câblage difficile, risque de court-circuit
Acquisition de données vierge	Aucune information Enregistrée

Mesure de données non nulles alors que système PV à l'arrêt	Données non fiables
--	---------------------

II.6 Optimisation des performances des systèmes photovoltaïques

II.6.1 Détection des problèmes et maintenance proactive

La détection des problèmes et la maintenance proactive sont des éléments cruciaux de la gestion efficace des parcs solaires. En surveillant en permanence les paramètres électriques, il est possible de détecter les anomalies de performance qui pourraient signaler des problèmes émergents. Cette surveillance continue permet également d'anticiper les défaillances potentielles avant qu'elles ne causent des temps d'arrêt imprévus. En intégrant des modèles de prévision de la performance des panneaux solaires, la maintenance proactive devient encore plus efficace, réduisant ainsi les coûts de maintenance et minimisant les interruptions de production d'énergie [25].

II.6.2 Optimisation de l'orientation et de l'inclinaison

L'optimisation de l'orientation et de l'inclinaison des panneaux solaires est une stratégie clé pour augmenter la production d'énergie.

Des recherches ont démontré que cette optimisation peut avoir un impact significatif sur la quantité d'énergie produite, en fonction de la localisation géographique et des conditions météorologiques spécifiques. En outre, l'utilisation de systèmes de suivi solaire offre une méthode encore plus efficace. Ces systèmes ajustent automatiquement l'angle des panneaux en fonction de la position du soleil, maximisant ainsi la production d'énergie tout au long de la journée [25].

II.6.3 Gestion de l'ombrage

La modélisation informatique et la cartographie de l'ombrage offrent des outils précieux pour évaluer l'impact des obstacles potentiels sur les performances des panneaux solaires. Ces techniques permettent de planifier judicieusement l'emplacement des panneaux afin de maximiser leur exposition au soleil. De plus, des stratégies telles que l'élagage des arbres et la réorientation des panneaux peuvent être mises en œuvre pour réduire au minimum l'ombrage et optimiser la production d'énergie. En intégrant ces approches dès la phase de conception, il est possible d'assurer une efficacité maximale de l'installation solaire [25].

II.6.4 Contrôle de la température

L'utilisation de revêtements de surface spéciaux et de matériaux de dissipateur de chaleur représente une stratégie efficace pour optimiser le refroidissement des panneaux solaires et

atténuer les effets de la surchauffe. En parallèle, la surveillance continue de la température des panneaux solaires offre une solution proactive.

Cette surveillance permet d'ajuster automatiquement les paramètres de fonctionnement, tels que la tension de fonctionnement, afin de minimiser les pertes de rendement. En combinant ces approches, il est possible d'améliorer la performance globale des installations solaires et d'assurer une production d'énergie optimale [25].

En intégrant ces approches et techniques d'optimisation des performances, les opérateurs de parcs solaires peuvent réaliser des améliorations significatives tant en termes de production d'énergie que de rentabilité de leurs installations photovoltaïques.

II.7 Conclusion

En conclusion, la supervision des systèmes photovoltaïques joue un rôle crucial dans l'optimisation de leurs performances et la pérennité de leur fonctionnement. Grâce à des systèmes de surveillance avancés et des méthodes de mesure précises, il est possible d'identifier rapidement les défauts et d'améliorer le rendement des installations. La détection et la classification des pannes, qu'elles soient liées aux panneaux solaires, aux composants électroniques ou aux câblages, permettent une maintenance proactive et une réduction des pertes énergétiques. Enfin, l'optimisation des performances passe par une gestion efficace de l'orientation, de l'ombre et de la température, garantissant ainsi une production énergétique maximale et une meilleure durabilité des installations photovoltaïques.

Chapitre III : L'intelligence artificielle

III.1 Introduction

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine de l'informatique qui vise à créer des systèmes capables de simuler l'intelligence humaine. Elle repose sur des algorithmes et des modèles mathématiques permettant aux machines d'apprendre, de raisonner, de percevoir leur environnement et d'interagir avec lui.

L'IA se divise en plusieurs branches, notamment :

- **L'apprentissage automatique (machine Learning)**, où les systèmes s'améliorent grâce à l'expérience et aux données.
- **Le traitement du langage naturel (NLP)**, qui permet aux machines de comprendre et de générer du texte en langage humain.
- **La vision par ordinateur**, qui aide les machines à analyser et interpréter des images et des vidéos.
- **Les systèmes experts**, qui imitent la prise de décision humaine dans des domaines spécifiques.

Aujourd'hui, l'IA est utilisée dans de nombreux secteurs, comme la médecine, l'industrie, la finance et les services numériques, et elle transforme notre quotidien à travers des assistants virtuels, des recommandations personnalisées et l'automatisation des tâches complexes.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur l'intelligence artificielle. On a commençant par une définition et l'historique du l'intelligence artificielle. Puis les Techniques d'intelligence artificielle pertinentes (Apprentissage automatique, réseaux de neurones, algorithmes de classification et de régression), et les Applications de l'IA dans le secteur de l'énergie. Et à la fin en clôture par une conclusion.

III.2 Définition

Selon John McCarthy, l'un des pionniers du domaine, c'est « la science et l'ingénierie de la fabrication de machines intelligentes ». L'intelligence artificielle (IA) est un domaine de l'informatique qui cherche à créer des systèmes capables de réaliser des tâches qui nécessiteraient normalement l'intelligence humaine.

Cependant, l'IA est souvent considérée comme un concept vaste et multidimensionnel, difficile à définir précisément en raison de sa nature étendue et en constante évolution. Par exemple, des technologies allant des simples algorithmes de recommandation utilisés par Netflix, selon Forbes, aux systèmes complexes de conduite autonome développés par des entreprises comme Tesla, sont tous considérés comme de l'IA. Cette diversité rend le

domaine à la fois fascinant et énigmatique, avec des définitions qui évoluent au fur et à mesure que la technologie progresse [26].

III.3 Historique de l'IA

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine scientifique qui vise à créer des machines capables de reproduire des comportements intelligents. Son histoire est riche et remonte à plusieurs siècles, avec des contributions majeures de divers penseurs et chercheurs.

Antiquité et Moyen Âge : prémices de l'IA

L'idée de créer des entités artificielles intelligentes trouve ses racines dans l'Antiquité. Des automates ont été conçus pour imiter des comportements humains ou animaux, comme les créations d'Al-Jazari au XIII^e siècle. Parallèlement, des philosophes et mathématiciens tels que Raymond Lulle au XIII^e siècle et Gottfried Wilhelm Leibniz au XVII^e siècle ont cherché à formaliser le raisonnement humain à travers des systèmes logiques et mathématiques.

XX^e siècle : fondations de l'IA moderne

Les avancées en neurologie dans les années 1930 ont montré que le cerveau fonctionnait comme un réseau de neurones électriques, inspirant des chercheurs à modéliser ces structures. En 1950, Alan Turing publie un article où il propose le "test de Turing" pour évaluer l'intelligence des machines, jetant ainsi les bases de la réflexion sur l'IA.

En 1956, lors de la conférence de Dartmouth, le terme "intelligence artificielle" est officiellement introduit par John McCarthy, marquant la naissance de l'IA en tant que discipline académique [27].

Années 1960-1980 : premiers succès et défis

Durant cette période, les chercheurs développent des systèmes capables de démontrer des théorèmes mathématiques et de jouer à des jeux comme les échecs. Cependant, malgré ces avancées, l'IA fait face à des limitations techniques et à des attentes non satisfaites, conduisant à des périodes de désillusion appelées "hivers de l'IA" dans les années 1970 et 1980, caractérisées par une réduction des financements et de l'intérêt pour le domaine.

Années 1990-2000 : renaissance de l'IA

L'amélioration des capacités de calcul et l'accès à de grandes quantités de données permettent à l'IA de connaître un renouveau. En 1997, le superordinateur Deep Blue d'IBM bat le champion du monde d'échecs Garry Kasparov, démontrant la puissance des systèmes informatiques dans des tâches complexes.

Années 2010 à aujourd'hui : l'ère de l'apprentissage profond

L'émergence de l'apprentissage profond (deep learning) révolutionne le domaine de l'IA. Des réseaux de neurones profonds permettent des avancées significatives dans la reconnaissance vocale, la vision par ordinateur et le traitement du langage naturel. En 2016, le programme AlphaGo de DeepMind bat le champion du monde de Go, un jeu réputé pour sa complexité stratégique.

En 2024, le prix Nobel de physique est décerné aux pionniers des réseaux de neurones artificiels, John Hopfield et Geoffrey Hinton, reconnaissant leur contribution fondamentale au développement de l'IA.

Aujourd'hui, l'IA est omniprésente dans divers secteurs, de la médecine à la finance, en passant par les transports et les services numériques, transformant profondément notre société et soulevant des questions éthiques et sociétales majeures [27].

III.4 Techniques d'intelligence artificielle pertinentes

L'intelligence artificielle (IA) repose sur diverses techniques permettant aux machines d'apprendre, de raisonner et de prendre des décisions. Parmi ces techniques, l'apprentissage automatique, les réseaux de neurones et les algorithmes de classification et de régression jouent un rôle essentiel.

III.4.1 Apprentissage automatique

L'apprentissage automatique (machine Learning) est une branche de l'IA qui vise à permettre aux machines d'apprendre à partir des données sans être explicitement programmées. Il existe trois types principaux d'apprentissage automatique [28] :

- Apprentissage supervisé : L'algorithme apprend à partir d'un ensemble de données étiquetées. Il établit une relation entre les entrées et les sorties attendues. Exemples : régression linéaire, arbres de décision, forêts aléatoires.
- Apprentissage non supervisé : Aucune étiquette n'est fournie. L'algorithme identifie des motifs ou des structures cachées dans les données. Exemples : k-means, analyse en composantes principales (ACP).
- Apprentissage par renforcement : L'agent apprend en interagissant avec un environnement et en recevant des récompenses ou des pénalités en fonction de ses actions. Exemples : Deep Q-Learning, algorithmes basés sur des politiques.

III.4.2 Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont inspirés du fonctionnement du cerveau humain. Ils sont composés de neurones interconnectés organisés en couches [29] :

- **Couche d'entrée** : Reçoit les données initiales.
- **Couches cachées** : Effectuent des transformations non linéaires sur les données.
- **Couche de sortie** : Génère le résultat final.

Les réseaux de neurones sont à la base de nombreuses avancées en IA, notamment dans l'apprentissage profond (deep learning), qui utilise des réseaux de neurones profonds (DNN) pour traiter des volumes de données importants. Parmi les architectures populaires, on trouve :

- **Perceptron multicouche (MLP)** : Réseau de neurones entièrement connecté.
- **Convolutional Neural Networks (CNN)** : Utilisé pour la vision par ordinateur.
- **Recurrent Neural Networks (RNN)** : Adapté au traitement des séquences, comme le traitement du langage naturel.

III.4.3 Algorithmes de classification et de régression

Les algorithmes de classification et de régression sont des techniques clés en machine Learning [30] :

- **Classification** : Attribue une catégorie ou une classe à une observation donnée.

Exemples :

- Régression logistique
- Support Vector Machines (SVM)
- k-Nearest Neighbors (k-NN)
- Arbres de décision et forêts aléatoires
- **Régression** : Prédit une valeur numérique continue. Exemples :
 - Régression linéaire
 - Régression polynomiale
 - Régression Ridge et Lasso

Ces techniques constituent la base de nombreuses applications modernes en IA, allant de la reconnaissance d'images à l'analyse de données et à l'automatisation des processus décisionnels.

III.5 Applications de l'IA dans le secteur de l'énergie

L'intelligence artificielle (IA) joue un rôle crucial en transformant la manière dont nous gérons et optimisons nos ressources énergétiques. Mais comment exactement l'IA révolutionne-t-elle ces technologies ? L'intégration de systèmes intelligents permet d'améliorer considérablement l'efficacité et la fiabilité des solutions de stockage, tout en réduisant les coûts opérationnels.

III.5.1 Optimisation des systèmes de stockage d'énergie par l'intelligence artificielle

Grâce à ses capacités analytiques avancées, l'IA peut identifier et corriger les inefficacités dans les systèmes de stockage. Par exemple, elle peut analyser en temps réel les données provenant des batteries pour ajuster automatiquement leur charge et décharge. Cela maximise non seulement la durée de vie des batteries mais aussi leur performance énergétique. Un système capable d'apprendre continuellement de son environnement pour s'adapter aux besoins changeants illustre la véritable puissance de l'IA [31].

III.5.2 Prédiction de la demande énergétique grâce à l'intelligence artificielle

L'un des défis majeurs auxquels font face les gestionnaires énergétiques est la variabilité imprévisible de la demande. L'IA offre une solution élégante à ce problème par sa capacité à prédire avec précision les fluctuations futures basées sur une multitude de variables telles que le climat, le comportement humain ou encore les tendances économiques. Cette anticipation permet une meilleure planification et allocation des ressources, évitant ainsi le gaspillage énergétique tout en assurant un approvisionnement stable.

Ainsi, en combinant optimisation et prédiction, l'intelligence artificielle se positionne comme un catalyseur indispensable pour relever les défis posés par l'expansion rapide des énergies renouvelables. Elle aide non seulement à stabiliser le réseau mais aussi à intégrer plus harmonieusement ces sources fluctuantes dans notre mix énergétique global [31].

III.5.3 Applications pratiques de l'intelligence artificielle dans le stockage d'énergie

L'intégration des énergies renouvelables est devenue une nécessité incontournable. L'intelligence artificielle (IA) se révèle être un allié précieux pour optimiser les systèmes de stockage d'énergie. En exploitant les capacités analytiques avancées de l'IA, les entreprises peuvent désormais transformer la gestion de leurs ressources énergétiques en un processus à la fois fluide et efficient [31].

III.5.4 Intégration de l'intelligence artificielle dans les réseaux de batteries

Chaque batterie peut apprendre de son environnement et anticiper ses propres besoins en charge ou décharge. Grâce à des algorithmes sophistiqués, l'IA permet aux réseaux de batteries d'ajuster leur fonctionnement en temps réel, maximisant ainsi leur durée de vie et leur efficacité. Cette approche intelligente réduit non seulement les coûts opérationnels mais améliore également la stabilité du réseau énergétique [31].

- **Optimisation dynamique** : les algorithmes adaptatifs permettent une gestion proactive des cycles de charge-décharge.
- **Maintenance prédictive** : l'analyse des données en temps réel aide à identifier les anomalies avant qu'elles ne deviennent critiques.

III.5.5 Gestion intelligente des flux énergétiques en utilisant l'IA

Un des défis majeurs du stockage d'énergie réside dans la gestion efficace des flux énergétiques entre production, stockage et distribution. L'IA intervient comme un chef d'orchestre invisible mais indispensable, orchestrant chaque mouvement avec précision. Elle permet par exemple aux collectivités d'équilibrer instantanément l'offre et la demande énergétique grâce à une analyse fine des données issues du réseau [31].

Ajustement automatique : les systèmes ajustent automatiquement le flux énergétique pour éviter toute surcharge ou sous-utilisation.

Systèmes autonomes : les micro-réseaux intelligents utilisent l'IA pour fonctionner indépendamment tout en s'intégrant harmonieusement au réseau principal.

III.5.6 Défis et opportunités de l'intelligence artificielle pour le stockage d'énergie

L'intelligence artificielle (IA) se présente comme une force motrice capable de révolutionner les pratiques actuelles dans le stockage d'énergie. Mais quels sont les véritables défis et opportunités qu'elle apporte ? Commençons par explorer les défis. L'intégration de l'IA dans les systèmes de stockage d'énergie nécessite une infrastructure technologique robuste, ce qui peut représenter un investissement conséquent pour les entreprises. La complexité des algorithmes utilisés pour optimiser la gestion énergétique exige également une expertise spécialisée, rendant parfois difficile leur mise en œuvre à grande échelle.

Malgré ces obstacles, l'IA offre un éventail impressionnant d'opportunités. Elle permet notamment d'améliorer significativement l'efficacité énergétique en optimisant la charge et la décharge des batteries grâce à des algorithmes prédictifs avancés. Un système capable de prévoir avec précision les pics de demande énergétique et d'ajuster automatiquement le flux

d'énergie stockée pour éviter toute surcharge ou sous-utilisation pourrait transformer la manière dont nous gérons nos ressources énergétiques.

Un autre avantage réside dans la capacité de l'IA à faciliter l'intégration des sources renouvelables au sein des infrastructures existantes. En utilisant des modèles prédictifs, elle peut anticiper les fluctuations inhérentes aux énergies renouvelables telles que l'éolien ou le solaire, assurant ainsi une stabilité du réseau même lors de variations inattendues des conditions météorologiques.

Envisageons également les perspectives futures : avec l'évolution rapide des technologies IA, nous pourrions voir émerger des systèmes encore plus intelligents capables non seulement de gérer efficacement le stockage mais aussi d'apprendre et s'adapter en temps réel aux besoins changeants du marché énergétique. Ces innovations promettent non seulement une meilleure rentabilité mais aussi une contribution significative à notre transition vers un avenir plus durable.

En somme, bien que l'application de l'IA dans le stockage d'énergie soit parsemée de défis techniques et économiques, elle offre néanmoins un potentiel transformateur immense qui pourrait redéfinir notre approche face aux enjeux énergétiques mondiaux [31].

III.6 Diagnostic et maintenance intelligente

L'intelligence artificielle (IA) révolutionne le diagnostic et la maintenance des infrastructures énergétiques en permettant une surveillance avancée et une anticipation des pannes. Grâce à l'apprentissage automatique et à l'analyse des données, les entreprises du secteur de l'énergie peuvent réduire les coûts de maintenance, améliorer la fiabilité des équipements et prolonger leur durée de vie.

III.6.1 Surveillance et détection d'anomalies

L'IA permet d'analyser en temps réel les données issues des capteurs installés sur les équipements énergétiques (turbines, panneaux solaires, transformateurs, etc.). Elle détecte des anomalies invisibles à l'œil humain et permet d'identifier les problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques [32].

- Utilisation des réseaux de neurones pour repérer les écarts par rapport aux schémas normaux de fonctionnement.
- Analyse des vibrations, de la température et de la consommation d'énergie pour prédire les pannes potentielles.

III.6.2. Maintenance prédictive

La maintenance prédictive repose sur l'IA pour anticiper les défaillances en fonction des données historiques et en temps réel [32].

- Modèles de machine learning entraînés sur des séries temporelles permettent d'estimer le moment optimal pour effectuer une intervention, réduisant ainsi les interruptions non planifiées.
- Techniques de forêts aléatoires et de régression logistique utilisées pour établir des scores de risque pour chaque composant d'un système.

III.6.3. Réparation et optimisation des performances

Une fois un problème détecté, l'IA peut recommander des actions de réparation ou d'optimisation.

- Utilisation de systèmes experts pour suggérer les meilleures stratégies d'intervention.
- Intégration de jumeaux numériques (répliques virtuelles des infrastructures physiques) pour tester différentes solutions avant leur application réelle [32].

III.7 Enjeux et défis de l'IA

L'intelligence artificielle (IA) présente des opportunités considérables dans de nombreux secteurs, mais elle soulève également des défis majeurs en matière d'éthique, de sécurité, de régulation et d'impact socio-économique [33].

III.7.1 Éthique et biais algorithmiques

Problème des biais algorithmiques

Les algorithmes d'IA peuvent perpétuer et amplifier des biais présents dans les données utilisées pour leur entraînement. Ces biais peuvent mener à des discriminations dans des domaines critiques tels que le recrutement, le crédit bancaire et la justice.

Exemples de biais :

- Des algorithmes de reconnaissance faciale ayant une précision inférieure pour certaines ethnies (Buolamwini & Gebru, 2018).
- Des systèmes de recrutement basés sur l'IA favorisant certains profils au détriment d'autres (Raghavan et al., 2020).

Principes éthiques pour une IA responsable

Pour réduire ces biais, plusieurs principes sont mis en avant :

- **Transparence** : Explicabilité des décisions algorithmiques.
- **Équité** : Réduction des discriminations algorithmiques.

- **Responsabilité** : Attribution claire des responsabilités en cas d'erreurs [33].

III.7.2 Sécurité et protection des données

Les risques liés à la sécurité de l'IA

L'IA peut être vulnérable aux cyberattaques et manipulations :

- **Attaques adversariales** : Modification minimale des données d'entrée pour tromper un modèle (Goodfellow et al., 2015).
- **Falsification et désinformation** : Utilisation de deepfakes pour diffuser des fausses informations (Chesney & Citron, 2019).

Protection des données personnelles

L'IA traite d'énormes volumes de données, soulevant des questions sur la vie privée.

- Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) en Europe impose des restrictions sur l'utilisation des données personnelles par l'IA.
- Techniques de préservation de la vie privée :
 - Apprentissage fédéré (McMahan et al., 2017).
 - Anonymisation et chiffrement des données [34]

III.7.3 Régulations et cadre législatif de l'IA

Principales initiatives législatives sur l'IA

Plusieurs cadres réglementaires émergent pour encadrer l'IA et limiter ses risques :

- **L'AI Act de l'Union Européenne** : Proposition visant à classer les systèmes d'IA selon leur niveau de risque (EC, 2021).
- **Initiatives aux États-Unis** : Différentes propositions pour encadrer l'utilisation de l'IA dans des domaines sensibles comme la santé et la finance (Executive Order on AI, 2023).

Défis juridiques et éthiques

- Définition de la responsabilité en cas d'erreur ou de préjudice causé par une IA.
- Encadrement de l'IA autonome dans les véhicules, la médecine et la défense [35]

III.7.4 Impact de l'IA sur l'emploi et les compétences du futur

Transformation du marché du travail

L'IA automatise de nombreuses tâches, menaçant certains emplois tout en créant de nouvelles opportunités.

- **Métiers menacés** : Tâches répétitives dans l'industrie, la logistique et le service client (Frey & Osborne, 2017).
- **Métiers en expansion** : Ingénierie de l'IA, science des données, cybersécurité.

Nouvelles compétences requises

L'avenir du travail nécessitera une montée en compétences :

- **Compétences techniques** : Programmation, data science, cybersécurité.
- **Compétences humaines** : Créativité, esprit critique, gestion de l'IA [36]

III.8 Conclusion

L'intelligence artificielle représente une avancée majeure avec des applications révolutionnant de nombreux secteurs. Cependant, son développement soulève des défis cruciaux en matière d'éthique, de sécurité, de régulation et d'impact sur l'emploi. La présence de biais algorithmiques, les risques liés à la protection des données et la nécessité d'un cadre législatif adapté montrent l'importance d'une IA responsable et transparente.

Pour minimiser les risques et maximiser les bénéfices, une collaboration entre gouvernements, entreprises et chercheurs est essentielle. L'éducation et l'adaptation des compétences seront également clés pour accompagner les transformations du marché du travail. Une IA bien encadrée pourra ainsi contribuer au progrès tout en respectant les valeurs éthiques et sociétales.

Chapitre IV

Étude de l'état de santé d'un système photovoltaïque par l'intelligence artificielle

IV.1 Introduction

Avec l'essor des énergies renouvelables, le maintien de la performance des systèmes photovoltaïques est devenu un enjeu majeur. L'état de santé des panneaux solaires influe directement sur la production énergétique et la rentabilité des installations. Dans ce contexte, l'intelligence artificielle (IA) offre des outils puissants pour analyser, prédire et diagnostiquer les défaillances potentielles.

Ce chapitre présente une étude approfondie de l'application des techniques d'IA pour évaluer l'état de santé d'un système photovoltaïque, en détaillant la méthodologie adoptée, la modélisation effectuée, ainsi que les résultats obtenus.

IV.2 Méthodologie de l'étude

IV.2.1 Description des données collectées et des outils d'analyse utilisés

Dans le cadre de notre stage effectué au sein de l'agence Sonelgaz de Guelma, nous avons collecté des données spécifiques à la production d'énergie photovoltaïque. Les principales valeurs mesurées concernaient l'intensité du courant (I), la tension (V) générée par les panneaux solaires installés. Ces données ont été relevées à différents moments de la journée pour évaluer la performance des installations en fonction des conditions d'ensoleillement.

Les mesures ont été recueillies à l'aide d'instruments de mesure portables tels que les multimètres et les wattmètres numériques, ainsi que par l'exploitation des enregistrements disponibles sur les onduleurs connectés aux systèmes photovoltaïques. Pour l'analyse des données, nous avons utilisé Microsoft Excel pour le traitement initial (organisation des données, calculs de puissance instantanée $P=V \times I$, représentation graphique). De plus, le logiciel MATLAB ont permis d'effectuer des analyses plus avancées, telles que la modélisation de l'évolution de la puissance en fonction du temps et l'estimation du rendement global des panneaux.

IV.2.2 Analyse des performances des centrales solaires

L'analyse des performances des centrales solaires implantées dans la wilaya de Guelma révèle une contribution significative au mix énergétique local. Les centrales, principalement équipées de modules photovoltaïques de technologie cristalline, affichent un bon taux de performance, malgré des défis liés aux conditions climatiques locales, notamment les températures élevées et l'encrassement des panneaux. Le suivi des indicateurs clés tels que le facteur de charge, le ratio de performance (PR) et la disponibilité opérationnelle montre que la production énergétique

réelle reste globalement conforme aux prévisions initiales, avec des variations saisonnières attendues. Toutefois, certaines pertes énergétiques dues à l'accumulation de poussière et aux contraintes thermiques nécessitent une attention particulière en termes de maintenance et d'optimisation opérationnelle. Ces résultats soulignent l'importance de stratégies d'entretien adaptées pour maximiser la production et assurer la durabilité des installations solaires à Guelma.

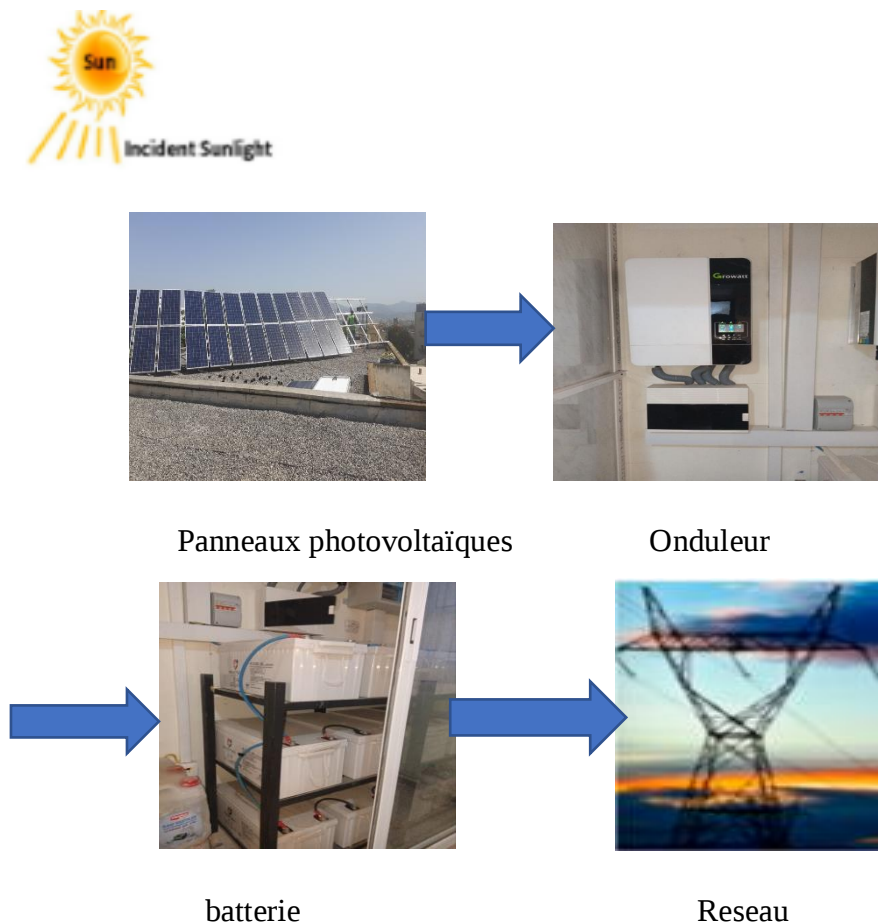


Figure IV. 1 : Fonctionnement de la chaîne de production et d'acheminement d'énergie solaire

Le processus commence par la réception du rayonnement solaire par les panneaux photovoltaïques. Ceux-ci convertissent l'énergie lumineuse en électricité en courant continu (DC) grâce à l'effet photovoltaïque.

Ensuite, cette électricité en courant continu est envoyée vers un onduleur. L'onduleur joue un rôle essentiel car il transforme le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif (AC), qui est compatible avec les équipements électriques domestiques et industriels.

Dans certains systèmes, l'électricité est dirigée vers des batteries de stockage. Celles-ci permettent de stocker l'énergie produite pendant la journée pour une utilisation ultérieure, notamment la nuit ou lors de périodes de faible ensoleillement.

Enfin, l'électricité est soit consommée localement, soit injectée dans le réseau électrique via des lignes de transport. Cela permet de distribuer l'énergie produite aux utilisateurs, contribuant ainsi à l'alimentation générale en électricité.

IV.2.3 Optimisation du système

Au cours de notre stage réalisé au sein de l'entreprise Sonelgaz, nous avons eu accès à des données essentielles concernant la production quotidienne des panneaux photovoltaïques.

Ces informations comprenaient les relevés journaliers de l'énergie produite, enregistrés par les systèmes de monitoring installés sur site.

Chaque jour, les données recueillies nous ont permis d'observer l'évolution de la performance énergétique des installations en fonction des conditions climatiques et des paramètres techniques du système.

Ces données de production ont été fondamentales pour l'analyse de l'état de santé des panneaux solaires et ont servi de support pratique à l'application des techniques d'intelligence artificielle pour la détection d'anomalies et l'optimisation des performances.

Ci-dessous l'emplacement des panneaux solaires illustré sur la Figure IV.2, qui représente une source d'énergie non négligeable. Ils sont encore en phase d'essai depuis fin d'année 2022, et l'électricité produite n'est pas encore distribuée aux habitants, elle est uniquement utilisée par l'immeuble de Sonelgaz.



Figure IV. 2: Localisation et aperçu des trois centrales photovoltaïques étudiées

Le système PV est constitué de deux chaînes en parallèle, chaque chaîne contient 24 panneaux Mill Tech MILLSFP72_325 en série. Les panneaux solaires sont avec une inclinaison de 45 degrés. Les caractéristiques de ce panneau sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV. 1: Tableau représentant la caractéristique du panneau

Caractéristique	Valeur
Nom du module	MILL_SFP72_325
Puissance crête nominale (P_{mp})	325.4 Wp
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	45.87 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	9.02 A
Courant de fusible série max.	15 A

IV.3 Surveillance d'un système PV

Dans notre cas d'application, nous avons étudié les panneaux solaires installés au sein de l'entreprise Sonelgaz dans la ville de Guelma, durant notre période de stage nous avons constaté que l'entreprise Sonelgaz possède, sur son toit, 48 panneaux solaires répartis en deux sections connectées en parallèle. Chaque section contient 24 panneaux solaires en série orientés toujours vers le sud avec une inclinaison de 35° degrés, selon les études réalisées par l'entreprise, car cette orientation est considérée comme la meilleure pour bénéficier au maximum du rayonnement solaire.



Figure IV. 3: Les panneaux solaires

Et ces panneaux solaires sont considérés comme une source d'énergie renouvelable, mais ils présentent des inconvénients tout comme des avantages, et ils sont influencés par de nombreux

facteurs. D'après ce que nous avons appris durant la période de stage, les panneaux solaires reçoivent les rayonnements solaires et les transforment en électricité. Ensuite, il passe par un circuit fermé, et parmi les moyens très importants dans ce circuit se trouve l'onduleur hybride utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour gérer la conversion et la distribution de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires

Une partie de cette énergie est stockée dans des batteries, tandis que l'autre partie est envoyée vers le réseau pour être utilisée. Comme le montre la **Figure IV.4**, ci-dessous l'onduleur hybride et les batteries utilisées par Sonelgaz :



Figure IV. 4: l'onduleur hybride

L'onduleur hybride joue un rôle central dans un système photovoltaïque hors réseau ou hybride. Il assure plusieurs fonctions principales :

1. Conversion du courant continu (DC) en courant alternatif (AC) : Les panneaux solaires produisent de l'électricité en courant continu (DC), L'onduleur convertit ce courant en courant alternatif (AC) utilisable par les équipements domestiques ou injecté dans le réseau électrique.
2. Gestion de la charge et décharge des batteries : L'énergie produite en surplus par les panneaux est stockée dans les batteries. L'onduleur gère également la décharge contrôlée de ces batteries lorsque la production solaire est faible ou nulle.

IV.3.1 Présentation des performances photovoltaïques – Année 2023

Pour réaliser l'étude souhaitée, nous avons pris les valeurs des années 2023 fournies par Sonelgaz, les valeurs ont été prises pour le mois entier, et chaque jour.

En général, ces valeurs représentent : Tension en (V), Courant en (A), Irradiation en ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$), Température moyenne en ($^{\circ}\text{C}$).

À partir de MATLAB nous avons représenté des graphes qui représentent la productivité des panneaux solaires au cours des mois en fonction de l'Irradiation et la Température moyenne (voir figure ci-dessous) :

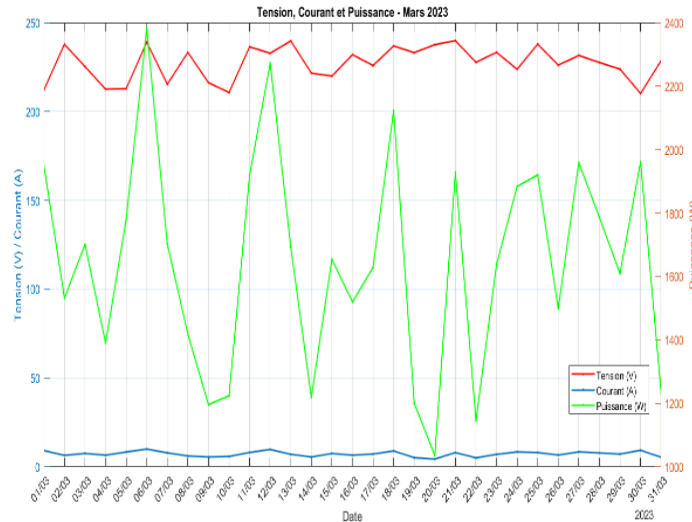


Figure IV.5: Représentation graphique de la tension, du courant et de la puissance en fonction du temps Mars

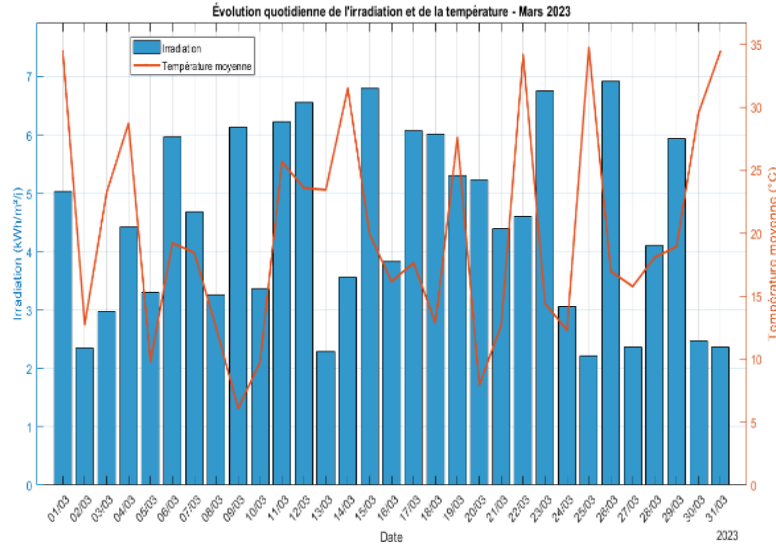


Figure IV. 65: Représentation graphique de l'Irradiation et de la Température moyenne en fonction du temps de Mars

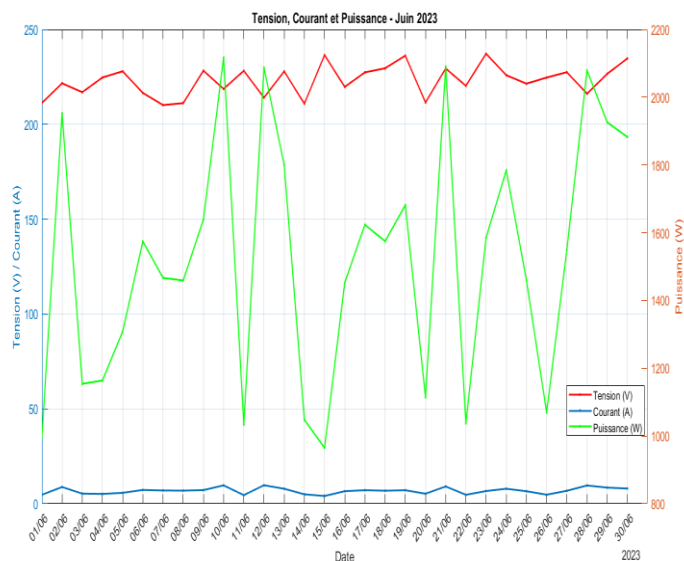


Figure IV. 7 : Représentation graphique de la tension, du courant et de la puissance en fonction du temps Juin

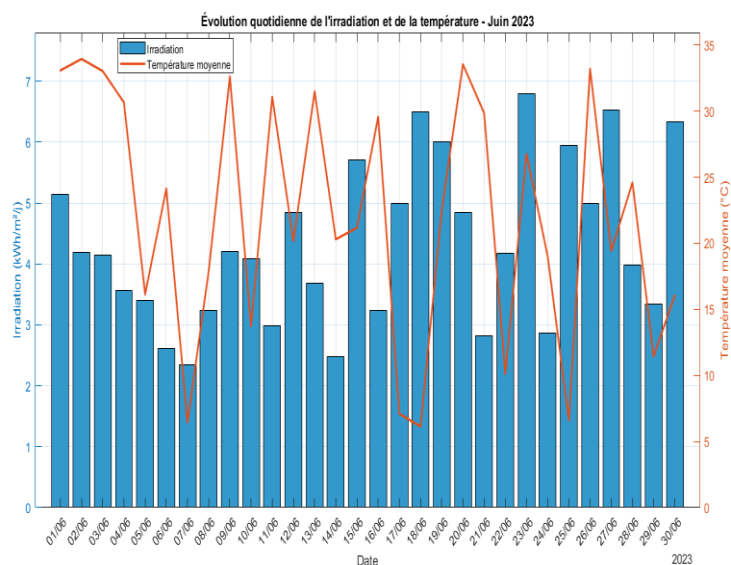


Figure IV. 8 : Représentation graphique de l'irradiation et de la température moyenne en fonction du temps de Juin

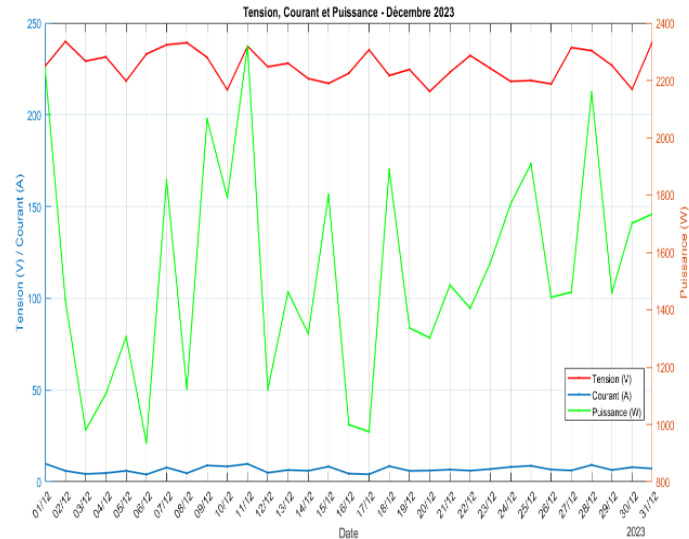


Figure IV. 9 : Représentation graphique de la tension, du courant et de la puissance en fonction du temps Décembre

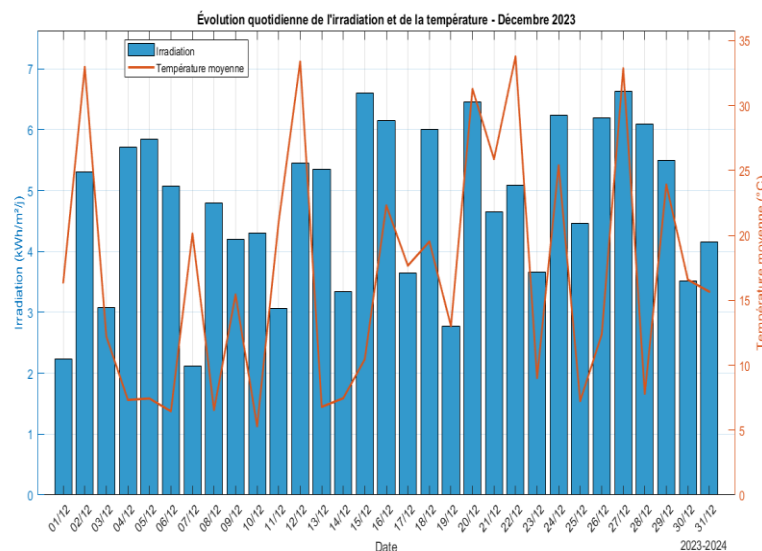


Figure IV. 10 : Représentation graphique de l'irradiation et de la température moyenne en fonction du temps de Décembre

IV.3.2 Analyse annuelle des performances photovoltaïques – Année 2023

L'étude des courbes journalières de tension, courant, puissance, irradiation et température sur l'année 2023 permet une évaluation fine du comportement du système photovoltaïque en fonction des conditions climatiques. L'analyse mensuelle met en évidence l'influence directe de l'irradiation solaire et de la température ambiante sur la production électrique.

Durant le mois de mars, les courbes révèlent une production particulièrement stable et élevée, malgré la saison hivernale. La tension reste constante autour de 220 à 230 V, tandis que le courant et la puissance présentent des pics fréquents. Cette performance est principalement liée à une irradiation régulière et à une température modérée, conditions optimales pour les modules photovoltaïques. En particulier, mars atteignent des puissances moyennes avoisinant les 1500 W, traduisant un rendement excellent.

En revanche, décembre affiche une nette baisse de production, en raison de l'irradiation plus faible et de journées plus courtes, comme en témoignent les courbes.

IV.3.3 Conclusion

L'année 2023 montre que la performance d'un système photovoltaïque dépend fortement de la combinaison entre irradiation et température. Les meilleurs rendements sont observés en présence d'un ensoleillement régulier associé à des températures modérées. Si l'irradiation est le facteur principal, la température devient limitante en été. Cette analyse souligne l'importance de suivre de près les paramètres environnementaux pour optimiser la production et dimensionner efficacement une installation solaire.

IV.4 Calcul et comparaison énergétique générale

À partir des données mesurées précédemment nous avons calculé la moyenne de l'énergie et de la puissance pour chaque mois comme indiqué dans le tableau ci-dessous, pour l'année 2023, puis nous avons comparé les résultats comme illustré dans les étapes suivantes :

Tableau IV. 2 : Analyse comparative entre la puissance maximale et l'énergie maximale générées par les panneaux solaires en 2023

Mois	Puissance Moyenne (W)	Énergie Moyenne (Wh)	Commentaire
Mars	1554,93	4 669,75	Forte puissance moyenne mais énergie faible, probable influence de conditions météo défavorables
Juin	1595,17	12 811,33	Puissance élevée avec énergie moyenne plus faible, possiblement due à une variation d'ensoleillement
Décembre	1602,3	19 032,31	Puissance élevée et énergie importante en fin d'année, bonnes conditions hivernales

Le tableau précédent met en évidence les variations mensuelles de la puissance moyenne et de l'énergie moyenne générées par les panneaux solaires. Cette analyse met en lumière deux aspects complémentaires de la performance : la puissance moyenne, qui traduit la capacité instantanée moyenne du système à produire de l'électricité, et l'énergie moyenne, qui représente la quantité totale d'énergie produite sur une journée.

Au cours de l'année, la puissance moyenne la plus élevée a été observée en novembre avec une valeur de 1664 watts, tandis que la puissance moyenne la plus faible se trouve en septembre, à 1488,64 watts. En parallèle, l'énergie moyenne maximale est atteinte en janvier avec 19 905,61 Wh et décembre (19 032,31 Wh). Ces deux mois montrent une production énergétique soutenue, combinant une puissance moyenne élevée et une durée d'ensoleillement favorable, malgré la saison hivernale.

En conclusion, cette étude illustre que la performance d'un système photovoltaïque ne peut être pleinement appréhendée qu'en combinant l'analyse de la puissance moyenne et de l'énergie moyenne. Cette analyse est essentielle pour dimensionner et gérer efficacement les installations solaires, en tenant compte à la fois des pics de production et de l'énergie exploitable sur la durée.

IV.5 Étude de l'état de santé des panneau solaire par les réseaux neuronal récurrent :

IV.5.1 Définition des réseaux neuronaux récurrent (RNN)

Les RNN sont constitués de neurones : des nœuds de traitement de données qui travaillent ensemble pour effectuer des tâches complexes. Les neurones sont organisés en couches d'entrée, de sortie et cachées. La couche d'entrée reçoit les informations à traiter et la couche de sortie fournit le résultat. Le traitement, l'analyse et la prévision des données ont lieu dans la couche cachée [37].

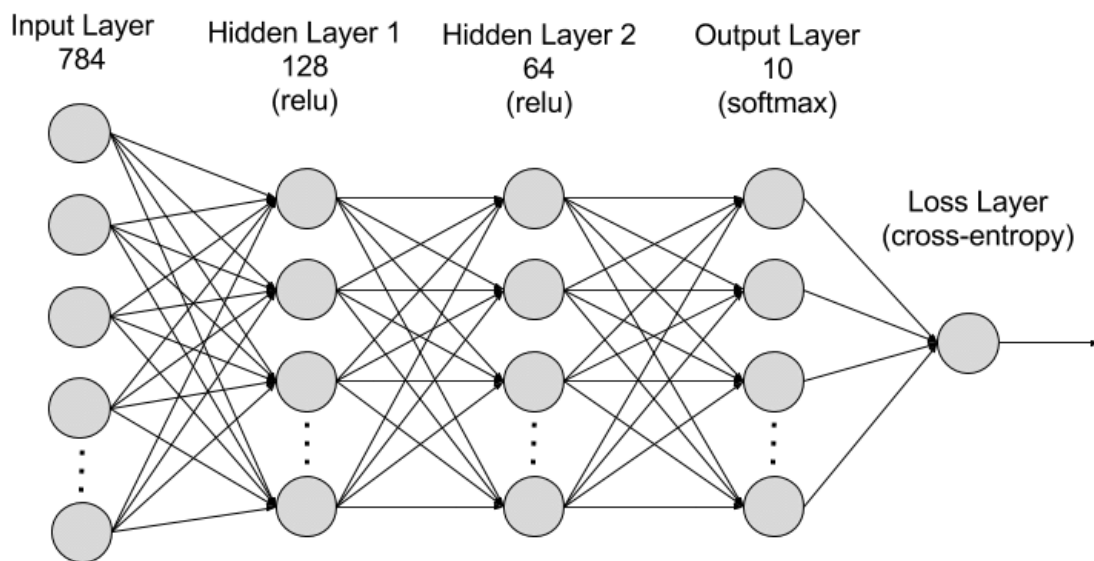


Figure IV.11: Les réseaux de neurones récurrents

➤ **Couche cachée**

Les RNN fonctionnent en transmettant les données séquentielles qu'ils reçoivent aux couches cachées étape par étape. Cependant, ils disposent également d'un flux de travail en boucle automatique ou récurrent : la couche cachée peut mémoriser et utiliser les entrées précédentes pour les prévisions futures dans un composant de mémoire à court terme. Elle utilise l'entrée actuelle et la mémoire stockée pour prédire la séquence suivante [37].

Par exemple, considérez la séquence : La pomme est rouge. Vous voulez que le RNN prédise le rouge lorsqu'il reçoit la séquence d'entrée pomme est. Lorsque la couche cachée traite le mot pomme, elle en stocke une copie dans sa mémoire. Ensuite, lorsqu'elle voit le mot est, il rappelle pomme de sa mémoire et comprend la séquence complète : pomme est pour le contexte. Il peut ensuite prédire rouge pour une meilleure précision.

Les RNN sont conçus pour traiter des séquences de taille variable tout en modélisant les dépendances au sein de la séquence d'entrée. Ils peuvent être approximatés par des réseaux non récurrents dépliés dans le temps, ce qui permet de visualiser leur fonctionnement de manière plus claire. Les RNN peuvent être utilisés pour des tâches telles que l'étiquetage de séquences, la classification de séquences et la génération de séquences [38].

IV.5.2 Architecture de RNN

L'architecture d'un réseau neuronal récurrent (RNN) se compose généralement de Plusieurs couches répétitives sont empilées les unes sur les autres.

Pour une compréhension plus claire du concept de RNN, regardons le diagramme RNN déplié.

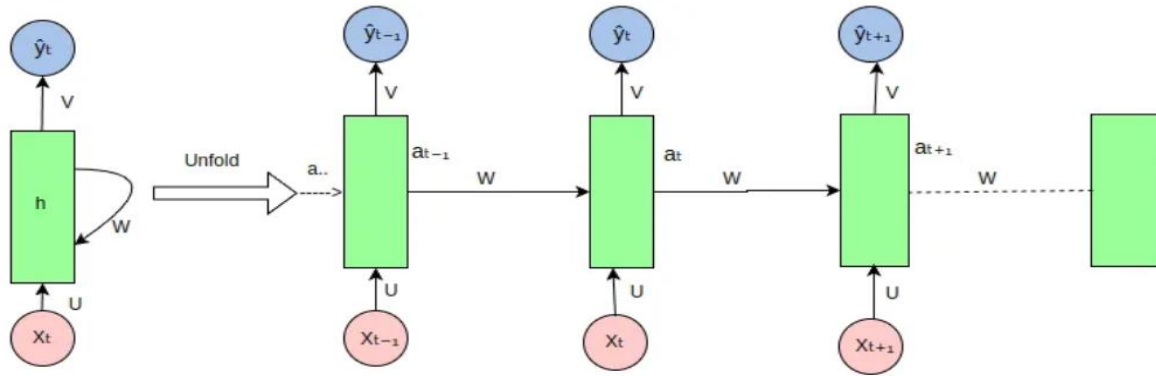


Figure IV. 126: Architecture des réseaux de neurones récurrents.

Le RNN prend un vecteur d'entrée X et le réseau génère un vecteur de sortie Y en balayant les données séquentiellement de gauche à droite, chaque pas de temps mettant à jour l'état caché et produisant une sortie. Il partage les mêmes paramètres sur tous les pas de temps. Cela signifie que le même ensemble de paramètres, représenté par U , V , W , est utilisé de manière cohérente sur l'ensemble du réseau. Représente le paramètre de poids régissant la connexion de la couche d'entrée X à la couche cachée h , représente le poids associé à la connexion entre les couches cachées et pour la connexion de la couche cachée h à la couche de sortie Y . Ce partage des paramètres permet au RNN de capturer efficacement les dépendances temporelles et de traiter les données séquentielles plus efficacement en conservant les informations de l'entrée précédente dans leur état caché actuel U W V .

À chaque pas de temps t , l'état caché est calculé en fonction de l'entrée actuelle, de l'état caché précédent et des paramètres du modèle, comme illustré par la formule suivante : a_t x_t a_{t-1}

$$a_t = f(a_{t-1}, x_t ; \theta)$$

Il peut également s'écrire comme,

$$a_t = f(U * X_t + W * a_{t-1} + b)$$

Où,

- a_t Représente la sortie générée à partir de la couche masquée au pas de temps t .

- x_t est l'entrée au pas de temps t .
- θ représente un ensemble de paramètres apprennes (poids et biais).
- U est la matrice de poids qui régit les connexions de l'entrée à la couche cachée $U \in \theta$;
- W est la matrice de poids qui régit les connexions de la couche cachée à elle-même (connexions récurrentes) ; $W \in \theta$
- V représente le poids associé à la connexion entre la couche cachée et la couche de sortie ; $V \in \theta$
- a_{t-1} est la sortie de la couche cachée à l'instant $t-1$.
- b est le vecteur de biais pour la couche cachée $b \in \theta$;
- f est la fonction d'activation.

IV.5.3 Étude de performance par les RNN

Dans cette étude, nous avons utilisé des réseaux de neurones récurrents (RNN) afin de prédire l'état de santé des panneaux photovoltaïques (PV). L'objectif principal était d'évaluer la performance de cette approche pour anticiper le comportement et la fiabilité des panneaux, ce qui est essentiel pour optimiser leur maintenance et leur rendement. La validation de notre modèle a été réalisée à l'aide d'un tableau comparatif des résultats de simulation pour l'année 2023, où nous avons analysé différentes métriques telles que la puissance, l'énergie et l'état de santé. Les résultats obtenus montrent une excellente précision : la métrique MAE (erreur absolue moyenne) est faible, notamment 49,79 W pour la puissance, 1798,51 Wh pour l'énergie, et 0,0017 pour l'état de santé. De plus, les coefficients de détermination R^2 , proches de 1 (0,9521, 0,9478, et 0,9999), indiquent que notre modèle explique une très grande partie de la variance observée dans les données. Ces résultats suggèrent que l'utilisation des RNN est une approche efficace pour la prédiction précise de l'état de santé des panneaux PV, offrant ainsi une méthode fiable pour leur surveillance et leur gestion proactive.

Les résultats présentés dans le tableau comparatif des métriques de simulation concernent trois variables : **Puissance (W)**, **Énergie (Wh)**, et **État de Santé**. Les métriques incluent l'**Erreur Absolue Moyenne (MAE)** et le **Coefficient de Détermination (R^2)**.

- **MAE (Erreur Absolue Moyenne)** : Cette métrique mesure la moyenne des erreurs absolues entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. Une valeur plus faible indique

une meilleure précision du modèle. Elle est exprimée dans les mêmes unités que la variable analysée.

- **R² (Coefficient de Détermination)** : Ce coefficient indique la proportion de la variance des données réelles expliquée par le modèle. Une valeur proche de 1 (100 %) signifie que le modèle prédit très bien les données, tandis qu'une valeur proche de 0 indique une faible corrélation.

Tableau IV. 3 : Tableau Comparatif des résultats de simulation pour la prédiction pour l'année 2023

Métrique	Puissance (W)	Énergie (Wh)	État de santé
MAE	49,79	1798,51	0,0017
R ²	0,9521	0,9478	0,9999

Ce tableau présente les métriques (MAE : Erreur Absolue Moyenne, R² : Coefficient de Détermination) pour trois variables : Puissance (W), Énergie (Wh), et État de santé. Les valeurs indiquent une bonne précision des prédictions, notamment un R² très élevé pour l'état de santé (0,9999).

Analyse de la Puissance (W)

- **MAE = 49,79 W**
 - Cela signifie que, en moyenne, les prédictions de la puissance diffèrent des valeurs réelles d'environ 49,79 watts. Pour un système PV produisant des puissances de l'ordre de milliers de watts (par exemple, 1000-2000 W dans les données de l'année 2023), cette erreur est relativement faible, représentant environ 2,5-5 % de la puissance moyenne, ce qui est acceptable pour une prédiction.
- **R² = 0,9521**
 - Un R² de 0,9521 (95,21 %) indique que 95,21 % de la variabilité de la puissance réelle est expliquée par le modèle. Cela reflète une excellente précision, suggérant que le modèle de prédiction est très fiable pour estimer la puissance générée.

Analyse de l'Énergie (Wh)

- **MAE = 1798,51 Wh**

- L'erreur moyenne est de 1798,51 watts-heure, ce qui est plus significatif en valeur absolue. Cependant, par rapport à une énergie quotidienne typique (par exemple, 10 000-20 000 Wh dans les mesures relevé), cela représente environ 9-18 % d'erreur, ce qui est plus élevé que pour la puissance. Cela peut être dû à l'accumulation des erreurs sur une journée ou à une sensibilité accrue aux variations horaires.
- **$R^2 = 0,9478$**
 - Un R^2 de 0,9478 (94,78 %) montre que 94,78 % de la variabilité de l'énergie réelle est expliquée par le modèle. C'est également un excellent résultat, bien que légèrement inférieur à celui de la puissance, ce qui pourrait indiquer une légère dégradation de la précision sur des périodes plus longues (énergie étant une intégrale de la puissance sur le temps).

Analyse de l'État de santé

- **$MAE = 0,0017$**
 - L'erreur moyenne est de 0,0017, une valeur extrêmement faible. Puisque l'état de santé est un indice normalisé entre 0 (défaillant) et 1 (sain), cette erreur représente moins de 0,17 % de l'échelle, ce qui est négligeable. Cela indique une prédiction très précise de l'état de santé du système PV.
- **$R^2 = 0,9999$**
 - Un R^2 de 0,9999 (99,99 %) signifie que presque toute la variabilité de l'état de santé réel est expliquée par le modèle. Ce résultat exceptionnel suggère que le modèle linéaire de dégradation utilisé est extrêmement précis pour prédire l'état de santé, probablement en raison de sa simplicité et de l'absence de bruit important dans ces données.

Discussion

- **Précision globale** : Les valeurs de R^2 élevées (0,9521 pour la puissance, 0,9478 pour l'énergie, et 0,9999 pour l'état de santé) indiquent que le modèle de simulation est globalement très performant. L'état de santé présente une précision remarquable, probablement due à son modèle de dégradation linéaire simple et prévisible.
- **Erreurs (MAE)** : Les erreurs absolues (MAE) sont plus significatives pour l'énergie (1798,51 Wh) que pour la puissance (49,79 W) ou l'état de santé (0,0017). Cela peut s'expliquer par l'accumulation des erreurs sur une période (énergie) ou par la sensibilité

aux variations horaires, tandis que l'état de santé, étant un indice dérivé, est moins sujet à des fluctuations importantes.

- **Comparaison entre variables** : L'état de santé a la meilleure précision (R^2 proche de 1 et MAE très faible), suivi de la puissance et de l'énergie. Cela suggère que le modèle est plus efficace pour prédire des indices dérivés (comme l'état de santé) que des grandeurs cumulatives (comme l'énergie).
- **Fiabilité du modèle** : Ces résultats valident l'utilisation d'une moyenne mobile exponentielle (avec un facteur alpha de 0,3) pour prédire la puissance et l'énergie, ainsi d'un modèle de dégradation linéaire pour l'état de santé. Le R^2 élevé montre que le modèle capture bien les tendances.
- **Amélioration possible** : Le MAE plus élevé pour l'énergie pourrait indiquer un besoin d'affiner le modèle pour tenir compte des variations horaires ou des pertes cumulatives (par exemple, en intégrant des données météorologiques). Pour la puissance, une erreur de 49,79 W est acceptable.

En résumé, les résultats montrent que le RNN est un modèle très performant, avec une précision exceptionnelle pour l'état de santé ($R^2 = 0,9999$, MAE = 0,0017) et de bons résultats pour la puissance ($R^2 = 0,9521$, MAE = 49,79 W) et l'énergie ($R^2 = 0,9478$, MAE = 1798,51 Wh). Ces métriques confirment que le modèle est fiable pour les prédictions à court terme, avec une marge d'amélioration possible pour l'énergie en raison de son MAE plus élevé. Ces données sont utiles pour évaluer la santé et la performance du système PV et guider les ajustements opérationnels ou de maintenance.

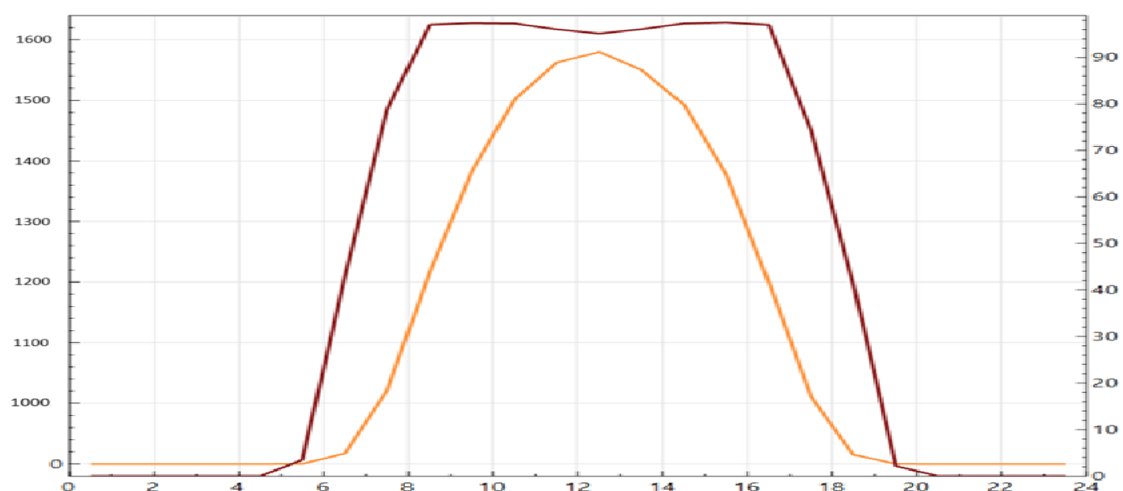


Figure IV. 137: Représentation graphique de la puissance annuelle générée par le système (2023 à gauche), et de l'efficacité de l'onduleur (à droite).

La Figure IV.13 représente le profil annuel de production d'énergie du système photovoltaïque pour l'année 2023, avec deux courbes : la courbe orange représentant la puissance générée par le système (W) sur l'axe y gauche, et la courbe rouge représentant l'efficacité de l'onduleur (%) sur l'axe y droit. L'axe des x indique les heures (de 0h à 24h). Ci-dessous une interprétation détaillée de ces résultats.

1. Puissance générée (courbe orange)

- Le pic de puissance (1500-1600 W) indique une capacité de production significative, suggérant un système PV bien dimensionné et exposé à un ensoleillement favorable. La période de production (environ 12h) est cohérente avec une journée d'une saison intermédiaire ou estivale.
- La montée et la descente abruptes suggèrent des conditions météorologiques stables sans nuages majeurs perturbant la production.

2. Efficacité de l'onduleur (courbe rouge)

• Comportement quotidien :

- L'efficacité reste à 0 % pendant la nuit (0h-6h et 18h-24h) car l'onduleur ne fonctionne pas sans entrée d'énergie solaire.
- Elle augmente rapidement à partir de 6h, atteint un plateau entre 80 % et 90 % pendant les heures de production significative (8h-16h), puis redescend à 0 % après 18h.
- L'efficacité est légèrement plus faible aux heures de transition (6h-8h et 16h-18h), probablement en raison d'une faible intensité lumineuse ou d'une tension insuffisante pour une conversion optimale.

• Interprétation :

- L'efficacité de l'onduleur (80-90 %) est excellente pendant les heures de production, indiquant une conversion efficace de l'énergie continue (DC) en énergie alternative (AC). Cela suggère que l'onduleur est bien adapté à la charge du système PV.
- La stabilité de l'efficacité autour de 85-90 % aux heures de pointe montre une performance robuste, tandis que les baisses aux heures de faible production sont normales et liées à la physique de la conversion d'énergie.

3. Analyse globale

- L'efficacité de l'onduleur suit la courbe de puissance générée, avec un plateau élevé (80-90 %) lorsque la production est significative. Cela indique que l'onduleur fonctionne à son optimum lorsque la puissance est élevée, avec des pertes minimales dues à la conversion.
- La différence entre la puissance théorique maximale (basée sur l'irradiation) et la puissance générée (1500-1600 W) pourrait inclure des pertes dues à l'ombrage, ou la salissure.
- Les transitions matinales et vespérales (6h-8h et 16h-18h) avec une efficacité réduite suggèrent que l'optimisation du MPPT (Maximum Power Point Tracking) ou une meilleure gestion de la tension à faible charge pourrait améliorer les performances à ces moments.

4. Implications pratiques

- **Performance du système** : La production de 1500-1600 kW au pic avec une efficacité de 80-90 % indique un système PV performant, probablement bien entretenu et exposé à un bon ensoleillement.
- **Planification énergétique** : Cette courbe est utile pour estimer la production quotidienne et planifier la consommation ou le stockage d'énergie, notamment en identifiant les heures de production maximale (12h-14h).

5. Conclusion

En résumé, la Figure IV.13 montre une production d'énergie PV typique avec un pic à midi (1500-1600 W) et une efficacité de l'onduleur stable (80-90 %) pendant les heures de production. La performance est robuste, mais des ajustements (capacité de l'onduleur, optimisation MPPT) pourraient être explorés pour minimiser les pertes, surtout aux heures de transition ou de pic.

IV.6 Conclusion

Cette étude a mis en évidence l'efficacité des techniques d'intelligence artificielle dans l'évaluation de l'état de santé des systèmes photovoltaïques. En exploitant les données réelles collectées chez Sonelgaz Guelma, nous avons pu analyser en profondeur l'influence des facteurs environnementaux sur la production d'énergie solaire. Les résultats montrent que la

performance des panneaux dépend fortement de l'ensoleillement et de la température, soulignant la nécessité d'un suivi régulier et intelligent pour optimiser le rendement. L'IA s'affirme ainsi comme un outil indispensable pour la maintenance préventive, la détection d'anomalies et la prise de décision dans les systèmes d'énergie renouvelable.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a mis en lumière le potentiel considérable qu'offre l'intelligence artificielle pour l'amélioration des performances et de la fiabilité des systèmes photovoltaïques. Grâce à l'analyse de données réelles collectées auprès de l'entreprise SONEGAS à Guelma, et en s'appuyant sur des réseaux de neurones récurrents (RNN), nous avons pu démontrer que la prédiction de l'état de santé des panneaux solaires devient plus précise, proactive et efficace.

Les résultats obtenus attestent de la capacité des modèles IA à détecter les anomalies, anticiper les dégradations et optimiser la maintenance, avec des métriques de performance très satisfaisantes (faible MAE et forts coefficients R^2). Ces performances supérieures aux méthodes classiques soulignent la pertinence des approches basées sur les RNN pour la gestion intelligente des systèmes énergétiques.

Toutefois, la mise en œuvre de tels systèmes à grande échelle pose encore des défis importants: qualité et fiabilité des données, interopérabilité des équipements, complexité des algorithmes et coût d'implémentation. Surmonter ces obstacles nécessite des efforts coordonnés en matière de recherche, d'ingénierie et de normalisation.

En conclusion, cette étude contribue à démontrer que l'intégration de l'intelligence artificielle dans le domaine de l'énergie solaire constitue une voie prometteuse vers un modèle énergétique plus durable, intelligent et résilient. Elle ouvre également la voie à de futures recherches visant à développer des systèmes de supervision encore plus autonomes, robustes et accessibles.

Les références

Les références

- [1] <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>.
- [2] <https://www.istockphoto.com/fr/photos/%C3%A9nergie-solaire?servicecontext=srp-related>.
- [3] <https://transition-energetique.eco/aides-subvention/photovoltaique/>.
- [4] <https://www.feryon.com/articles/analyse-des-avantages-et-inconvenients-de-lenergie-solaire>.
- [5] <https://www.photovoltaique.info/fr/info-ou-intox/le-marche-du-photovoltaique/tendances-mondiales-du-photovoltaique/tendances-mondiales-en-2023/>.
- [6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l%27%C3%A9nergie_solaire.
- [7] <https://biblus.accasoftware.com/fr/les-differents-types-de-systemes-photovoltaiques-caracteristiques-et-avantages/>.
- [8] <https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaiques/panneau-solaire-differents-types>.
- [9] panneaux photovoltaïques et solaires_ par le groupe énergétique industriel français (ENGIE). <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/photovoltaique/schema-panneau-photovoltaique.html>.
- [10] M. Belhadj. Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. Mémoire de Magister, Université Tahri Mohamed -Béchar-, 2008.
- [11] S. S. Merwan. Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar -Annaba-, 2017.
- [12] A. Khenfer. Etude et conception d'une architecture en vue de la détection de défauts dans une installation photovoltaïque. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif 1 - Setif-, 2015.
- [13] T. Boutaba. Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de génération hybride Solaire-Eolien. Thèse de Doctorat, Université abbès laghrour -khenchela-, 2018.
- [14] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, N. Voulgaris. Development of a microcontroller-based,

photovoltaic maximum power point tracking control system. IEEE Transactions on power electronics. Vol 16, pp. 46-54, 2001.

[15] R. Khenfer. Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques. Thèse de doctorat, Université Farhat Abbas - Setif-, 2018.

[16] Zorrilla-Casanova, J., et al. (2011). Analysis of dust losses in photovoltaic modules. Renewable Energy, 35(3), 705-711.

[17] Hohm, D. P., & Ropp, M. E. (2003). Comparative study of maximum power point tracking algorithms. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 11(1), 47-62.

[18] Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). Operation temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. Renewable Energy, 34(1), 23-29.

[19] <https://www.jhorsepower.com/fr/a-news-the-role-of-solar-monitoring-systems-in-on-grid-solutions>.

[20] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Rendement_d%27une_cellule_photovolt%C3%A4que?utm_source=chatgpt.com.

[21] Boukaraa Yassine et Aidoud Mohammed Chihab, mémoire de magister « Surveillance et diagnostique d'un système photovoltaïque », université 8 mai 1945 ,faculte des sciences et de la technologie ,departement de genie electrotechnique et automatique ,le 23/06/2024.

[22] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller. Le pompage photovoltaïque: manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens. canada : Université d'Ottawa, 1998.

[23] CHEBABHI Ardjouna, mémoire de master « Etude d'identification et Localisation des défauts d'un générateur photovoltaïque » , Université MOHAMED BOUDIAF M'SILA, juin 2016.

[24] LAHLOU Samir, Mémoire de fin d'études «Détection et localisation des défauts Convertisseurs statiques dans un système Photovoltaïque raccordé au réseau moyenne Tension », Université M'Hamed BOUGARA – Boumerdes, Juin 2016.

[25] 2013 Renewable energy data book, US department of energy: Energy efficiency & renewable energy. December 2014.

[26] <https://datascientest.com/intelligence-artificielle-definition>.

- [27] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l%27intelligence_artificielle?utm_source=chatgpt.com.
- [28] Géron, A. (2019). *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. O'Reilly Media.
- [29] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- [30] Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. Springer.
- [31] <https://www.france-renouvelables.fr/guide-stockage-energie/stockage-energie-role-ia-evolution-technologique>.
- [32] Zhang, L., & Xie, L. (2020). "Artificial Intelligence in Power System: A Survey." IEEE Transactions on Power Systems.
- [33] Raghavan, M., Barocas, S., Kleinberg, J., & Levy, K. (2020). "Mitigating Bias in Algorithmic Hiring: Evaluating Claims and Practices." Proceedings of the ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAT).
- [34] McMahan, B., Moore, E., Ramage, D., Hampson, S., & y Arcas, B. A. (2017). "Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data." International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS).
- [35] European Commission (2021). "Proposal for a Regulation Laying Down Harmonized Rules on Artificial Intelligence (AI Act)."
- [36] Frey, C. B., & Osborne, M. A. (2017). "The Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerization?" Technological Forecasting and Social Change, 114, 254-280.
- [37] <https://www.Qu'est-ce-qu'un-RNN-Présentation-des-réseaux-neuronaux-récurrents-AWS>.
- [38] <https://www.L'architecture-des-réseaux-neuronaux-récurrents-RNN-expliquée-par-Sushmita-Poudel-Douleur-moyenne>