



Université Abderrahmane Mira de Bejaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : électrotechnique

Spécialité : Energie renouvelable en électrotechnique & électrotechnique industrielle

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du master en électrotechnique

Thème

Etude d'un système de surveillance de l'encrassement dans les installations PV

Réalisé par :

REDJAI Ramzi
REZKELLAH Amine

Encadré par :

Mr MEZZAI Nabil

Co-encadré par :

Mme REKIOUA Djamilia

Examiné par :

Mr KAKOUCHE Khoudir
Mme RAHRAH Karima

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur

**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche**

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 ()
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Jc soussigné,

Nom : REDJAFI

Prénom : RAMZI

Matricule : 2020.33.00.63.46

Spécialité et/ou Option : Electrotechnique industrielle

Département : Génie Electrique

Faculté : Technologie

Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Etude d'un système de surveillance de l'enrobage dans les installation PV

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaia le
09/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur

**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche**

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 ()
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : REZKELLAH

Prénom : AMINE

Matricule : 18.18.33.00.3209

Spécialité et/ou Option : Énergie renouvelable en électrotechnique

Département : Génie Electrique

Faculté : Technologie

Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Etude d'un système de surveillance de
l'enroulement dans les installation PV

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
09/07/25

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Remerciements

Avant tout, On remercie ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné la santé, le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude en premier lieu à notre encadreur, Mr : MEZZAI Nabil, pour son Encadrement, ses directives et sa disponibilité.

Aussi, nous la remercions pour ses Encouragements, son indulgence, et sa sympathie.

Également, nous remercions notre Co-encadrant, Mme : REKIOUA née ZIANI Djamila. Qui été présente à chaque moment du déroulement de ce projet.

Et pour tout l'équipe de laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information (L.T.I.I).

Nous adressons aussi nos remerciements aux autres membres du jury pour l'honneur de bien vouloir apporter leur jugement à notre travail.

Enfin, nous terminons ce remerciement, nos familles, nos amis, nos proches, qui nous ont aidés à accomplir notre parcours scolaire.

R.Ramzi & R.Amine

Dédicace

*Je dédie ce travail à ma mère qui m'a soutenu
durant mon parcours scolaire et durant toute ma
vie, et à mon père que dieu l'accueille dans son
vaste paradis.*

*Ainsi que à mes frères : Fouad et Omar et mes sœurs
Lydia, Amal et Wissam, et toutes ma famille
paternelle et maternelle*

*A mes amis Younes, Tarik, Chafik, Riad. B et à toute
personne qui m'a aidé à accomplir ce travail.*

*Enfin, un spécial remerciement à mon binôme amine
pour sa collaboration efficace, son engagement et sa
contribution essentielle à la réalisation de ce
mémoire.*

*Merci à vous tous pour avoir rendu cette aventure
aussi enrichissante et mémorable.*

Ramzi

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents que dieu les accueille dans son vaste paradis,

A tous mes frères et sœurs : Bilal, Nadir, Nassim, Samir, Halim et Sabrina, Manel. Et pour tout ma famille : Zohra, Zahir, Mohand Taib.

A mes amis et proches : El hadj Hamou, Mamine, Massi, Hanin, Lyes, Riad, Nadjim, Mehdi, Tarik, Chafik.

Mention spéciale à mon binôme Ramzi sans le quelle ce travail n'aurait jamais pu être réalisé.

A tous ce qui ont contribué de près ou de loin à ce projet merci d'avoir rendu cette aventure aussi enrichissante et mémorable.

Amine

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Listes des tableaux

Listes des figures

Listes des symboles et abréviation

Introduction générale.....1

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction	2
I.2 Gisement solaire en Algérie	2
I.3 Systèmes photovoltaïques.....	3
I.3.1 Cellule photovoltaïque	3
I.3.1.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	3
I.3.1.2 Caractéristique de la cellule photovoltaïque.....	4
I.3.2 Influence de l'éclairement solaire et de la température sur les caractéristiques électriques	5
I.3.2.1 Influence de l'éclairement solaire sur les caractéristiques électriques	5
I.3.2.2 Influence de la température sur les caractéristiques électriques	6
I.4 Association des cellules photovoltaïques	7
I.4.1 Association série	7
I.4.2 Association parallèle	7
I.4.3 Association série/parallèle	8
I.5 Technologies des cellules	9
I.5.1 Cellules au silicium cristallin (c-Si).....	9
I.5.2 Cellules couches minces	9
I.5.3 Cellules multi-jonctions	9
I.5.4 Cellules à pérovskites (technologie émergente).....	10
I.5.5 Technologies organiques et hybrides (encore en recherche)	10
I.6 Différents système photovoltaïque	11
I.6.1 Système photovoltaïque autonome	11
I.6.2 Système photovoltaïque connectée au réseau.....	12
I.7 Défauts liées aux panneaux PV	12
I.8 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque	12
I.9 Conclusion	13

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un Panneau PV : sain et avec ombrage	
II.1 Introduction	15
II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque	15
III.3 Caractéristiques des modules photovoltaïques	17
II.3.1 Influence de l'irradiation sur les paramètres des modules PV	19
II.3.2 Influence de la température sur les paramètres des modules PV	20
II.4 Identification des paramètres électriques des modules photovoltaïques	21
II.5 Commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)	23
II.6 Modélisation d'un panneau PV sous effet d'Ombrage	27
II.6.1 Types d'ombrage	27
II.6.2 Conséquences d'ombrage	27
II.6.3 Résultats obtenus sous Matlab-Simulink.....	28
II.7 Conclusion	32

Chapitre III : Étude, conception et expérimentation d'un système autonome de nettoyage pour panneaux PV

III.1 Introduction.....	33
III.2 Définition de l'encrassement	33
III.3 Système de surveillance et de nettoyage proposé	34
III.4 Composants principaux du système étudié	35
III.4.1 Générateur PV	35
III.4.2 Régulateur de charge solaire PWM	35
III.4.3 Batterie Solaire	36
III.4.4 Pompe DC.....	36
III.4.5 Module ESP32	37
III.4.6 Relais SRD-05VDC-SL-C.....	38
III.4.7 Photorésistance 5528	39
III.4.8 Réservoir d'eau.....	40
III.5 Réalisation de la maquette expérimentale	40
III.6 Tests Expérimentaux.....	42
III.7 Conclusion	50

Listes des figures

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

Figure I.1 : Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu (moyenne annuelle)	3
Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque.....	4
Figure I.3 : Caractéristique I_{pv} (V_{pv}) d'une cellule Photovoltaïque	5
Figure I.4 : L'influence de l'éclairement solaire sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	6
Figure I.5 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	6
Figure I.6 : Cellules ou modules photovoltaïques en série	7
Figure I.7 : Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle.	8
Figure I.8 : Cellules ou modules photovoltaïques en série/parallèle.	8
Figure I.9 : Système photovoltaïque autonome	11
Figure I.10 : Schéma d'une installation photovoltaïque connectée au réseau.	12

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un Panneau PV : sain et avec ombrage

Figure II.1 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	15
Figure II.2 : Caractéristique courant– tension d'un module photovoltaïque pour $E_s=1000$ W/m ² et $T=25$ °C.....	18
Figure II.3 : Caractéristique puissance PV –tension PV d'un module photovoltaïque pour $E_s=1000$ W/m ² et $T=25$ °C.....	19
Figure II.4 : Caractéristique courant PV-tension PV pour différents éclairages solaire. ...	19
Figure II.5 : Caractéristique puissance PV-tension PV pour différents éclairages solaire. 20	20
Figure II.6 : Caractéristique courant PV-tension PV pour différents niveaux de températures	20
Figure II.7 : Caractéristique puissance PV-tension PV pour différents niveaux de températures.	21
Figure II.8 : Maquette expérimentale utilisée pour le relevé des caractéristiques électriques du module PV au laboratoire LTII.	21
Figure II.9 : Maquette d'Acquisition de données solaires en temps réel.	22
Figure II.10 : Caractéristique expérimentale courant-tension pour un $E_s= 890$ W/m ² et $T=31.6$ °C.	22
Figure II.11 : Caractéristique expérimentale puissance-tension pour un $E_s= 890$ W/m ² et $T=31.6$ °C.	22
Figure II.12 : Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau solaire.....	24
Figure II.13 : Organigramme de la méthode perturbation et observation.	24
Figure II.14 : Caractéristique I_{pv} - V_{pv} pour différents éclairages solaire avec la réponse de l'algorithme (P&O).	25
Figure II.15 : Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour différents éclairages solaire avec la réponse de l'algorithme (P&O).	25
Figure II.16 : Caractéristique I_{pv} - V_{pv} pour différents Températures avec la réponse de l'algorithme (P&O).	26

Figure II.17 : Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour différents Températures avec la réponse de l'algorithme (P&O)	26
Figure II.18 : Programme sous Matlab/Simulink.	28
Figure II.19 : Photos de différentes configurations d'ombrage.	28
Figure II.20 : Caractéristique I_{pv} - V_{pv} pour différents niveaux d'ombrage.	29
Figure II.21 : Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour différents niveaux d'ombrage.....	29
Figure II.22 : Variation des puissances selon les niveaux d'ombrage.....	30
Figure II.23 : Variation des pertes de puissance en (W) selon les niveaux d'ombrage.....	31
Figure II.24 : Variation des pertes de puissance en (%) selon les niveaux d'ombrage.	31
Figure II.25 : Variation du facteur de forme (FF) selon les niveaux d'ombrage.....	32

Chapitre III : Étude, conception et expérimentation d'un système autonome de nettoyage pour panneaux PV

Figure III.1: Exemple d'encrassement d'un générateur PV.	33
Figure III.2: Schéma du système proposé	34
Figure III.3: Générateur PV	35
Figure III.4: Régulateur de charge solaire PWM.	35
Figure III.5: Batterie.	36
Figure III.6: Pompe DC 12V.	36
Figure III.7: Composition du module ESP 32	38
Figure III.8: Relais Songle SRD-05VDC-SL-C.	38
Figure III.9: Photorésistance (LDR) de type 5528.	39
Figure III.10: Réservoir d'eau.	40
Figure III.11: Projet réalisé sous logiciel Proteus.	41
Figure III.12: Carte réalisée.....	41
Figure III.13: Carte globale de gestion.	42
Figure III.14: Générateur PV encrassé.	42
Figure III.15: Générateur PV nettoyé.	43
Figure III.16: Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour un $E_s = 780W/m^2$ et une $T = 27^\circ C$	43
Figure III.17: Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour un $E_s = 630W/m^2$ et une $T = 23^\circ C$	43
Figure III.18: Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour un $E_s = 563W/m^2$ et une $T = 25^\circ C$	44
Figure III.19: Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour un $E_s = 470W/m^2$ et une $T = 24^\circ C$	44
Figure III.20: Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour un $E_s = 340W/m^2$ et une $T = 21^\circ C$	44
Figure III.21: Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour un $E_s = 100W/m^2$ et une $T = 23^\circ C$	45
Figure III.22: Comparaison entre les puissances pour déférents niveaux E_s	47
Figure III.23: Comparaison entre les pertes de puissance pour déférents niveaux E_s	48
Figure III.24: Comparaison entre les facteurs de forme pour déférentes puissances et niveaux de E_s	48
Figure III.25: Comparaison entres les pertes de puissance due au vieillissement pour déférents ensoleillement.	50

Listes des tableaux

Listes des tableaux

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

Tableau I.1 : comparaison entre les différentes technologies des cellules.	10
Tableau I.2 : différents types des cellules photovoltaïques	11

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un Panneau PV : sain et avec ombrage

Tableau II.1 : Paramètres d'un panneau solaire Suntech existant au laboratoire LTII.....	18
Tableau II.2 : Comparaison des performances entre un module sain et avec ombrage.	30

Chapitre III Étude, conception et expérimentation d'un système autonome de nettoyage pour panneaux PV

Tableau III.1: Caractéristiques techniques de la carte ESP32.....	37
Tableau III.2 : Caractéristiques techniques du relais Songle SRD-05VDC-SL-C	39
Tableau III.3 : Comparaison des performances du Générateur PV.....	46
Tableau III.4 : Comparaison des performances mesurées et simulées des modules PV.....	49

*Liste des symboles et
d'abréviations*

Liste des symboles

α_{sc} : Représente le coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} .

β_{oc} : Représente le coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc} .

D : Diode.

Es : L'irradiation solaire.

G : Source de courant.

G_{stc} : L'éclairement dans les conditions standards de fonctionnement.

I_{cc} : Le Courant de court-circuit.

I_m : Courant maximale.

I_{sc} : Le Courant de court-circuit en série.

I_{pcc} : Le Courant de court-circuit en parallèle.

I_{pv} : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Le photo-courant.

I_d : Courant de diode.

I_{rsh} : Le courant shunt.

I_{pm} : Courant au point de puissance maximale.

I_{spcc} : Le courant de circuit ouvert série/parallèle.

N_s : Nombre cellules série.

N_p : Nombre cellules parallèle.

P_m : Puissance maximale.

R_{sh} : Résistance shunt.

R_s : Résistance série.

T_{stc} : La température dans les conditions standards de fonctionnement.

V_{co} : La Tension de circuit ouvert.

V_m : Tension maximale.

V_{sc} : La Tension de circuit ouvert.

V_{pco} : La Tension de circuit ouvert en parallèle.

V_{spco} : La Tension de circuit ouvert série/parallèle

V_{pm} : Tension au point de puissance maximale.

Abréviations

AC : Le courant alternative.

ADC : Analog to Digital Converter (Convertisseur analogique-numérique).

ARES : Advanced Routing and Editing Software.

a-Si : Silicium amorphe.

BLE : Bluetooth Low Energy.

CdTe : Tellurure de cadmium.

CIGS : Cuivre–Indium–Gallium–Sélénium.

CPV : Concentrateurs photovoltaïque (solaires).

c-Si : Cellules au silicium cristallin.

DAC : Digital to Analog Converter.

DC : Le courant continu.

FF : Facteur de forme.

GPIO : General Purpose Input/Output.

IoT : Internet of Things.

ISIS : Intelligent Schematic Input System.

I2C : Inter-Integrated Circuit.

LDR : Light Dependent Resistor.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

MPP : Point de Puissance Maximale.

PCB : Printed Circuit Board.

PIC : Peripheral Interface Controller

PO : Perturbation et d'Observation.

PV : Photovoltaïque.

PWM : Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion).

STC : conditions de test standard.

SPI : Serial Peripheral Interface.

SPDT : Single Pole Double Throw.

UART : Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.

Introduction générale

Introduction générale

Face à l'épuisement progressif des ressources fossiles et aux enjeux environnementaux croissants, les énergies renouvelables apparaissent aujourd'hui comme des alternatives incontournables pour assurer un approvisionnement énergétique durable. Parmi ces sources, l'énergie photovoltaïque occupe une place de choix grâce à sa capacité à convertir directement le rayonnement solaire en électricité propre et silencieuse [1].

L'Algérie, de par sa position géographique privilégiée, dispose d'un des gisements solaires les plus importants au monde, offrant des perspectives prometteuses pour le développement de systèmes photovoltaïques performants. Toutefois, la production d'énergie solaire reste tributaire de plusieurs facteurs externes, tels que l'irradiation, la température, l'ombrage partiel et l'encrassement des modules photovoltaïques, qui peuvent impacter considérablement leur rendement énergétique [2].

Ainsi, ce travail vise à apporter une contribution technique et pratique dans le domaine de la surveillance de l'encrassement des panneaux photovoltaïques et à y remédier par la conception d'un système de nettoyage adapté.

Ce travail s'articule autour de trois chapitres en plus de l'introduction générale, la conclusion générale et les perspectives.

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur les systèmes photovoltaïques, il présente les principes de fonctionnement, les caractéristiques et les différentes technologies existantes.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque, sain et soumis à des conditions d'ombrage, sous MATLAB/Simulink, permettant d'analyser l'impact des conditions environnementales sur ses performances et de mettre en œuvre une commande MPPT de type Perturbation et Observation (P&O).

Le dernier chapitre présente une étude expérimentale portant sur la conception et l'évaluation d'un système autonome de nettoyage pour panneaux photovoltaïques, afin de pallier les effets de l'encrassement et d'améliorer durablement la productivité des installations.

Chapitre I

*Etat de l'art sur les systèmes
photovoltaïques*

I.1 Introduction

Face à la raréfaction des énergies fossiles et aux enjeux environnementaux, l'énergie photovoltaïque s'impose comme une solution durable et propre. Basée sur la conversion directe de l'énergie solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques, cette technologie connaît un essor rapide à l'échelle mondiale. Les avancées dans les matériaux, l'efficacité des cellules et l'intégration aux réseaux électriques ont considérablement amélioré ses performances. Aujourd'hui, le photovoltaïque s'étend des applications domestiques aux grandes centrales solaires. Ce chapitre présente l'état actuel de la technologie, ses principes de fonctionnement, ses limites ainsi que les pistes d'amélioration en cours [3].

I.2 Gisement solaire en Algérie

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de donnée décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exacte possible compte tenu des demandes en énergie à saisir. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre facilement les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7kWh/m²/jour [4]. Elle est répartie comme suit :

- Au Nord : 5,6 kWh/m²/jour ;
- Au Sud : 7,2 kWh/m²/jour.

La figure (I.1) montre l'irradiation globale moyenne annuelle reçue sur plan incliné à la latitude du lieu.

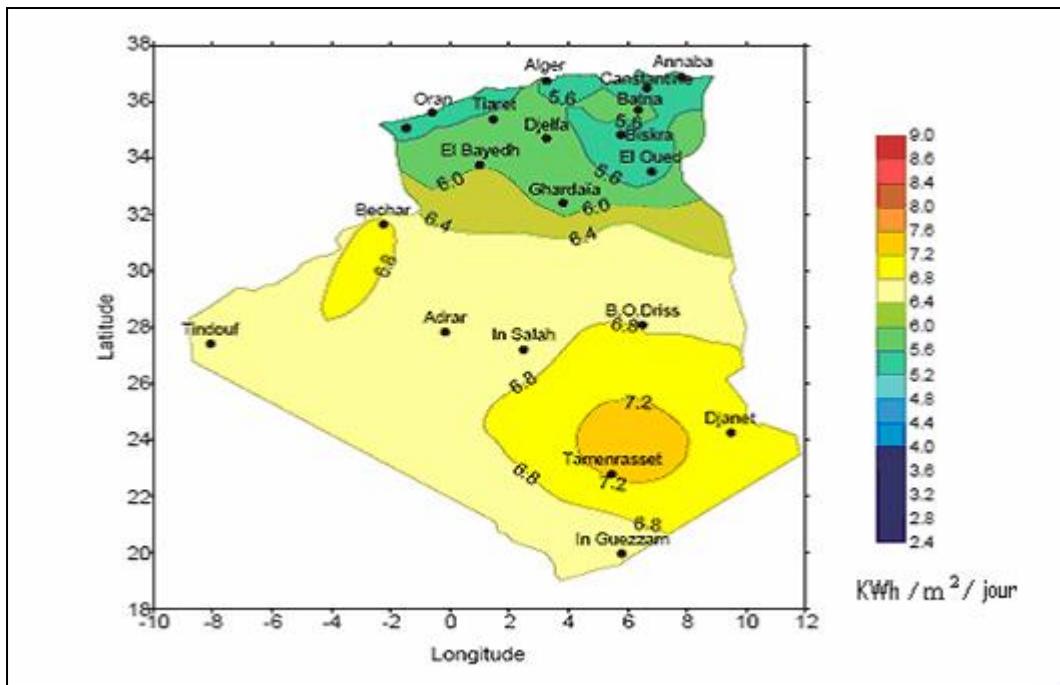


Figure I.1 : Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu (moyenne annuelle) [4].

I.3 Systèmes photovoltaïques

Le mot « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots «Photo», un mot grec signifiant lumière, et «Volta», le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L’effet photovoltaïque, c’est la conversion directe de l’énergie solaire en électricité [5].

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839 [6].

I.3.1 Cellule photovoltaïque

I.3.1.1 Principe de fonctionnement d’une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur qui convertit directement l’énergie lumineuse en électricité grâce à l’effet photovoltaïque. Elle est généralement composée de deux couches de matériaux semi-conducteurs, souvent du silicium, dopés différemment pour former une jonction p_n. Lorsque la lumière du soleil frappe la cellule, les photons transfèrent leur énergie aux électrons du matériau, provoquant leur libération. Cette génération de paires électron-trou crée un courant électrique lorsque les charges sont séparées

par le champ électrique interne de la jonction. Les électrons se déplacent vers la couche n, les trous vers la couche p, générant ainsi un courant continu exploitable via des électrodes placées aux extrémités de la cellule [7].

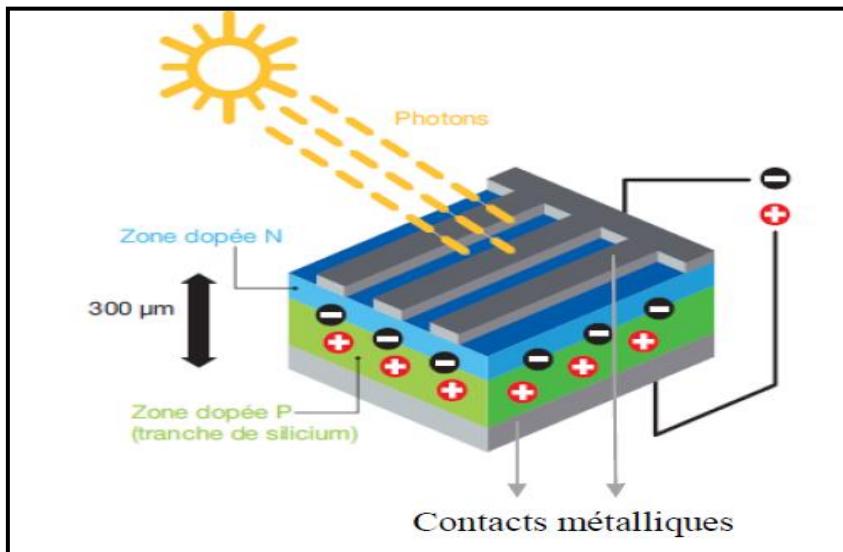


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque [7].

I.3.1.2 Caractéristique de la cellule photovoltaïque

A. Courant de court-circuit, I_{cc}

Ce courant correspond à celui mesuré lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées (c'est-à-dire pour une tension $V = 0$ dans le schéma équivalent). Il augmente de manière linéaire avec l'intensité lumineuse reçue par la cellule, et dépend également de la surface exposée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charge ainsi que de la température [6].

B. Tension de circuit ouvert, V_{co}

La tension à circuit ouvert correspond à la tension mesurée lorsque le courant traversant la cellule est nul. Elle est déterminée par la hauteur de la barrière énergétique et la résistance shunt. Cette tension diminue avec l'augmentation de la température et reste peu sensible à la variation de l'intensité lumineuse [6].

C. Courbe courant PV –tension PV

Une cellule photovoltaïque est une diode à jonction PN particulière. Dans l'obscurité, elle se comporte comme une photodiode dont le fonctionnement nécessite une alimentation, et sa caractéristique est identique à celle d'une diode. Une fois exposée à la lumière elle joue le

rôle d'un générateur de courant continu (DC), dont la caractéristique a l'allure présentée sur la figure I.3 [8].

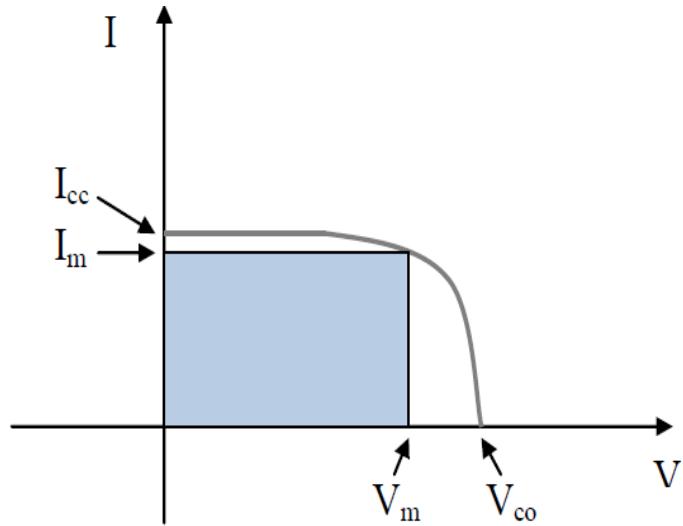


Figure I.3 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule Photovoltaïque [6].

I.3.2 Influence de l'éclairement solaire et de la température sur les caractéristiques électriques

I.3.2.1 Influence de l'éclairement solaire sur les caractéristiques électriques

L'éclairement solaire a un impact direct sur les performances électriques d'une cellule photovoltaïque. En effet, lorsque l'intensité lumineuse augmente, le courant de court-circuit (I_{cc}) croît proportionnellement, car davantage de photons sont absorbés, générant plus de porteurs de charge. En revanche, la tension à vide (V_{co}) ne varie que légèrement, augmentant de manière logarithmique avec l'éclairement solaire.

La figure suivante présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement.

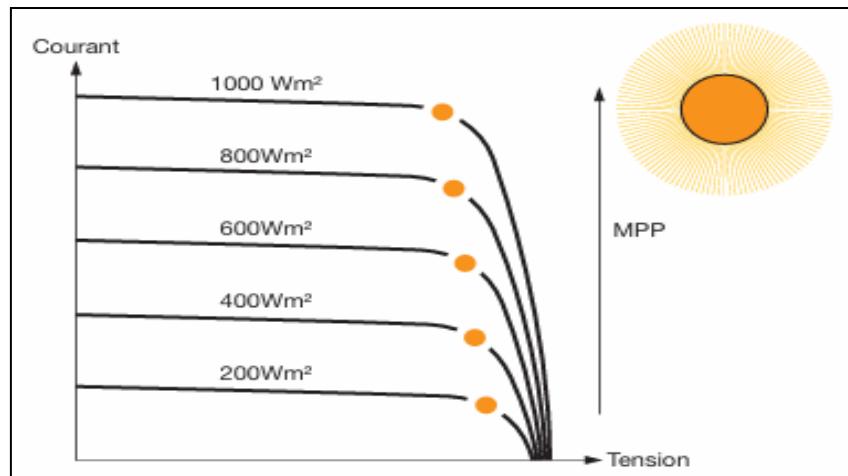


Figure I.4 : L'influence de l'éclairement solaire sur la caractéristique $I=f(V)$.

I.3.2.2 Influence de la température sur les caractéristiques électriques [9]

La température joue un rôle important dans le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque. Lorsque la température augmente, la tension de circuit ouvert (V_{co}) diminue de manière significative, car l'élévation de température réduit la barrière de potentiel de la jonction p_n . Cette baisse de tension entraîne une diminution de la puissance maximale délivrée par la cellule. Ainsi, le rendement global d'une cellule photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température, ce qui souligne l'importance de la gestion thermique dans les systèmes solaires, notamment dans les régions chaudes.

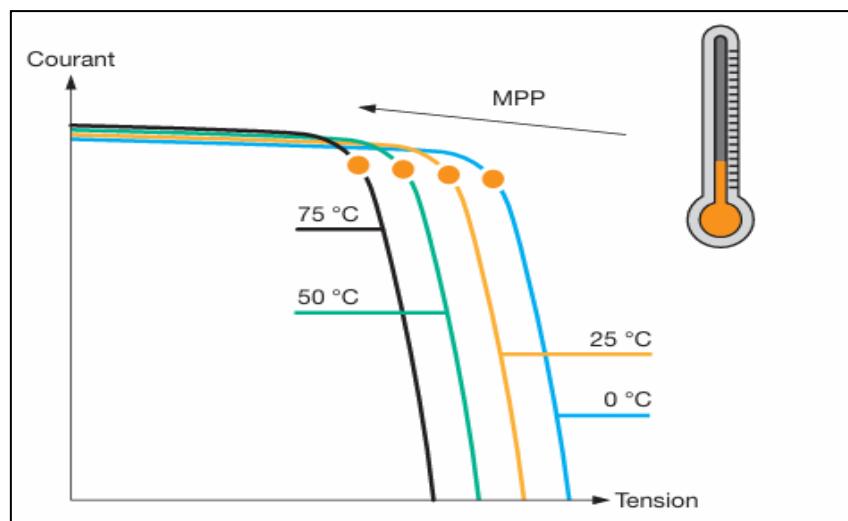


Figure I.5 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

I.4 Association des cellules photovoltaïques

Pour satisfaire les besoins en tension et en courant d'un système, les cellules photovoltaïques sont associées selon deux modes principaux :

I.4.1 Association série [9]

Dans un groupement de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même. La (figure 1.6) montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{co}) avec :

$$I_{sc} = I_{cc} \quad (I.1)$$

$$\text{Et: } V_{sc} = n_s * V_{co} \quad (I.2)$$

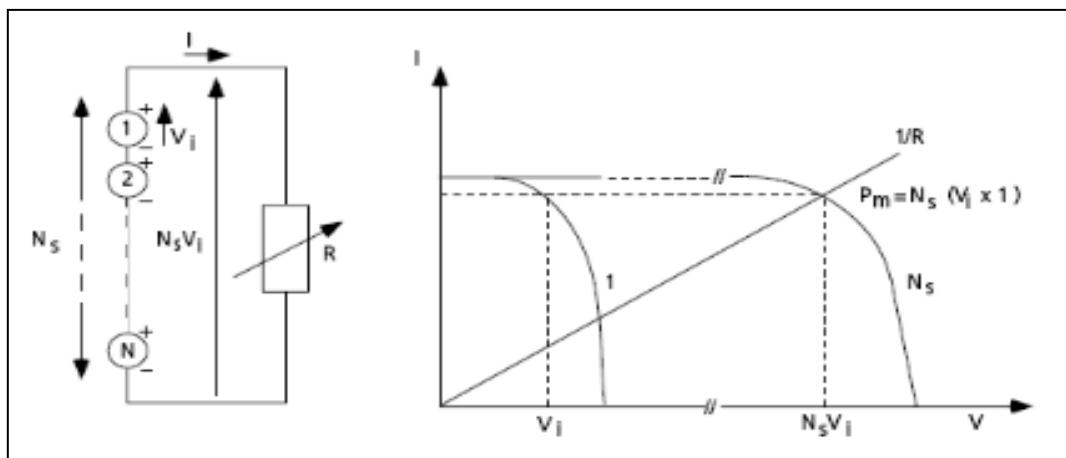


Figure I.6 : Cellules ou modules photovoltaïques en série [9].

I.4.2 Association parallèle

Dans un groupement de N_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants. La figure (1.7) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) Avec [9] :

$$I_{pcc} = n_p * I_{cc} \quad (I.3)$$

$$\text{Et : } V_{pco} = V_{co} \quad (I.4)$$

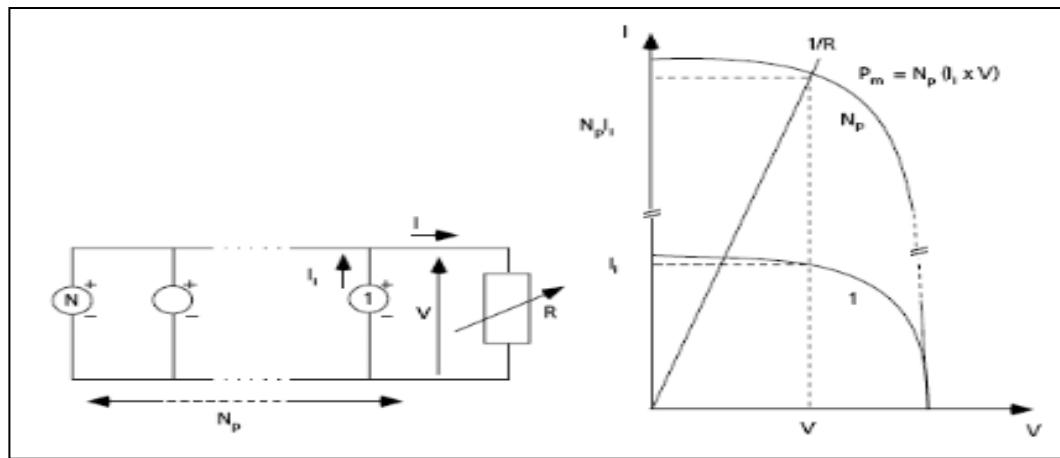


Figure I.7 : Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle [9].

I.4.3 Association série/parallèle

La caractéristique courant-tension globale d'un générateur photovoltaïque peut être déterminée théoriquement à partir de l'association de $n_s \times n_p$ cellules élémentaires supposées identiques. Le nombre de cellules en série (n_s) agit sur la tension totale, en multipliant la tension de chaque cellule, tandis que le nombre de cellules en parallèle (n_p) agit sur le courant total, en additionnant les courants des cellules. Ainsi, la courbe résultante est obtenue en étendant la caractéristique d'une cellule élémentaire le long de l'axe des tensions par un facteur n_s , et le long de l'axe des courants par un facteur n_p , comme l'illustre la figure I.8 [10].

$$I_{spcc} = np * I_{cc} \quad (I.5)$$

Et

$$V_{spco} = ns * V_{co} \quad (I.6)$$

Avec, n_p : nombre de cellules en parallèle et n_s : nombre de cellules en série.

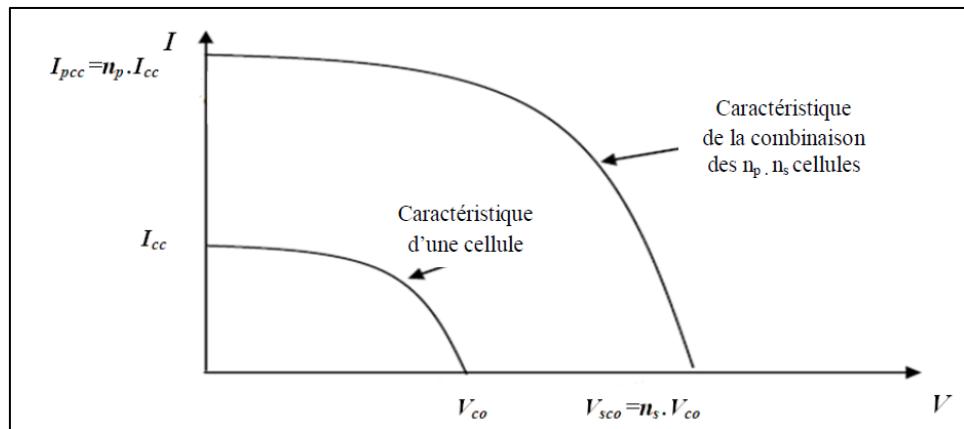


Figure I.8 : Cellules ou modules photovoltaïques en série/parallèle [10].

I.5 Technologies des cellules [11, 12]

Différentes technologies de cellules solaires ont émergé pour optimiser rendement, coût et adaptabilité, allant du silicium cristallin aux pérovskites et cellules organiques.

I.5.1 Cellules au silicium cristallin (c-Si)

C'est la technologie la plus répandue, représentant plus de 90 % du marché.

- **Monocristallin**
 - Haut rendement (18–22 %) ;
 - Coût plus élevé, mais meilleure efficacité en faible luminosité ;
 - Apparence uniforme (bleu foncé à noir).
- **Polycristallin (ou multicristallin)**
 - Rendement modéré (15–18 %) ;
 - Moins cher à produire ;
 - Apparence marbrée bleue.

I.5.2 Cellules couches minces

Fabriquées par dépôt de matériaux semi-conducteurs sur un substrat (verre, plastique, métal).

- **CdTe (Tellurure de cadmium)**
 - Coût faible, bon rendement (10–14 %) ;
 - Toxique (cadmium).
- **CIGS (Cuivre–Indium–Gallium–Sélénium)**
 - Rendement élevé pour couche mince (12–18 %) ;
 - Souple, léger, adapté aux surfaces courbes.
- **a-Si (Silicium amorphe)**
 - Faible coût et bonne tolérance à l'ombre ;
 - Rendement faible (6–10 %) ;
 - Utilisé pour petites applications (calculatrices, montres).

I.5.3 Cellules multi-jonctions

Superposition de plusieurs couches de matériaux pour capter différentes longueurs d'onde.

- Très haut rendement (jusqu'à 40 % en laboratoire) ;
- Coût très élevé ;
- Utilisées dans l'aérospatial ou concentrateurs solaires (CPV).

I.5.4 Cellules à pérovskites (technologie émergente)

- Très bon rendement en laboratoire ($>25\%$) ;
- Faible coût de fabrication ;
- Problèmes de stabilité et de toxicité (plomb).

I.5.5 Technologies organiques et hybrides (encore en recherche)

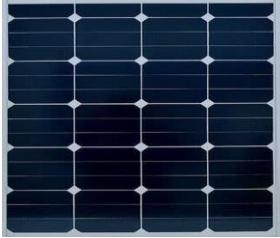
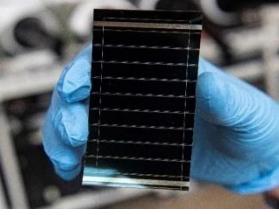
- Flexibles, imprimables, légères ;
- Faible rendement et faible durée de vie ;
- Applications nomades, capteurs, intégration esthétique.

Le Tableau suivant représente une comparaison entre les différentes technologies des cellules (rendement, coût, applications, etc.)

Tableau I.1 : comparaison entre les différentes technologies des cellules [12]

Technologie	Rendement (%)	Coût relatif	Applications typiques
Silicium monocristallin	18–22 (%)	Élevé	Toitures résidentielles, centrales solaires
Silicium polycristallin	15–18 (%)	Modéré	Installations résidentielles et industrielles
CdTe (couche mince)	10–14 (%)	Faible	Grandes centrales au sol
CIGS (couche mince)	12–18 (%)	Modéré	Applications intégrées, souples
Silicium amorphe (a-Si)	6–10 (%)	Très faible	Petits appareils électroniques
Multi-jonctions	30–40 (%)	Très élevé	Aérospatial, systèmes à concentration (CPV)
Pérovskite	20–25 (%)	Faible	Recherche, applications futures
Organique	5–10 (%)	Très faible	Capteurs, dispositifs souples

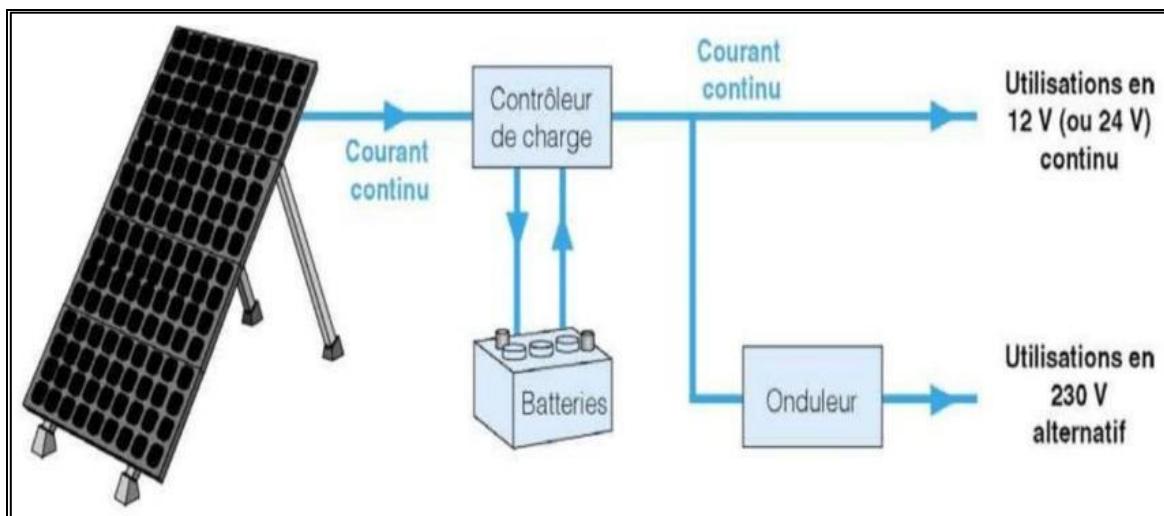
Tableau I.2 : différents types des cellules photovoltaïques [13]

			
Silicium polycristallin	Silicium monocristallin	Silicium amorphe	Pérovskite

I.6 Différents système photovoltaïque

I.6.1 Système photovoltaïque autonome [14]

Un système PV autonome est un système photovoltaïque qui opère de manière indépendante, sans être connecté au réseau électrique. Il alimente des charges passives telles que des lampes ou des moteurs, sans nécessiter d'autres sources d'énergie. Ce type de système est principalement utilisé dans des endroits isolés ou éloignés du réseau électrique, où les besoins en énergie sont relativement faibles, généralement moins de 10kWc. Pour fonctionner pendant les périodes sans soleil, telles que la nuit ou les jours nuageux, les systèmes autonomes font généralement appel à des batteries ou à d'autres moyens de stockage d'énergie. Ils sont couramment employés pour alimenter des maisons isolées, des installations en milieu insulaire ou montagneux, ainsi que pour des applications telles que la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

**Figure I.9 :** Système photovoltaïque autonome [14].

I.6.2 Système photovoltaïque connectée au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau électrique. Les panneaux solaires sont généralement connectés en série pour former des "strings", qui sont ensuite reliés à un onduleur. L'onduleur a pour fonction de convertir le courant continu provenant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est sélectionné en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs "strings" [15]. Lorsque la consommation locale dépasse la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau électrique. En revanche, si la production excède la consommation locale, l'énergie excédentaire est injectée dans le réseau public, contribuant ainsi à l'alimentation des consommateurs environnants.

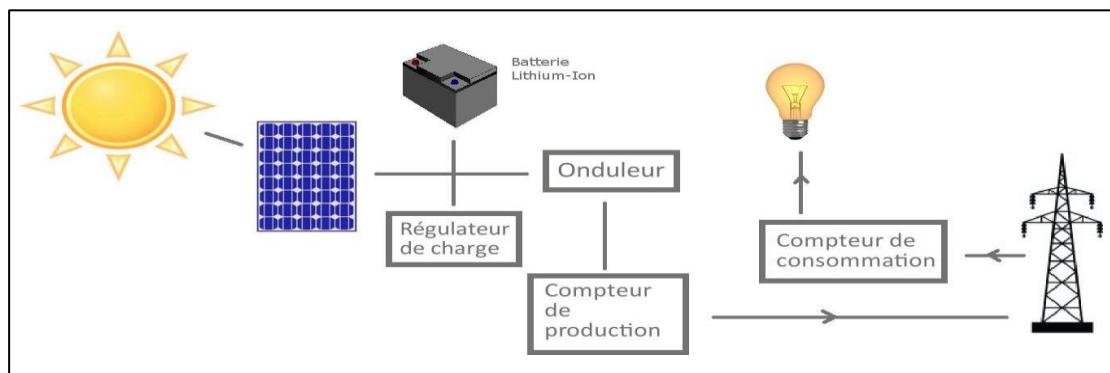


Figure I.10 : Schéma d'une installation photovoltaïque connectée au réseau [15].

I.7 Défauts liées aux panneaux PV

- Défaut de mismatch et l'effet d'ombrage ;
- Défaut de revêtement anti -reflet (ARC) ;
- Fissures dans les cellules ;
- Délaminage ;
- Les points chauds ou Hot-spots ;
- Salissure (pollution, sable, neige).

I.8 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque

a) Avantages [16]

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

b) Inconvénients [16]

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art sur les systèmes photovoltaïques a été présenté.

D'abord nous avons discuté sur les énergies renouvelables en générale et la possibilité de convertir le rayonnement solaire en électricité, grâce à l'énergie photovoltaïque. Ensuite nous avons parlé sur la photopile. Le fonctionnement d'une cellule solaire a été défini, nous avons cité les caractéristiques de la cellule et les différents paramétrés.

Dans la deuxième partie, nous avons parlé sur la mise en série ou en parallèle des cellules PV qui engendre divers problèmes de déséquilibre qui peuvent être extrêmement préjudiciables si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement. Nous avons également présenté l'influence des différents paramètres extérieurs (température, l'éclairement) et nous remarquons que le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec température.

Dans ce qui suit, nous la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque sera faite.

Chapitre II

*Modélisation et simulation d'un
Panneau PV : sain et avec ombrage*

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque en état sain et sous différentes conditions d'ombrage. Le modèle électrique utilisé est basé sur l'approche à une diode, implémenté sous MATLAB/Simulink. L'étude permet d'analyser l'impact de l'irradiance non uniforme sur les performances du module photovoltaïque PV, notamment sur les courbes I_{pv} - V_{pv} et P_{pv} - V_{pv} . En présence d'ombrage, le comportement du panneau devient non linéaire, avec apparition de plusieurs points de puissance maximale. Pour améliorer le rendement énergétique, la technique MPPT de type Perturbation et Observation (P&O) est intégrée. Cette méthode permet d'ajuster dynamiquement le point de fonctionnement du système.

II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour modéliser un générateur photovoltaïque, il est essentiel de déterminer au préalable son circuit électrique équivalent. Plusieurs modèles mathématiques ont été développés afin de reproduire la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire ou d'un module photovoltaïque [17]. Ces modèles se distinguent par leur méthode de calcul, leur niveau de précision ainsi que par le nombre de paramètres utilisés. Dans le cadre de ce travail, nous avons opté pour le modèle à une diode, largement reconnu pour sa précision satisfaisante et sa simplicité de mise en œuvre [18]. Ce modèle est représenté par le schéma équivalent illustré dans la figure II.1.

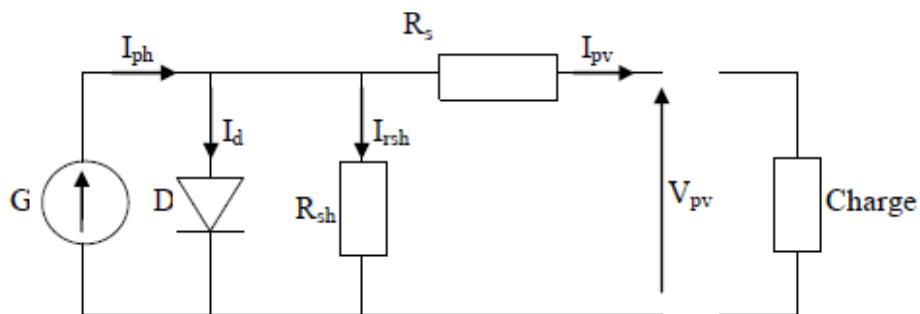


Figure II.1 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

G : Source de courant qui modélise la conversion de flux lumineux en énergie électrique ;

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule ;

R_s : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours ;

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens ;

Nous obtenons alors l'équation du courant pour un module photovoltaïque déduite du schéma électrique équivalent de la figure III.3:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (\text{II.1})$$

I_{pv} : Le courant délivré par le module ;

I_{ph} : Le photo-courant ;

I_d : Courant de diode ;

I_{rsh} : Le courant shunt ;

Le modèle utilisé est le modèle à une diode [18], le courant photovoltaïque est donné par :

$$I_{pv} = I_{sc}(1 - K_1(\exp(K_2 V_{pv}^m) - 1)) \quad (\text{II.2})$$

Dans cette équation, le courant (I) dépend des paramètres $K1$, $K2$, m et de la tension aux bornes du générateur PV.

Les coefficients $K2$, $K3$ et $K4$ sont donnés par les équations suivantes :

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (\text{II.3})$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{cc}(1 + K_1) - I_{ppm}}{K_1 I_{cc}} \right] \quad (\text{II.4})$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_1}{K_1} \right] \quad (\text{II.5})$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{ppm}}{V_{co}} \right]} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$K_1 = 0.01175;$$

I_{ppm} : Courant au point de puissance maximal [A] ;

V_{ppm} : Tension au point de puissance maximal [V] ;

I_{cc} : Courant de court circuit [A] ;

V_{co} : Tension en circuit ouvert [V].

Il est à noter que l'équation (II.2) est applicable seulement dans les conditions standard de fonctionnement ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$). Quand la température et l'ensoleillement changent, le courant et la tension photovoltaïque changent selon les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{II.7})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{cc,stc} \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (\text{II.9})$$

$$V_{nouv,pv} = V_{pv,stc} + \Delta V_{pv} \quad (\text{II.10})$$

$$I_{nouv,pv} = I_{pv,stc} + \Delta I_{pv} \quad (\text{II.11})$$

G_{stc} , T_{stc} : Représentent respectivement le niveau d'éclairement et la température dans les conditions standards de fonctionnement ;

G, T_c : Représentent respectivement le niveau de l'éclairement et la température dans les conditions quelconques ;

ΔT_c : Représentent la variation de la température ;

$\Delta V_{pv}, \Delta I_{pv}$: Représentent respectivement la variation de la tension et du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température ;

α_{sc} : Représente le coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} [mA/°C] ;

β_{oc} : Représente le coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc} [mV /°C] ;

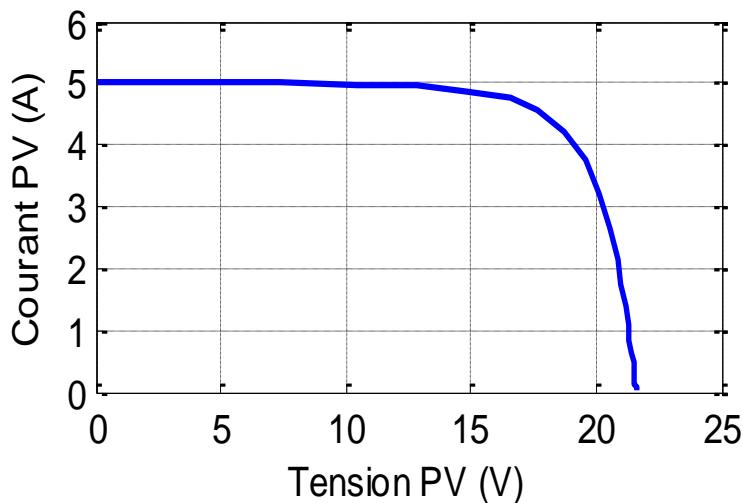
III.3 Caractéristiques des modules photovoltaïques

Le module photovoltaïque étudié est de marque Suntech. Les fabricants de panneaux solaires fournissent généralement un ensemble de paramètres électriques caractéristiques du module, tels que le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à vide (V_{co}), le courant au point de puissance maximale (I_m) et la tension correspondante (V_m). Ces données sont spécifiées dans des conditions standard de test (STC), correspondant à une irradiation de **1000 W/m²**, une température de **25 °C** et un spectre AM 1.5. Le tableau (II.1) présente les principaux paramètres techniques du module photovoltaïque tels que fournis par le constructeur.

Tableau II.1 : Paramètres d'un panneau solaire Suntech existant au laboratoire LTII [19].

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_m	80W
Courant au point de puissance maximale I_m	4.65A
Tension au point de puissance maximale V_m	17.2V
Courant de court-circuit I_{cc}	5 A
Tension en circuit ouvert V_{co}	21.6V
Coefficient d'incrémentation de la tension V_{co} (β_{co})	-156 mV/°C
Coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} (α_{cc})	0.053 mA/°C

Les performances électriques d'un module photovoltaïque sont influencées de manière significative par les conditions environnementales, notamment la température et l'irradiation solaire. Les figures II.2 et II.3 illustrent respectivement les courbes caractéristiques courant-tension (I_{pv} - V_{pv}) et puissance-tension (P_{pv} - V_{pv}) du panneau solaire étudié, obtenues dans les conditions standard de fonctionnement (STC).

**Figure II.2 :** Caractéristique courant– tension d'un module photovoltaïque pour $E_s=1000$ W/m² et $T=25$ °C.

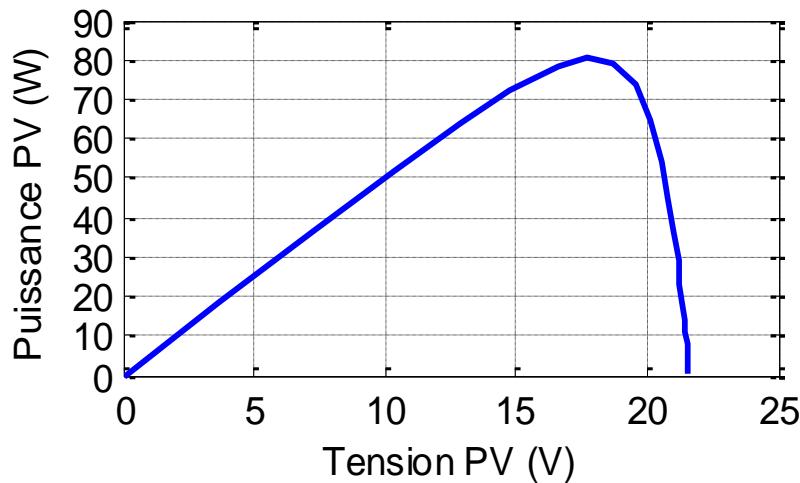


Figure II.3 : Caractéristique puissance PV –tension PV d'un module photovoltaïque pour $E_s=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

II.3.1 Influence de l'irradiation sur les paramètres des modules PV

L'élévation du niveau d'éclairement (ou d'irradiation solaire) entraîne un déplacement de la caractéristique courant-tension $I_{pv}=f(V_{pv})$ vers des valeurs de courant plus élevées. Cette variation s'explique par le fait que le courant de court-circuit dépend linéairement de l'éclairement, tandis que la tension à vide n'évolue que faiblement, suivant une relation logarithmique [20].

Les figures (II.4 et II.5) présentent respectivement l'évolution du courant (I_{pv}) et de la puissance (P_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}), pour différents niveaux d'irradiation solaire ($E_s = 200, 400, 600, 800$ et 1000 W/m^2), à température constante égale à 25°C .

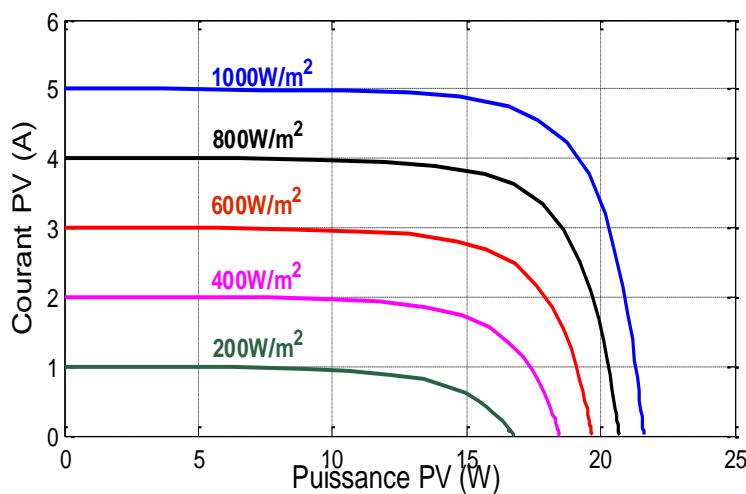


Figure II.4 : Caractéristique courant PV-tension PV pour différents éclairages solaire.

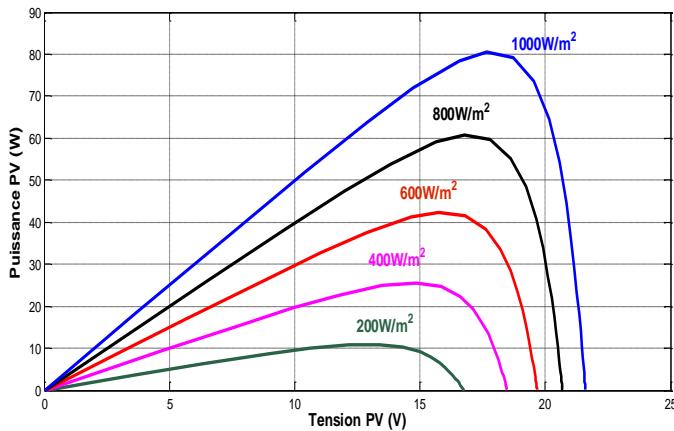


Figure II.5 : Caractéristique puissance PV-tension PV pour différents éclairements solaire

II.3.2 Influence de la température sur les paramètres des modules PV

La température a un impact significatif sur les performances des modules photovoltaïques. Lorsque la température augmente, le courant de court-circuit (I_{cc}) croît légèrement, tandis que la tension à vide (V_{co}) diminue de manière plus prononcée. Cette baisse de la tension (V_{co}) entraîne une réduction de la puissance maximale délivrée par le module. En conséquence, le rendement global du système photovoltaïque diminue avec l'élévation de la température. Cette sensibilité thermique est généralement prise en compte à travers des coefficients de température fournis par les fabricants. Il est donc essentiel de considérer cet effet dans la modélisation et le dimensionnement des installations solaires.

Les figures (II.6 et II.7) montrent bien la variation du courant (I_{pv}) ainsi que de la puissance (P_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}) pour différents niveaux de la température ($T=5^{\circ}\text{C}$, $T=15^{\circ}\text{C}$, $T=25^{\circ}\text{C}$, $T=45^{\circ}\text{C}$ et $E_s = 1000\text{W/m}^2$) :

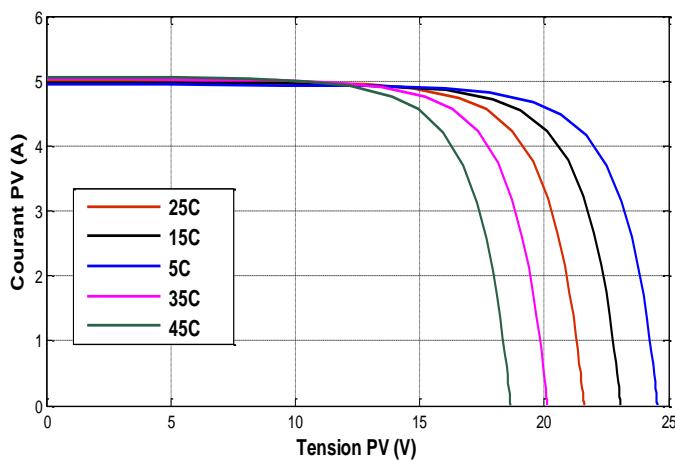


Figure II.6 : Caractéristique courant PV-tension PV pour différents niveaux de températures

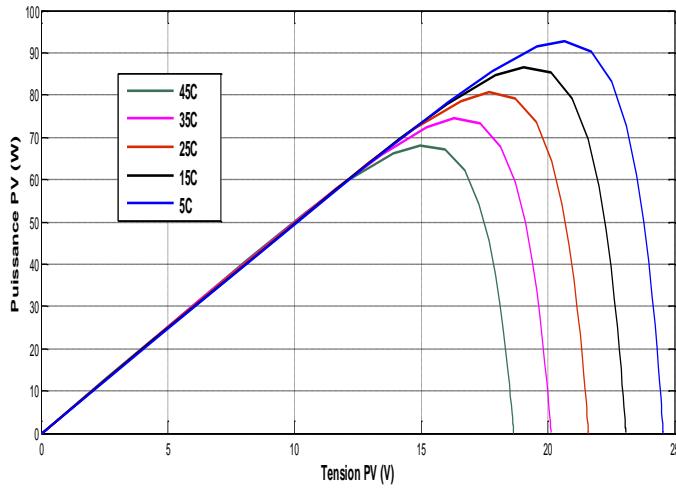


Figure II.7 : Caractéristique puissance PV-tension PV pour différents niveaux de températures.

II.4 Identification des paramètres électriques des modules photovoltaïques

La méthode la plus simple et la plus couramment utilisée pour tracer les courbes caractéristiques courant-tension ($I_{PV}-V_{PV}$) et puissance-tension ($P_{PV}-V_{PV}$) d'un module photovoltaïque consiste à connecter une résistance variable aux bornes du panneau. Cette approche permet d'observer l'évolution de la tension en fonction du courant pour différents niveaux d'irradiation solaire. Lorsque la résistance est faible, le dispositif doit être capable de supporter le courant de court-circuit du module. À l'inverse, pour atteindre les conditions proches du circuit ouvert, une valeur de résistance suffisamment élevée est requise.

La figure (II.8) présente la maquette expérimentale mise en place au sein du laboratoire LTII dans le cadre de cette étude.

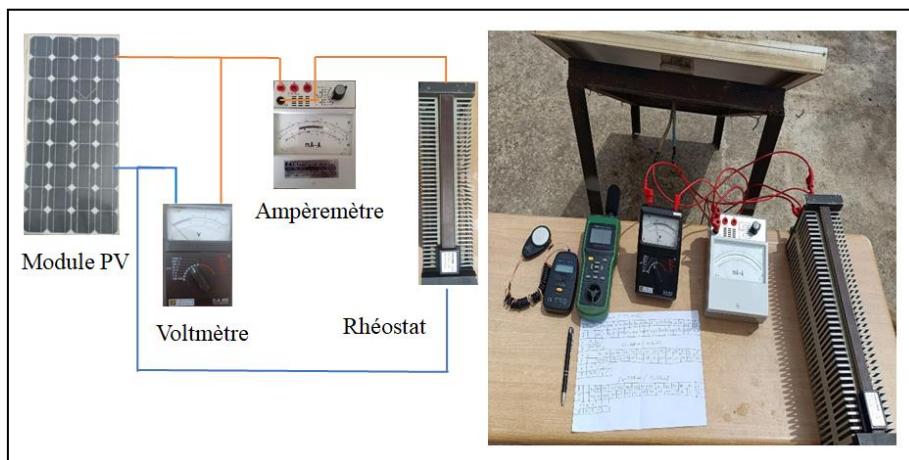


Figure II.8 : Maquette expérimentale utilisée pour le relevé des caractéristiques électriques du module PV au laboratoire LTII.

La figure II.9 présente la station météorologique mise en place pour assurer l'acquisition en temps réel des données climatiques au niveau du laboratoire LTII :

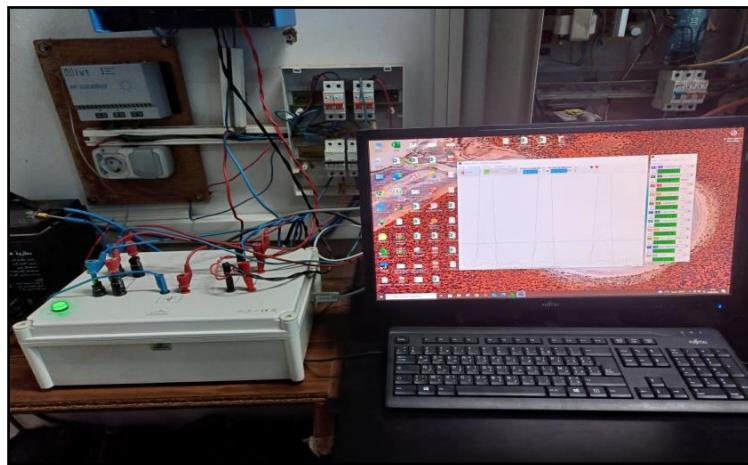


Figure II.9 : Maquette d'Acquisition de données solaires en temps réel.

Les figures (10 et 11) représentent les courbes de courant-tension et puissance-tension pour un module Suntech de 80 Wc, sous un éclairement 890 W/m^2 et température de 31.6°C

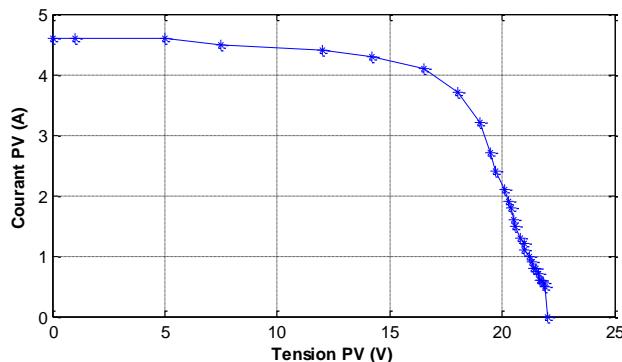


Figure II.10 : Caractéristique expérimentale courant-tension pour un $E_s = 890 \text{ W/m}^2$ et $T = 31.6^\circ\text{C}$.

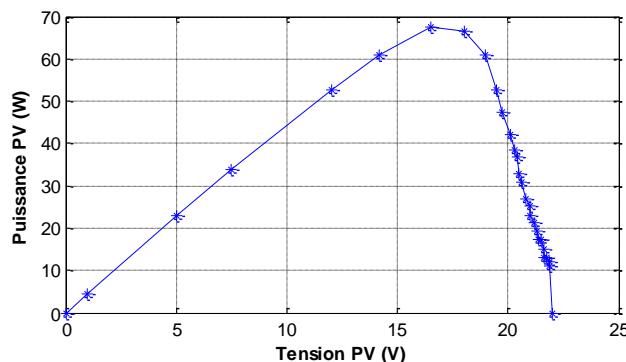


Figure II.11 : Caractéristique expérimentale puissance-tension pour un $E_s = 890 \text{ W/m}^2$ et $T = 31.6^\circ\text{C}$.

II.5 Commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)

Le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est une technique de commande utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour extraire en permanence la puissance maximale que peut fournir un panneau solaire, quelles que soient les conditions climatiques (ensoleillement, température, etc.).

Chaque panneau photovoltaïque possède un point de fonctionnement optimal (appelé Point de Puissance Maximale, ou MPPT) où le produit de la tension et du courant est maximal. Ce point varie en fonction de l'éclairement et de la température [21], [22].

Plusieurs algorithmes sont utilisés :

- Méthode de perturbation et d'observation (P&O).
- Méthode de conductance incrémentielle.
- Méthode de contrôleur MPPT basées sur la logique floue.
- Méthode de contrôleur MPPT basées sur le mode glissant.

➤ Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

Il s'agit de la méthode la plus couramment utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Elle nécessite peu de mesures et repose sur une boucle de rétroaction. Le principe consiste à perturber volontairement la tension aux bornes du panneau photovoltaïque (en l'augmentant ou en la diminuant d'une valeur constante C) puis à comparer la puissance obtenue avec celle mesurée avant la perturbation. Si cette modification entraîne une augmentation de la puissance, la perturbation suivante est effectuée dans le même sens. En revanche, si la puissance diminue, la perturbation est inversée. Cette logique permet au système de converger progressivement vers le point de puissance maximale [21],[23].

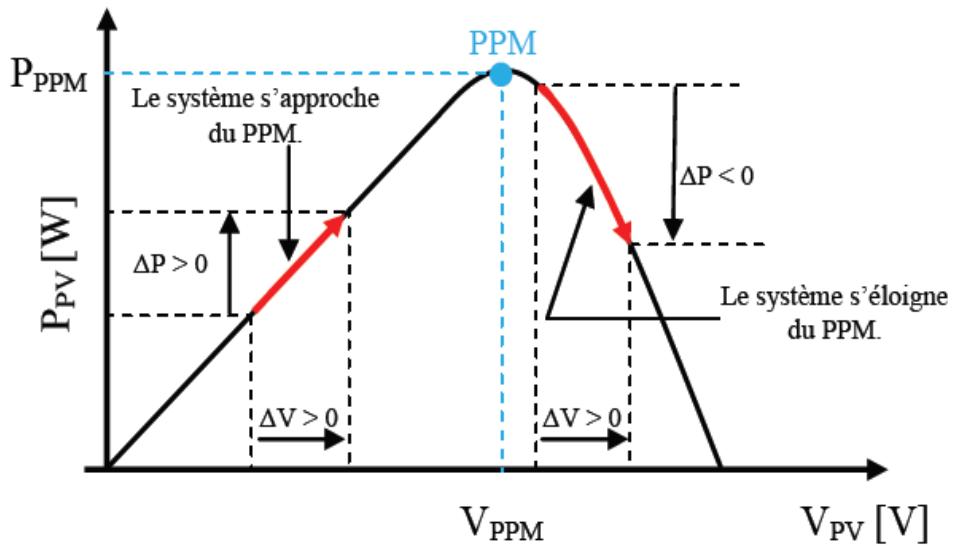


Figure II.12 : Caractéristique P_{PV} (V_{PV}) d'un panneau solaire.

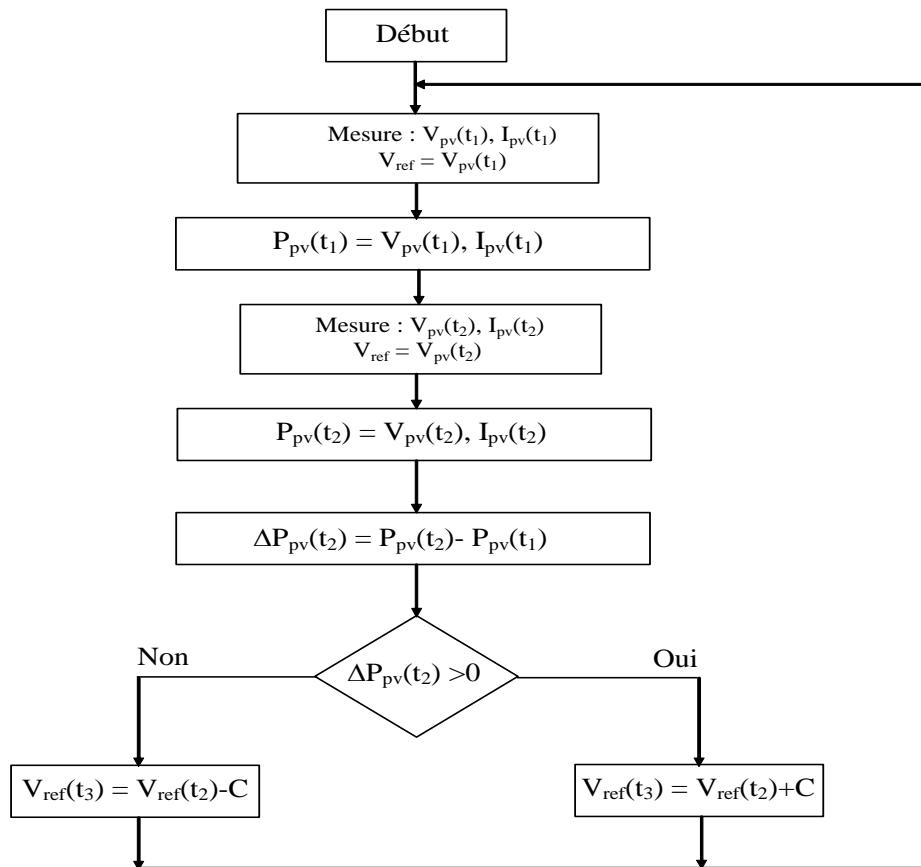


Figure II.13 : Organigramme de la méthode perturbation et observation [23].

➤ Résultats de simulation de la PO

Les figures (II.14, II.15, II.16 et II.17) présentent les résultats issus de la simulation de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O), appliqué à un panneau photovoltaïque de type Suntech de 80 W_c. Cette simulation a été conduite en considérant différentes conditions d'éclairement solaire ($E_s = 200, 400, 600, 800$ et 1000 W/m^2) ainsi que trois niveaux de température ($T = 0^\circ\text{C}, 5^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}$ et 45°C).

Le choix de l'algorithme P&O s'explique par sa large utilisation dans le suivi du point de puissance maximale (MPPT), en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son efficacité acceptable dans diverses conditions d'exploitation. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, et les performances du système sous différentes conditions climatiques sont illustrées dans les figures mentionnées.

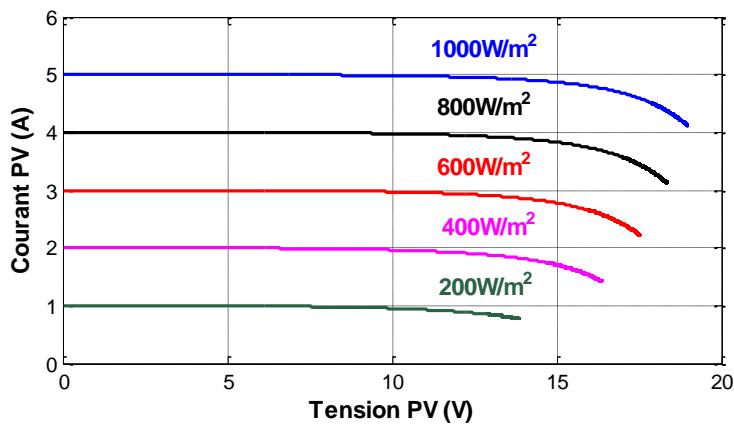


Figure II.14 : Caractéristique $I_{\text{pv}}-V_{\text{pv}}$ pour différents éclairages solaires avec la réponse de l'algorithme (P&O).

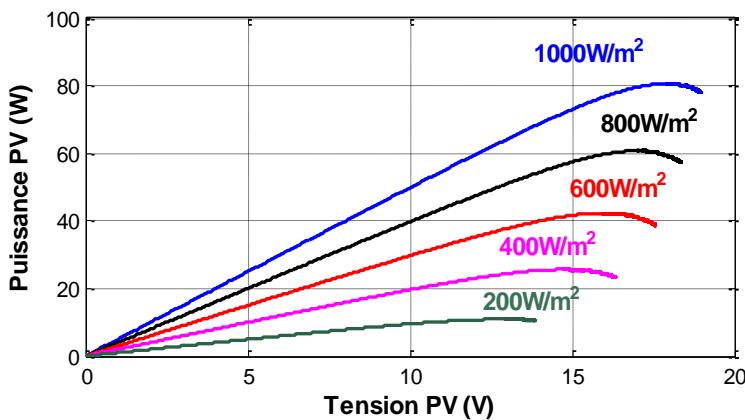


Figure II.15 : Caractéristique $P_{\text{pv}}-V_{\text{pv}}$ pour différents éclairages solaires avec la réponse de l'algorithme (P&O).

On remarque que l'augmentation de l'éclairement entraîne une élévation significative de la puissance maximale extraite du panneau. Ceci est cohérent avec le comportement physique d'une cellule photovoltaïque, dont le courant généré est directement proportionnel au niveau d'irradiation solaire.

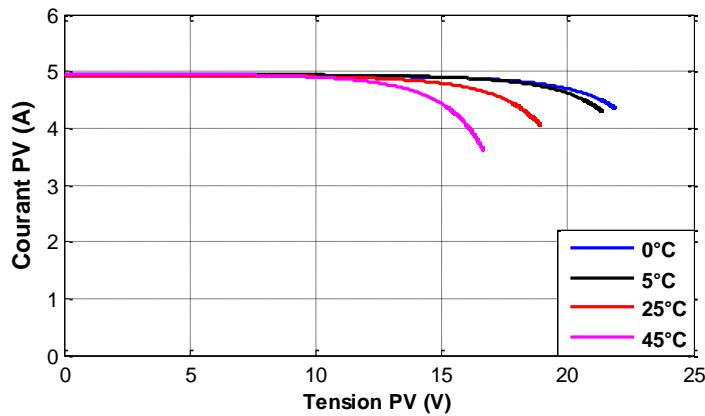


Figure II.16 : Caractéristique I_{pv} - V_{pv} pour différents Températures avec la réponse de l'algorithme (P&O).

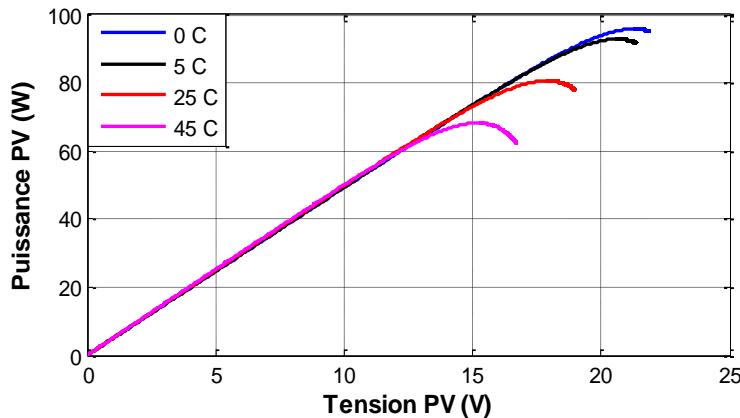


Figure II.17 : Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour différents Températures avec la réponse de l'algorithme (P&O).

L'élévation de la température a un effet négatif sur la puissance maximale. En effet, une hausse de température réduit la tension en circuit ouvert du panneau, ce qui entraîne une baisse du rendement global du module. Cette influence est d'autant plus marquée à forte température, comme le montrent les courbes simulées.

II.6 Modélisation d'un panneau PV sous effet d'Ombrage

II.6.1 Types d'ombrage [24]

Ombrage partiel fixe (panneaux proches de structures).

Ombrage dynamique (passage de nuages, salissures...).

II.6.2 Conséquences d'ombrage [25]

L'ombrage, même partiel, peut avoir des effets significatifs sur les performances et la durabilité d'un système photovoltaïque. Parmi les principales conséquences, on peut citer

- **Réduction du courant de certaines cellules** : L'irradiation partielle d'une cellule entraîne une baisse de son courant, ce qui peut limiter le courant de l'ensemble du module si les cellules sont connectées en série.
- **Déséquilibre de fonctionnement dans les chaînes de cellules** : Les cellules ombragées agissent comme des résistances dans le circuit, provoquant un déséquilibre de fonctionnement et une diminution de la puissance globale délivrée par le module ou la chaîne de modules.
- **Apparition de points de fonctionnement multiples (MPPT multiples)** : L'ombrage modifie la courbe courant PV-tension PV (I_{pv} - V_{pv}) du générateur photovoltaïque, entraînant la présence de plusieurs points de puissance maximale (Maximum Power Point), rendant la tâche du suiveur MPPT plus complexe.
- **Risque de point chaud ("hot-spot")** : Une cellule fortement ombragée peut être traversée en sens inverse par le courant des cellules voisines, provoquant une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Ce phénomène peut endommager localement la cellule ou même entraîner sa destruction à long terme.
- **Modélisation :**

La modélisation d'un module photovoltaïque sous ombrage dans Matlab/Simulink consiste à utiliser un modèle électrique basé sur l'équation du courant de la cellule. On intègre les effets de l'irradiation non uniforme sur les cellules ou chaînes de cellules. L'ombrage est simulé en affectant différentes valeurs d'ensoleillement aux sous-modules [26].

La figure II.18 présente le programme de modélisation d'un module photovoltaïque soumis à l'effet d'ombrage, réalisé sous Matlab/Simulink.

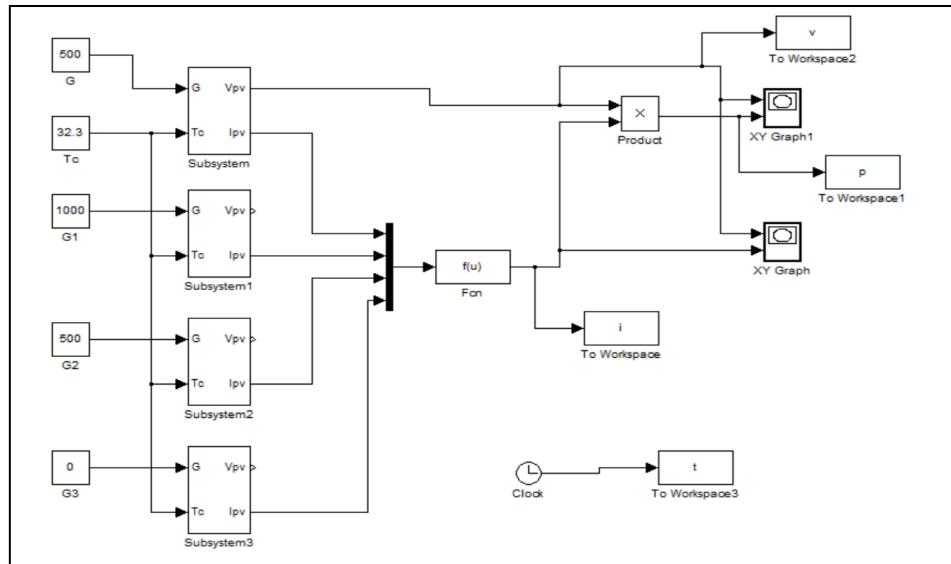


Figure II.18 : Programme sous Matlab/Simulink.

II.6.3 Résultats obtenus sous Matlab-Simulink

Dans le cadre de notre étude, le système a été modélisé selon les configurations illustrées dans la figure ci-dessous :

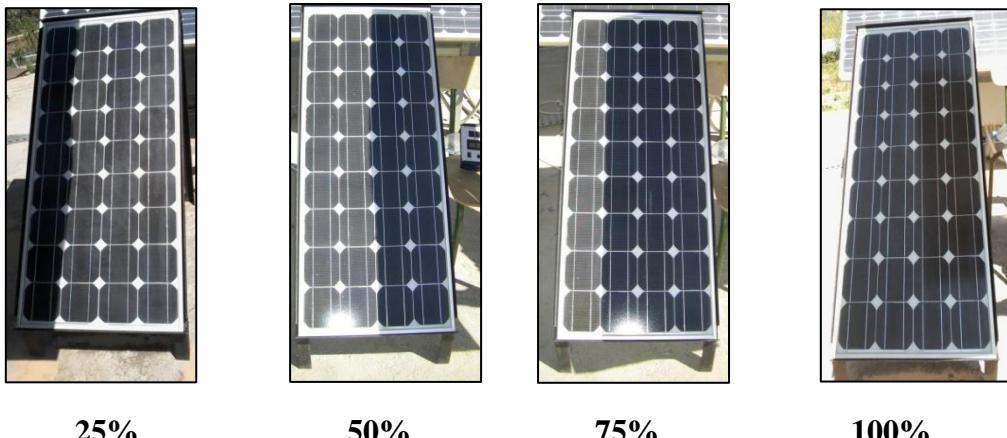


Figure II.19 : Photos de différentes configurations d'ombrage.

Les résultats obtenus sous Matlab/Simulink pour un éclairement solaire de 550 W/m^2 et $T = 28^\circ\text{C}$ ces valeurs sont enregistrer au niveau du laboratoire LTII Sont représenté sur les figures ci-dessous :

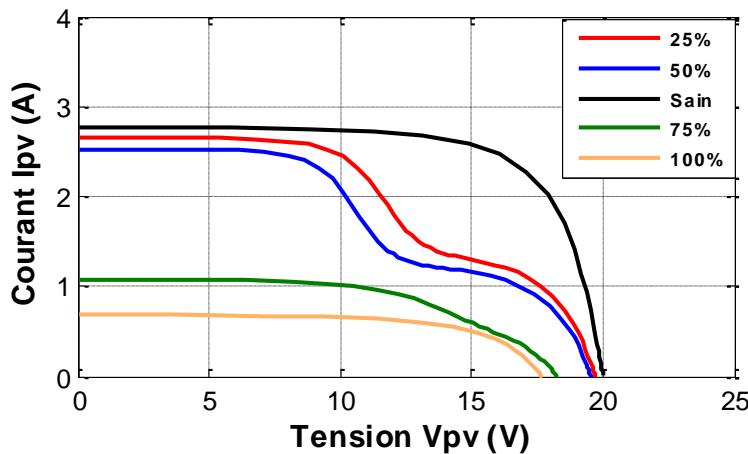


Figure II.20 : Caractéristique I_{pv} - V_{pv} pour différents niveaux d'ombrage.

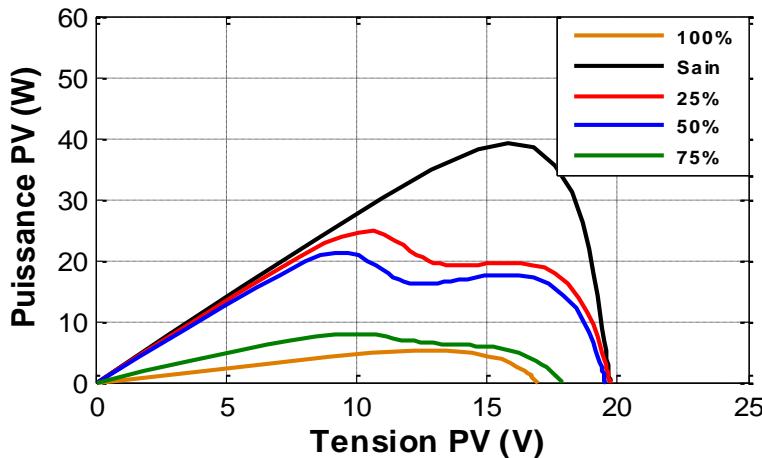


Figure II.21 : Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour différents niveaux d'ombrage.

Les Figures (II.20 et II.21) montrent une famille de caractéristiques d'un module lors de différents niveaux d'ombrage. Les bosses présentes dans ces figures sont dues au fait qu'une ou plusieurs diodes de by-pass se mettent en conduction. Selon le pourcentage d'ombrage sur la cellule, la diode de by-pass se met en conduction à différents niveaux de courant de fonctionnement.

Les équations suivantes représentent les pertes de puissance et le facteur de forme :

$$P_{pi} = P_s - P_i \quad (\text{II.12})$$

P_{pi} : Pertes de puissance (W).

P_s : Puissance du module sain (référence) (W).

P_i : Puissance du module sous ombrage (W).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (\text{II.13})$$

FF : Facteur de forme.

P_{max} : Puissance maximum du module PV (W).

I_{cc} : Courant de court-circuit (A).

V_{co} : Tension de circuit ouvert (V).

Le tableau ci-dessous récapitule les principaux paramètres affectés par le défaut d'ombrage.

Tableau II.2 : Comparaison des performances entre un module sain et avec ombrage.

Test	Puissance (W)	Perte de puissance (W)	Perte de puissance (%)	Facteur de forme (%)
Sain	39.19	00	00	70.8
25 %	24.7	14.49	36.97	47.2
50 %	21.31	17.88	45.62	43.3
75 %	7.99	31.2	79.61	40.8
100 %	5.12	34.07	86.93	64.4

Les figures suivantes illustrent les performances d'un module PV sain et avec Ombrage :

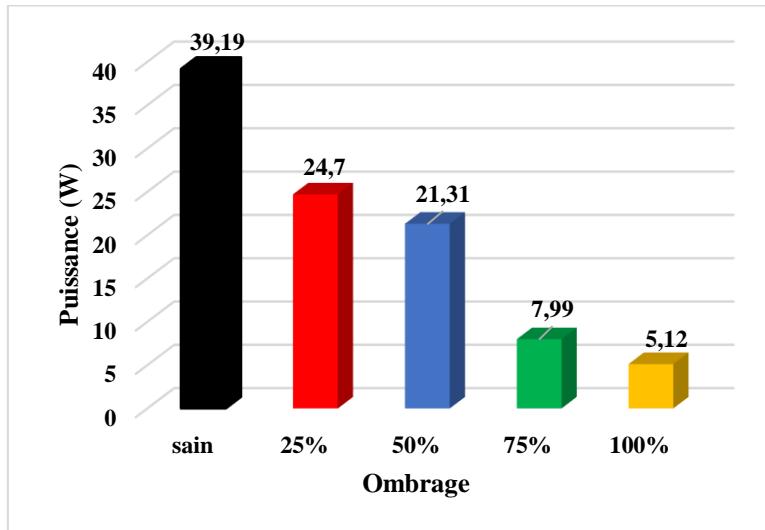


Figure II.22 : Variation des puissances selon les niveaux d'ombrage.

Dans la figure II.22, La puissance maximale générée par le module photovoltaïque diminue de manière significative avec l'augmentation du niveau d'ombrage.

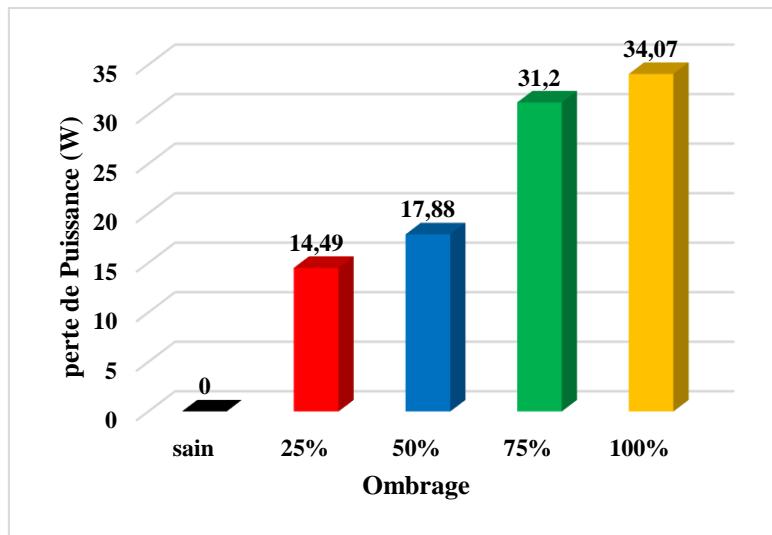


Figure II.23 : Variation des pertes de puissance en (W) selon les niveaux d'ombrage.

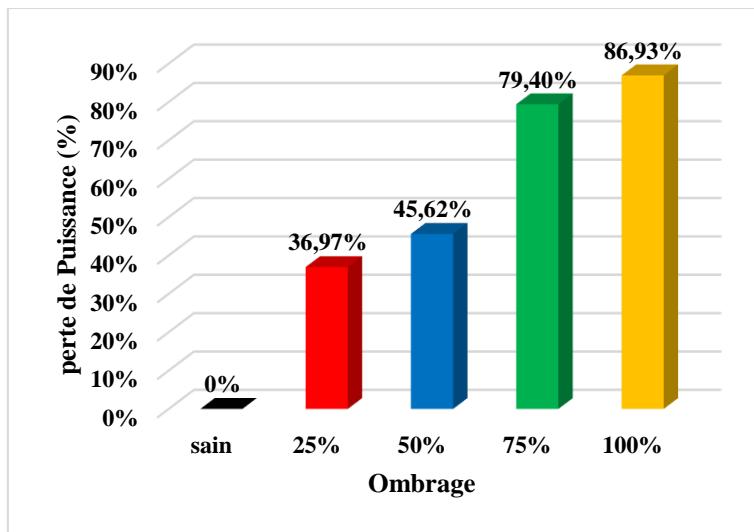


Figure II.24 : Variation des pertes de puissance en (%) selon les niveaux d'ombrage.

On peut remarquer dans les figures (II.23 et II.24), que l'ombrage entraîne une baisse progressive de la puissance produite par le module photovoltaïque. Cette perte est due à la diminution du courant généré et à l'activation des diodes de by-pass, qui limitent la contribution des cellules partiellement éclairées. Plus l'ombrage augmente, plus la puissance maximale diminue. La courbe $P_{pv}-V_{pv}$ devient de plus en plus déformée, réduisant l'efficacité globale. Sous ombrage total, la perte devient significative.

La figure II.25 présente une comparaison du facteur de forme (FF) entre les différents niveaux d'ombrage, pour un ensoleillement et température fixe :

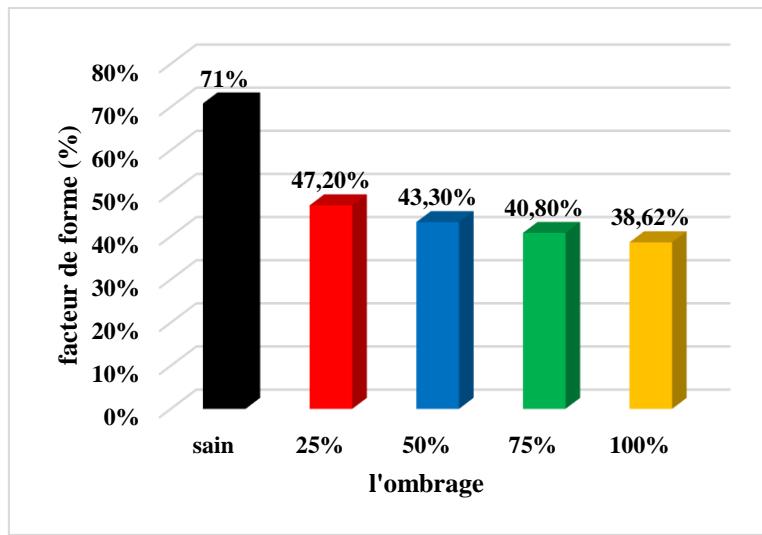


Figure II.25 : Variation du facteur de forme (FF) selon les niveaux d'ombrage.

Le facteur de forme (FF) enregistre une diminution notable à mesure que le niveau d'ombrage augmente. Cette évolution traduit une dégradation progressive de la qualité de la caractéristique courant-tension ($I_{pv}-V_{pv}$), notamment par la réduction de la zone rectangulaire dite « utile », correspondant à la puissance maximale que peut délivrer le module. Cette altération est directement liée aux déséquilibres de fonctionnement entre les cellules.

II.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté la modélisation et la simulation d'un module photovoltaïque en état sain et sous différents niveaux d'ombrage à l'aide du modèle à une diode sous MATLAB/Simulink. Les résultats ont montré que l'ombrage réduit significativement le courant, la puissance maximale et le facteur de forme du module. L'apparition de points de puissance multiples complique le suivi du MPPT. La méthode MPPT de type Perturbation et Observation (P&O) s'est révélée efficace pour ajuster dynamiquement le point de fonctionnement. L'étude confirme que l'ombrage, même partiel, impacte fortement le rendement énergétique. Il est donc essentiel de le prendre en compte lors de la conception et du pilotage des systèmes PV.

Chapitre III

*Étude, conception et expérimentation
d'un système autonome de nettoyage
pour panneaux PV*

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la mise en œuvre pratique d'un système de surveillance de l'encrassement des panneaux photovoltaïques à l'aide de capteurs connectés à une carte de gestion. L'encrassement, causé principalement par la poussière, les pollens ou d'autres particules atmosphériques, affecte significativement le rendement énergétique des installations photovoltaïques. Une surveillance en temps réel de ce phénomène est donc essentielle pour assurer un fonctionnement optimal du système et planifier des opérations de nettoyage efficaces.

III.2 Définition de l'encrassement [27]

L'encrassement d'un panneau photovoltaïque désigne l'accumulation de saletés, poussières, polluants, sable, excréments d'oiseaux, ou autres particules à la surface du module, notamment sur la vitre protectrice.

Cela réduit la transmission de la lumière solaire vers les cellules photovoltaïques, entraînant une diminution de l'irradiation reçue, donc des performances électriques du panneau.

Conséquences de l'encrassement :

- Baisse du courant de court-circuit (I_{cc}) → perte de puissance ;
- Formation d'ombres localisées → échauffement, points chauds ;
- Dégradation à long terme si l'encrassement est permanent.

La figure suivante illustre un générateur PV encrassé :



Figure III.1: Exemple d'encrassement d'un générateur PV [28].

III.3 Système de surveillance et de nettoyage proposé

Le système de surveillance et de nettoyage proposé est constitué de cinq modules photovoltaïques de 80 W, il comprend un régulateur de charge, une batterie pour le stockage de l'énergie, ainsi qu'une pompe à courant continu connectée à un réservoir d'eau. L'ensemble est piloté par un gestionnaire qui contrôle automatiquement les cycles de nettoyage. Ce système vise à maintenir la performance des modules en réduisant l'enrassement.

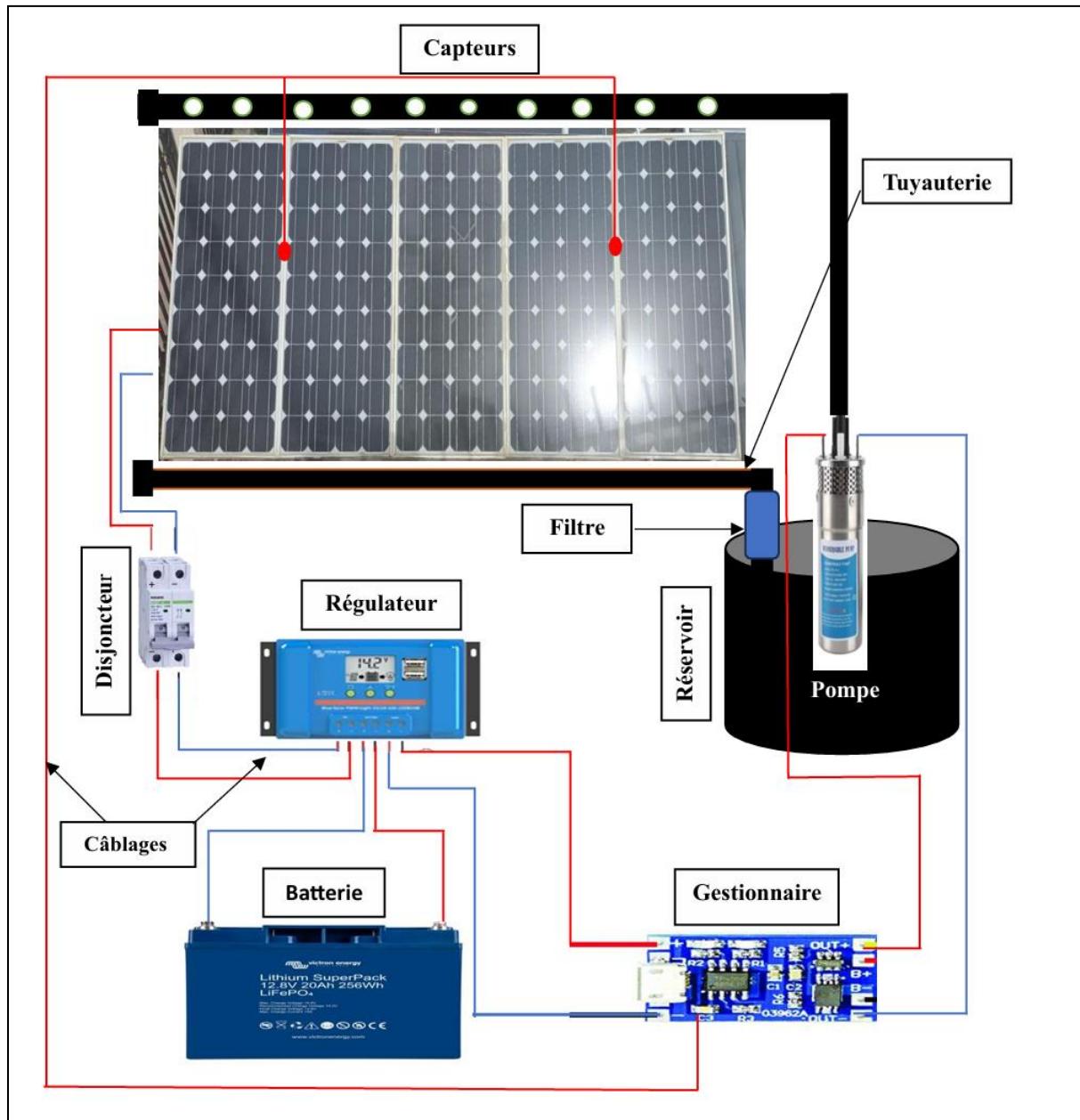


Figure III.2: Schéma du système proposé

III.4 Composants principaux du système étudié

III.4.1 Générateur PV

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé cinq panneaux photovoltaïques identiques, chacun d'une puissance maximale de 80W. Les principales caractéristiques électriques de ses panneaux (voir le tableau II.1)

La figure suivante représente les panneaux installés au niveau du Laboratoire LTII à l'université de Bejaia.



Figure III.3: Générateur PV

III.4.2 Régulateur de charge solaire PWM

Le régulateur de charge solaire de type PWM (Pulse Width Modulation) joue un rôle essentiel dans la gestion de l'énergie entre les modules photovoltaïques, la batterie et les charges connectées. Il assure la protection de la batterie contre les surtensions, les décharges profondes et les retours de courant. Son principe de fonctionnement repose sur la modulation de la largeur des impulsions, permettant d'ajuster dynamiquement la charge selon l'état de la batterie afin d'en prolonger la durée de vie [29].



Figure III.4: Régulateur de charge solaire PWM.

III.4.3 Batterie Solaire [30]

La batterie solaire constitue un élément clé dans un système photovoltaïque autonome, en permettant de stocker l'énergie générée pendant les heures d'ensoleillement afin de la restituer ultérieurement, notamment durant la nuit ou en période de faible irradiation. La batterie intégrée au système présente une tension nominale de 12 V.



Figure III.5: Batterie.

III.4.4 Pompe DC

La pompe utilisée dans ce système est une pompe à courant continu (DC) de 12 V avec une puissance nominale de 60 W. Elle est conçue pour fonctionner directement à partir d'une source solaire ou d'une batterie, ce qui la rend idéale pour les systèmes autonomes. Elle permet le pompage d'eau pour le nettoyage des panneaux photovoltaïques avec un débit modéré. Son fonctionnement est silencieux, efficace, et adapté aux applications à faible consommation d'énergie [31].



Figure III.6: Pompe DC 12V.

III.4.5 Module ESP32 [32]

L'ESP32 est un microcontrôleur à double cœur. Il est conçu pour offrir une connectivité Wi-Fi et Bluetooth (classique et BLE) sur une seule puce, tout en combinant de hautes performances, une faible consommation d'énergie et une grande richesse d'interfaces (ADC: Convertisseur analogique-numérique, PWM: Modulation de largeur d'impulsion, SPI : interface périphérique série, UART: émetteur-récepteur asynchrone universel, etc.).

Les caractéristiques techniques de la carte ESP32 sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III.1: Caractéristiques techniques de la carte ESP32 [32]

Caractéristiques	Details
Microprocesseur	Dual-core Tensilica LX6 32 bits
Fréquence d'horloge	Jusqu'à 240 MHz
Mémoire RAM	Environ 520 Ko SRAM interne
Mémoire Flash	Jusqu'à 4 Mo (selon le module utilisé)
Wi-Fi	802.11 b/g/n (2,4 GHz), support du mode station et point d'accès
Bluetooth	Bluetooth v4.2 + BLE (Bluetooth Low Energy)
Tension d'alimentation	3.3 V (souvent régulé depuis 5V via un régulateur sur les modules)
Nombre d'entrées/sorties (GPIO)	Environ 34 broches numériques, dont plusieurs multifonctions
Convertisseurs ADC	12 entrées analogiques (ADC 12 bits)
Convertisseurs DAC	2 sorties DAC (Digital to Analog Converter) intégrées
Interfaces de communication	UART, SPI, I2C, I2S,
PWM	Disponible sur la majorité des broches numériques
Capteurs intégrés	Capteur de température, capteur tactile capacitif
Consommation en veille	Très faible (mode Deep Sleep ≈ 10 µA)
Boîtier courant	Module ESP-WROOM-32 ou ESP32 DevKit v1
Programmation	Compatible avec Arduino IDE, MicroPython, ESP-IDF

La figure suivante illustre les compositions de la carte EPS32 :

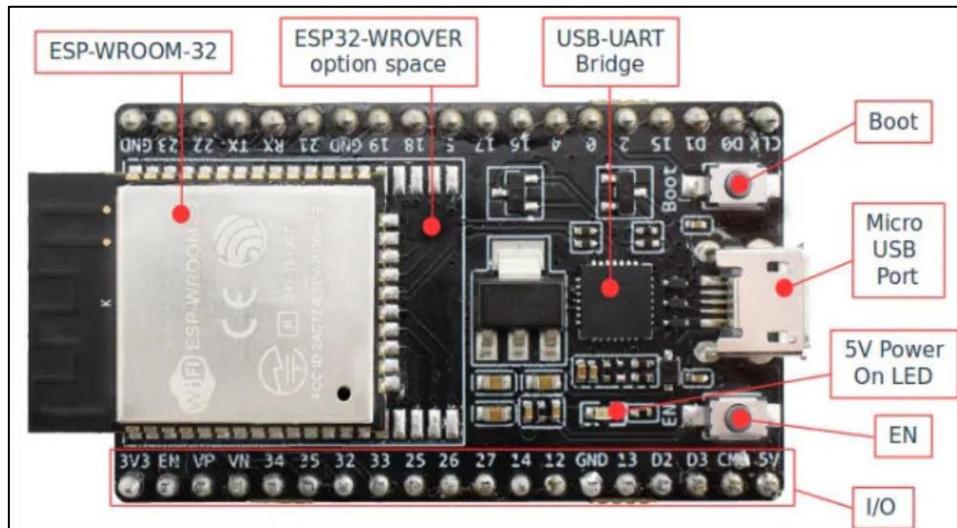


Figure III.7: Composition du module ESP 32 [32].

III.4.6 Relais SRD-05VDC-SL-C [33]

Le relais Songle SRD-05VDC-SL-C est un composant électromécanique couramment utilisé pour le contrôle de charges en courant alternatif ou continu à partir de signaux de faible tension. Il fonctionne sous une tension d'activation de 5 V en courant continu (DC) et peut commuter des charges allant jusqu'à 10 A sous 250 V AC ou 30 V DC. Ce relais est souvent employé dans les systèmes domotiques et embarqués, comme ceux utilisant l'ESP32, pour activer des pompes, moteurs ou éclairages à distance.

La figure suivante représente la photo du relais utilisé :

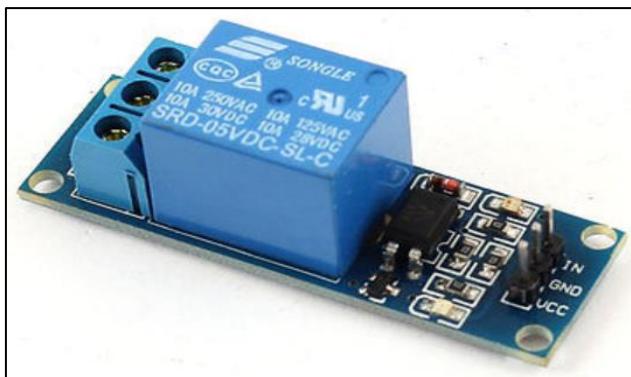


Figure III.8: Relais Songle SRD-05VDC-SL-C.

Les caractéristiques techniques du relais Songle SRD-5VDC-SL-C est représenté dans le tableau suivant :

Tableau III. 2 : Caractéristiques techniques du relais Songle SRD-05VDC-SL-C [33].

Paramètre	Valeur
Tension de commande (bobine)	5 V DC
Courant de la bobine	Environ 70 mA
Type de relais	SPDT (1 voie, inverseur)
Capacité de commutation (AC)	10 A / 250 V AC
Capacité de commutation (DC)	10 A / 30 V DC
Résistance de la bobine	Environ 70 Ω
Temps d'activation	~10 ms
Temps de relâchement	~5 ms
Isolation entre bobine et contact	$\geq 1000 \text{ M}\Omega$ (à 500 V DC)
Température de fonctionnement	-40 °C à +85 °C

III.4.7 Photorésistance 5528 [34]

Dans le cadre de notre système de surveillance et de nettoyage des panneaux photovoltaïques, une photorésistance de type 5528 a été utilisée pour la mesure de l'intensité lumineuse incidente. Ce capteur permet d'évaluer en temps réel le niveau d'ensoleillement, condition essentielle pour déclencher ou ajuster les cycles de nettoyage. Sa simplicité d'intégration et sa sensibilité à la variation de la lumière en font un choix adapté aux systèmes embarqués autonomes.

L'image ci-dessus représente une photorésistance (LDR) de type 5528, utilisée pour mesurer l'intensité lumineuse dans le système.

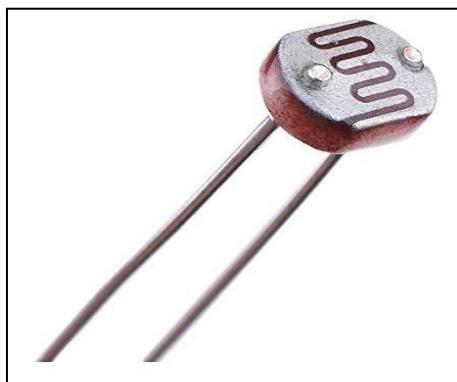


Figure III.9: Photorésistance (LDR) de type 5528 [34].

III.4.8 Réservoir d'eau

Le réservoir d'eau utilisé dans notre étude sert à alimenter la pompe DC pour le nettoyage automatique des panneaux photovoltaïques. Il est dimensionné en fonction du débit de la pompe et de la fréquence des cycles de nettoyage. Son rôle est d'assurer une autonomie suffisante du système sans intervention manuelle fréquente.



Figure III.10: Réservoir d'eau.

III.5 Réalisation de la maquette expérimentale

Après l'étape d'analyse, la réalisation et la validation du circuit électronique ont été effectuées à l'aide du logiciel de simulation Proteus :

➤ Logiciel Proteus

Proteus est un logiciel de conception électronique utilisé pour la simulation de circuits, la création de schémas électroniques et la conception de circuits imprimés (PCB). Il est particulièrement apprécié dans le domaine de l'électronique embarquée, car il permet de simuler le fonctionnement de microcontrôleurs comme les PIC, AVR ou Arduino. Grâce à sa bibliothèque étendue de composants, les utilisateurs peuvent tester virtuellement leurs projets avant la réalisation physique. Proteus offre aussi une interface intuitive et des outils puissants pour le routage automatique ou manuel des PCB. Il est largement utilisé dans l'enseignement, la recherche et le prototypage. Enfin, sa fonction de simulation en temps réel facilite le débogage et la validation des circuits [35].

Chapitre III Étude, conception et expérimentation d'un système autonome de nettoyage pour panneaux PV

La figure suivante présente la simulation fonctionnelle du projet réalisée à l'aide du logiciel Proteus, illustrant le comportement du circuit dans un environnement virtuel.

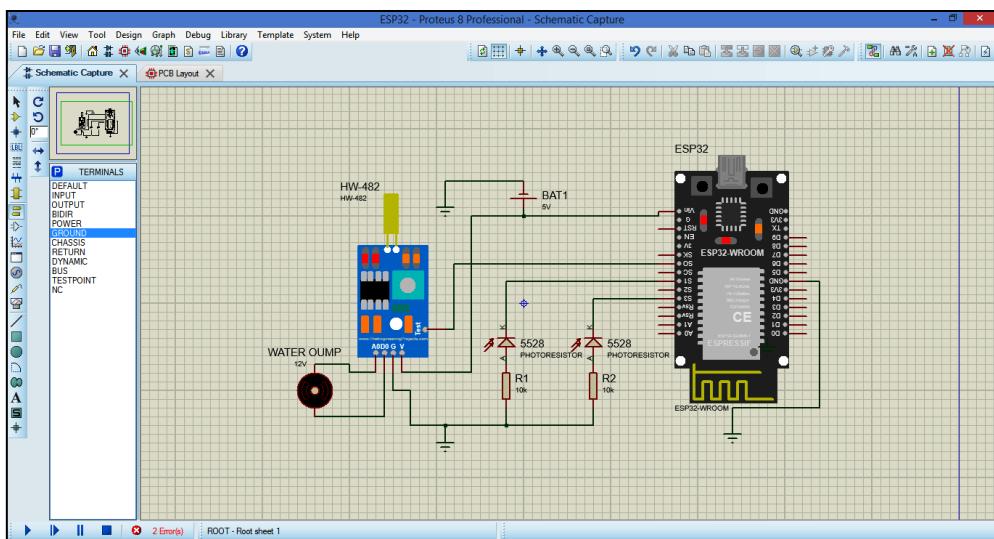


Figure III.11: Projet réalisé sous logiciel Proteus.

Les figures ci-dessous illustrent une section représentative des cartes conçues.



Figure III.12: Carte réalisée.

La figure suivante illustre la carte réalisée pour assurer la surveillance du système de nettoyage des panneaux photovoltaïques.

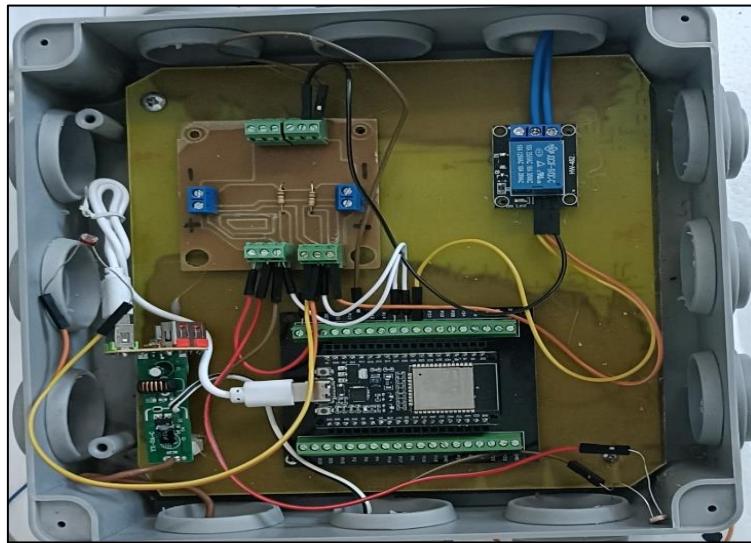


Figure III.13: Carte globale de gestion.

III.6 Tests Expérimentaux

Dans le cadre d'une étude comparative des performances en conditions réelles, des essais expérimentaux ont été menés au laboratoire LTII de l'Université de Béjaïa sur un générateur photovoltaïque de 400 Wc. L'objectif était d'évaluer l'impact de l'enrassement en comparant les performances du générateur avant et après nettoyage, sous différents niveaux d'éclairement solaire et de température. Les conditions climatiques ont été enregistrées à l'aide d'une station météorologique.

La figure III.17 présente l'état du générateur photovoltaïque dans des conditions d'enrassement.



Figure III.14: Générateur PV encrassé.

La figure III.18 illustre l'état du générateur photovoltaïque après l'opération de nettoyage, mettant en évidence l'amélioration de sa surface exposée.



Figure III.15: Générateur PV nettoyé.

Les figures suivantes présentent l'ensemble des résultats obtenus à la fois par simulation et par expérimentation

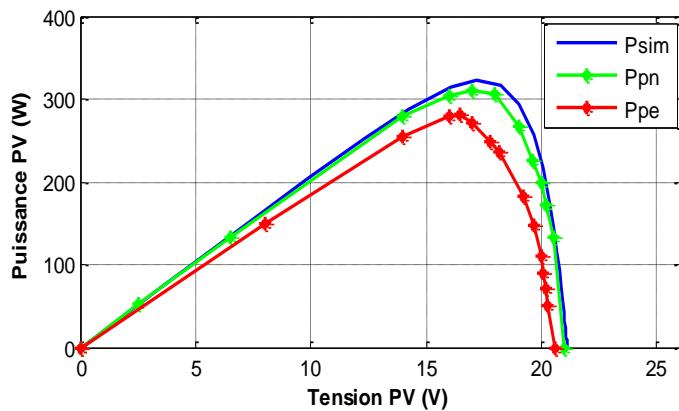


Figure III.16: Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour un $E_s = 780 \text{ W/m}^2$ et une $T = 27^\circ\text{C}$.

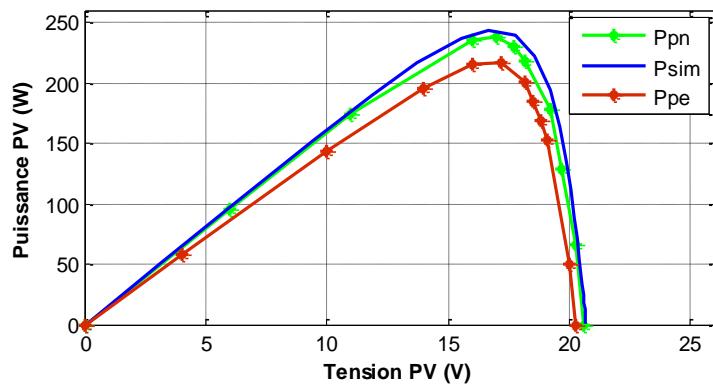


Figure III.17: Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour un $E_s = 630 \text{ W/m}^2$ et une $T = 23^\circ\text{C}$.

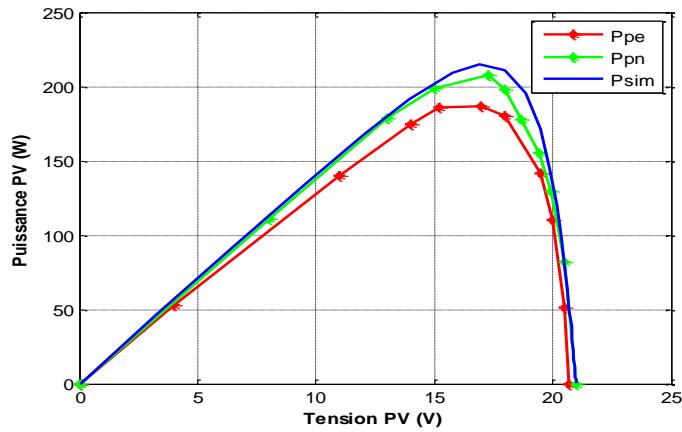


Figure III.18: Caractéristique $P_{\text{pv}}\text{-}V_{\text{pv}}$ pour un $E_s = 563 \text{ W/m}^2$ et une $T = 25^\circ\text{C}$.

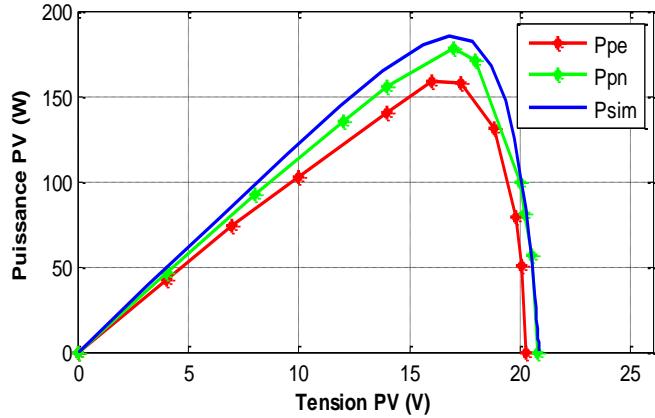


Figure III.19: Caractéristique $P_{\text{pv}}\text{-}V_{\text{pv}}$ pour un $E_s = 470 \text{ W/m}^2$ et une $T = 24^\circ\text{C}$.

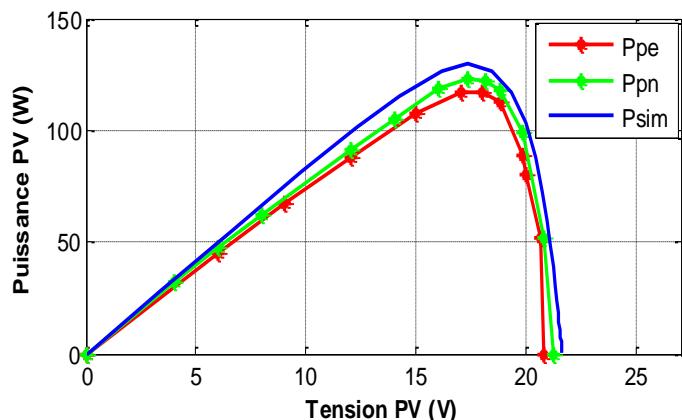


Figure III.20: Caractéristique $P_{\text{pv}}\text{-}V_{\text{pv}}$ pour un $E_s = 340 \text{ W/m}^2$ et une $T = 21^\circ\text{C}$.

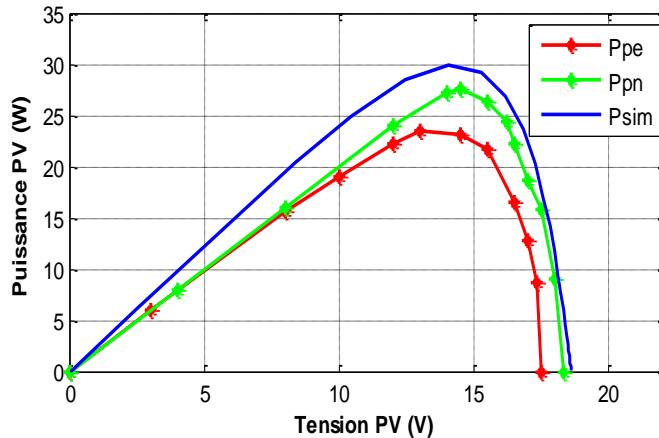


Figure III.21: Caractéristique P_{pv} - V_{pv} pour un $E_s = 100W/m^2$ et une $T = 23 ^\circ C$.

Les figures comparant les performances mesurées d'un générateur photovoltaïque encrassé et après nettoyage, dans des conditions similaires d'ensoleillement et de température, montrent une cohérence générale des résultats. Toutefois, elles révèlent également une augmentation significative des pertes de puissance avec l'élévation de l'irradiation solaire. Les écarts constatés soulignent l'importance du nettoyage régulier des générateurs photovoltaïques, en particulier dans les régions fortement ensoleillées, où l'accumulation de salissures peut impacter considérablement le rendement énergétique.

➤ Calcule des pertes de puissance

$$P_p = P_{PN} - P_{PE} \quad (\text{III.1})$$

P_p : Pertes de puissance (W).

P_{PN} : Puissance d'un générateur photovoltaïque nettoyé (W).

P_{PE} : Puissance d'un générateur photovoltaïque encrassé (W).

P_{sim} : Puissance d'un générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink (W).

FF : Facteur de forme (voir l'équation II.13)

Le tableau III.3 présente une synthèse structurée des résultats obtenus, permettant d'en dégager les principales tendances et performances observées.

Tableau III.3 : Comparaison des performances du Générateur PV.

Tests	Puissances (W)	Pertes de puissance (W)	Pertes de puissance (%)	FF (%)
Test 1 Es=780W/m²	$P_{sim1}=321.9$	29.8	9.6	73.7
	$P_{PN1}=310.3$			70.35
	$P_{PE1}=280.5$			72.5
Test 2 Es=630W/m²	$P_{sim2}=243$	21	8.82	73.1
	$P_{PN2}=238$			72.2
	$P_{PE2}=217$			73.7
Test 3 Es=563W/m²	$P_{sim3}=214.9$	20.6	9.92	71.9
	$P_{PN3}=207.6$			70.6
	$P_{PE3}=187$			68.17
Test 4 Es=470W/m²	$P_{sim4}=185$	20.1	11.29	72
	$P_{PN4}=178.5$			73.9
	$P_{PE4}=158.4$			73.6
Test 5 Es=340W/m²	$P_{sim5}=129.4$	5.53	4.5	71.5
	$P_{PN5}=122.83$			72.4
	$P_{PE5}=117.3$			75.2
Test 6 Es=100W/m²	$P_{sim6}=29.87$	4.15	15.06	66.3
	$P_{PN6}=27.55$			66.9
	$P_{PE6}=23.4$			66.8

La figure suivante illustre l'impact de l'enrassement sur les performances d'un générateur photovoltaïque, en comparant les puissances mesurées avant et après nettoyage, sous différents niveaux d'irradiation solaire. Ces résultats ont été obtenus à partir d'essais expérimentaux réalisés au laboratoire LTII de l'Université de Béjaïa.

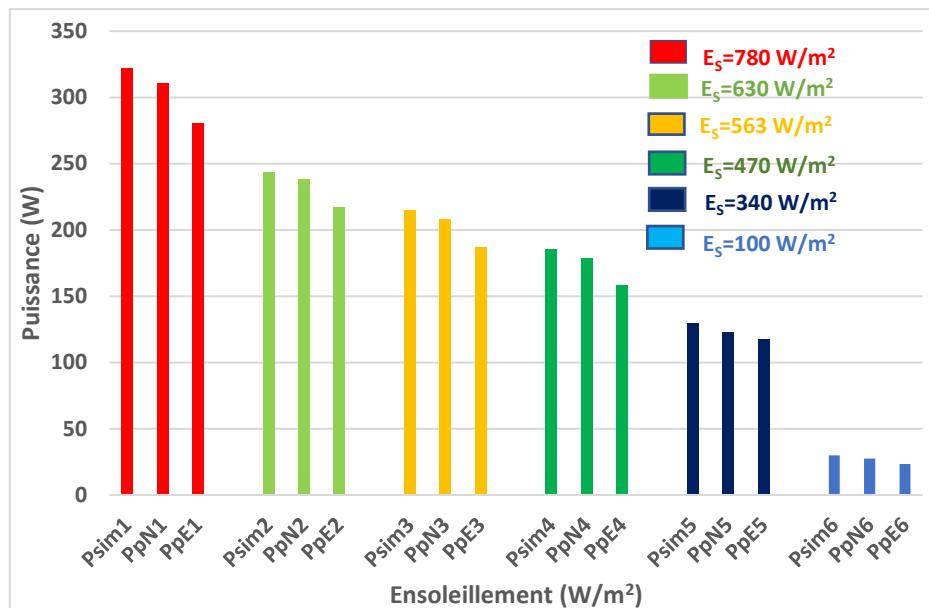


Figure III.22: Comparaison entre les puissances pour différents niveaux E_s .

La figure III.25 montre une comparaison entre les puissances issues de la simulation (P_{sim}), des mesures après nettoyage (P_{pn}) et avec encrassement (P_{pe}) pour différents niveaux d'ensoleillement. On observe une diminution progressive de la puissance générée lorsque l'ensoleillement diminue, ce qui est cohérent avec le comportement des générateurs photovoltaïques.

L'écart observé entre les puissances simulées, normalisées et expérimentales met en évidence l'importance du nettoyage des générateurs photovoltaïques, en soulignant son impact significatif sur l'amélioration de leurs performances énergétiques.

La figure suivante représente les pertes de puissance d'un générateur photovoltaïque encrassé et après nettoyage pour différents niveaux d'ensoleillement.

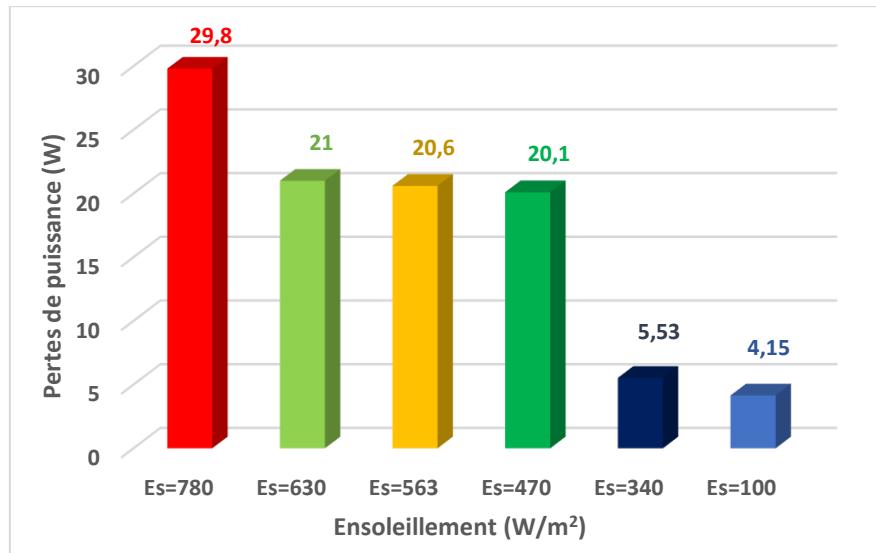


Figure III.23: Comparaison entre les pertes de puissance pour différents niveaux E_s .

Les résultats présentés dans la figure III.23 montre une évolution significative des pertes en fonction de l'ensoleillement. Il est clairement observé que les pertes augmentent avec l'élévation de l'irradiation solaire, ce qui traduit l'effet aggravant de l'encrassement des modules photovoltaïques.

La figure suivante illustre la comparaison entre les facteurs de formes (FF) obtenues expérimentalement et par simulation pour les puissances P_{sim} , P_{PN} et P_{PE} :

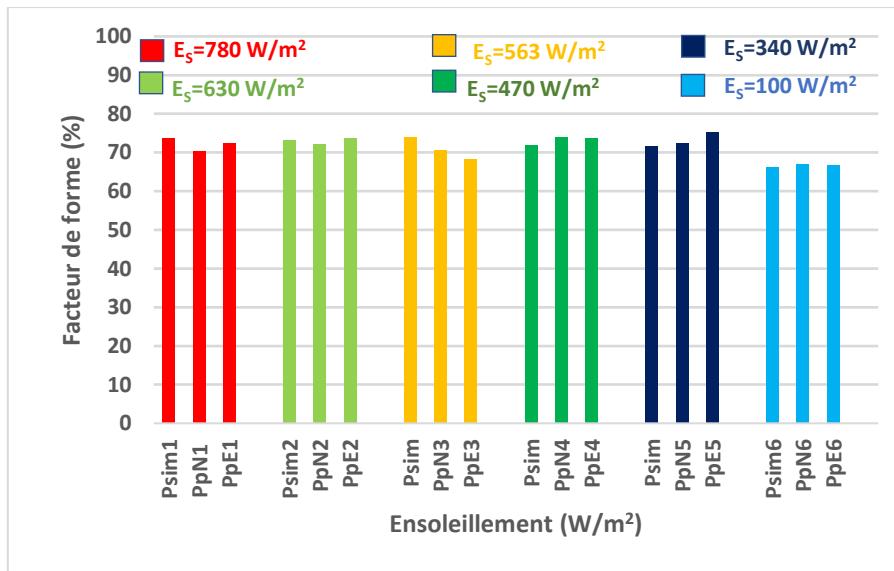


Figure III.24: Comparaison entre les facteurs de forme pour différentes puissances et niveaux

La figure III.24 présente une comparaison entre les facteurs de forme issus des simulations et ceux obtenus expérimentalement. Il ressort que le facteur de forme simulé augmente avec l'ensoleillement, traduisant une meilleure performance théorique. Toutefois, les valeurs expérimentales restent systématiquement inférieures, ce qui peut être attribué aux pertes réelles, notamment dues à l'encrassement ou aux défauts de vieillissement.

➤ Tests sur le vieillissement des PV

Les tests de vieillissement des panneaux photovoltaïques visent à évaluer la dégradation de leurs performances au fil du temps sous l'effet de facteurs environnementaux tels que l'irradiation, la température, l'humidité et les cycles thermiques. Ces essais permettent de simuler des conditions d'utilisation prolongée en laboratoire. Ils sont essentiels pour estimer la durée de vie et la fiabilité des modules PV.

Le tableau III.4 présente une comparaison entre les puissances délivrées par le générateur photovoltaïque après nettoyage et celles obtenues par simulation.

Tableau III.4 : Comparaison des performances mesurées et simulées des modules PV.

TESTS	Puissance (W)	Perte de puissance(W)
Test 1 Es=780W/m²	$P_{sim1}=321.9$	11.6
	$P_{PN1}=310.3$	
Test 2 Es=630W/m²	$P_{sim2}=246$	8
	$P_{PN2}=238$	
Test3 Es=563W/m²	$P_{sim3}=214.9$	7.3
	$P_{PN3}=207.6$	
Test 4 Es=470W/m²	$P_{sim4}=185.5$	7
	$P_{PN4}=178.5$	
Test 5 Es=340W/m²	$P_{sim5}=129.4$	6.57
	$P_{PN5}=122.83$	
Test 6 Es=100W/m²	$P_{sim6}=29.87$	2.32
	$P_{PN6}=27.55$	

La figure suivante illustre les pertes de puissance en fonction de l'ensoleillement :

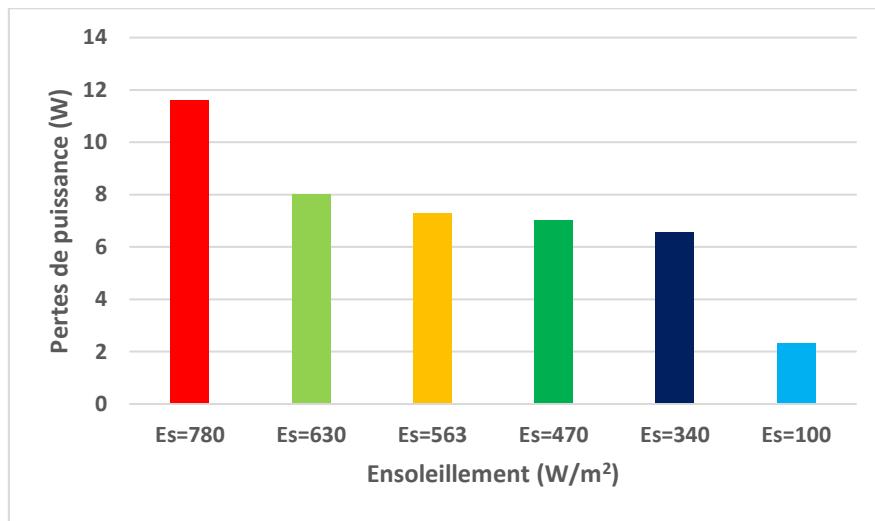


Figure III.25: Comparaison entre les pertes de puissance due au vieillissement pour différents ensoleillement.

La figure illustre une augmentation progressive des pertes de puissance avec l'élévation du niveau d'ensoleillement. Cette tendance s'explique par le fait que, sous un fort ensoleillement, les écarts entre la puissance attendue (Après nettoyage) et celle avec encrassement. Ces pertes sont en grande partie attribuées à l'encrassement des modules photovoltaïques, qui réduit leur capacité à capter efficacement le rayonnement solaire, surtout lorsque l'intensité lumineuse est élevée. Cela souligne l'importance de l'entretien régulier des installations pour préserver leurs performances.

III.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'étude, la conception et l'expérimentation d'un système autonome de nettoyage pour générateurs photovoltaïques, dans le but de remédier aux pertes de performance dues à l'encrassement. À travers des essais réalisés au laboratoire LTII, il a été démontré que l'accumulation de poussières et autres particules entraîne une dégradation significative des puissances délivrées, particulièrement sous fort ensoleillement. Les comparaisons entre les données expérimentales, simulées et normalisées ont révélé l'importance d'un nettoyage régulier pour maintenir un rendement optimal. Le système proposé, basé sur une gestion automatique pilotée par ESP32, s'est révélé efficace pour limiter les pertes et améliorer la fiabilité des installations PV en conditions réelles.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail, plusieurs objectifs ont été atteints. Une étude approfondie des systèmes photovoltaïques a permis de présenter leurs principes fondamentaux, leurs technologies et les contraintes qui limitent leurs performances. La modélisation et simulation d'un panneau photovoltaïque sous différentes conditions d'ombrage ont mis en évidence l'impact négatif de l'irradiation partielle sur les caractéristiques électriques du module, notamment la réduction du courant de court-circuit, la baisse de la puissance maximale et l'apparition de points de puissance multiples. La méthode MPPT de type Perturbation et Observation s'est révélée efficace pour ajuster dynamiquement le point de fonctionnement, même en présence de ces perturbations.

Dans la continuité, un système autonome de nettoyage pour panneaux photovoltaïques a été conçu et expérimenté, intégrant des capteurs et un module de commande intelligent basé sur une carte ESP32. Les essais réalisés au laboratoire LTII de l'Université de Béjaïa ont démontré que le nettoyage des panneaux améliore significativement la puissance produite et réduit les pertes dues à l'enrassement, en particulier dans les régions exposées à des conditions climatiques poussiéreuses.

Ce travail ouvre des perspectives intéressantes pour la gestion intelligente des systèmes photovoltaïques en milieu isolé et pour le développement de solutions d'entretien automatisées adaptées aux conditions algériennes. Des améliorations futures pourraient concerner l'optimisation de l'algorithme MPPT en présence d'ombrage partiel et la miniaturisation du système de nettoyage pour des applications modulaires.

Bibliographie

- [1] M. Angel Cid Pastor «Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electriques» Thèse Doctorat Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse_29 septembre 2006.
- [2] L. Bun « Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV » Thèse Doctorat DE Université de Grenoble_04/11/2011.
- [3] F.Slama, “ Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique”, mémoire de magister, Université de Sétif, Janvier 2012.
- [4] A. Maafi, « A survey on PV activities in Algeria ». Renewable Energy, 2000.
- [5] D. t.-C. E. n°03, 1, 2000.
- [6] P. Cumunel, Braun.J-P, Labouret. A, ‘cellules solaires’, édition dunod Paris 2001
- [7] SOCOMEC, Cahier technique photovoltaïque 2010.
- [8] A. Laboure, M. Villoz « Énergie solaire photovoltaïque », Environnement et Sécurité, Tome III, Paris, 2006, pp. 01-48
- [9] A. Laboure, M. Villoz « Energie solaire photovoltaïque (Le manuel du professionnel) », édition DUNOD, Paris (France), août 2003
- [10] O. Gergoud «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur», Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan France, 2002.
- [11] C. Hanene, C.E. Baghana. « Installation d'une centrale photovoltaïque dans le réseau d'Adrar (P. I.A.T) ». Mémoire de master électrotechnique, université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2019.
- [12] ExaCompre, « Quels sont les différents types de cellules photovoltaïque, » [En ligne]. Available:
<https://sites.uclouvain.be/elee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaïques/Cellule/Modele.htm>. [Accès le 29 mai 2024].
- [13] « Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques, » 9 août 2010. [En ligne]. [Accès le 29 Mai 2024].
- [14] Notes de cours, B.Azoui, Master Energies renouvelables , Batna, 2019/2020.
- [15] R. Merahi, « Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques, » Mémoire de Magister, université de Annaba, 2010.
- [16] D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff « photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools» horizon Canada, 2001.

- [17] Ressources naturelles du canada, « Les systèmes photovoltaïques (guide de l'acheteur) », division de l'énergie renouvelable et électrique, n° M92-28/2001F, Ottawa, Canada, 2002.
- [18] N. Mezzai «Etude d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien destiné aux systèmes de pompage» Thèse de doctorat , Université de Bejaia, 2015.
- [19] L. Lazari, N.Mebarki « Étude d'un système photovoltaïque » mémoire Master, Université de Bejaia année 2014.
- [20] R. Maoudedj « Applications de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah » Mémoire de Magister université de Tlemcen, Algérie 2005.
- [21] H.G. Arantzamendi « Etude des structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux micros réseaux », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [22] Z. Roumila « Commande d'un système d'énergie hybride (Photovoltaïque - éoliendiesel) », Mémoire de Magister de l'université A.MIRA Bejaia, Algérie, 2009
- [23] M. Belhamel, S. Moussa, A. Kaabeche « Production d'Electricité au Moyen d'un Système Hybride (Eolien- Photovoltaïque -Diesel) », Revue des énergies renouvelables, pp.49-54, 2002.
- [24] A. Daira , M.A. Benzaoui «Effet de l'ombrage partiel sur les différentes configurations d'un champ photovoltaïque», Mémoire de Master, Université de M'sila. (2023)
- [25] K. Ayache «Amélioration de la productivité et de la fiabilité d'un système photovoltaïque sous ombrage partiel», Doctorat, École de technologie supérieure, Montréal. (2020)
- [26] M. Mamoune, Étude de l'effet de l'ombrage sur un système photovoltaïque – simulation sous Matlab/Simulink (Mémoire de fin d'études). Université Blida 1, 2018.

- [27] M. Coello, L. Boyle, (2019) : Modèle simple pour prédire l'encrassement des panneaux photovoltaïques en série temporelle. IEEE Journal of Photovoltaics, volume 9, numéro 5, p. 1382-1387. DOI : 10.1109/JPHOTOV.2019.2919628. [Lien](#)
- [28] Estimer les pertes dues à l'encrassement des PV pour réduire le risque solaire avec Lien : [SolarAnywhere - SolarAnywhere](#).
- [29] S. Zaamta, A. Dib « Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs » mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi – Oum El Bouaghi, année 2008
- [30] F.Z. Saadat, C. Koumad, « Modélisation et simulation de l'état de santé des batteries solaires », Université Saad Dahlab (Blida), mémoire de Master 2022.
- [31] A. Swandi, S. Rahmadhanningsih, S. Viridi, I.M. Sutjahja, « Trial of DC Submersible Pump 12 Volt 50 Watt with Solar Power and Relationship between Water Discharge and Storage Height » Journal of physical science and engineering, [Vol 6, No 2 \(2021\)](#)
- [32] R. Ammour, W.Benouh, «Réalisation de liaison WSN à base de l'ESP32 pour l'IoT», Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2021.
- [33] F. Bendjoudi, F. Lakhdari «Étude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries» Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Béjaïa, 2014.
- [34] K. Slaim, N. Kebrit « Etude et réalisation d'un robot suiveur de cible contrôlé par une Carte Arduino » mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun –Tiaret, année 2020.
- [35] S. Gomri, A. Oumhani, H.OUDIRA « Conception et réalisation des convertisseurs AC/DC à base du microcontrôleur PIC16F877A» Mémoire de master, Université de M'sila, (2021).

Résumé :

Ce travail s'intéresse à l'étude, la conception d'un système de surveillance d'encrassement des installations photovoltaïques, dans un contexte de transition énergétique vers des sources renouvelables. Il analyse l'influence et l'impact d'encrassement qui affectent les performances des modules solaires. Ce travail repose sur une approche intégrée combinant la modélisation à l'aide d'un modèle d'une seule diode, des simulations effectuées sous Matlab/Simulink, ainsi que des essais expérimentaux réalisés sous différentes conditions météorologiques, et à l'aide de logiciel Porteuse on a réalisé le maquet global de notre système associé avec le module ESP32. L'objectif est d'optimiser les performances d'installation PV en évitant les pertes dues à l'encrassement.

Mots-clés : Panneaux photovoltaïques, Encrassement, Surveillance, ESP32, Proteus, Optimisation des performances, Pertes de puissance.

Abstract :

This work focuses on the study and design of a soiling monitoring system for photovoltaic installations, in the context of the ongoing energy transition toward renewable sources. It aims to analyze the impact of soiling on the performance of solar modules. The adopted approach combines single-diode electrical modeling, simulations carried out using Matlab/Simulink, and experimental tests conducted under various weather conditions. Additionally, a complete system prototype was developed using Proteus software, integrating the ESP32 module. The main objective is to optimize the performance of photovoltaic systems by minimizing power losses caused by soiling.

Keywords : Photovoltaic panels, Soiling, Monitoring, ESP32, Proteus, Performance optimization, Power losses.

الملخص :

يركز هذا العمل على دراسة وتصميم نظام لمراقبة الاتساخ في الأنظمة الكهروضوئية، في سياق الانتقال الطاقي نحو المصادر المتجددة. يهدف إلى تحليل تأثير الاتساخ على أداء الألواح الشمسية. تعتمد المنهجية المتبعة على النمذجة الكهربائية بالإضافة إلى تجارب عملية تحت Matlab/Simulink باستخدام نموذج الدايدود الواحد، وإجراء محاكاة عبر برنامج Proteus مدمجاً مع وحدة التحكم، ظروف مناخية مختلفة. كما تم تطوير نموذج كامل للنظام باستخدام برنامج ESP32. الهدف الرئيسي هو تحسين أداء الأنظمة الكهروضوئية من خلال تقليل خسائر الطاقة الناتجة عن الاتساخ.

تحسين الأداء، خسائر الطاقة. الكلمات المفتاحية، ESP32، Proteus، الألواح الكهروضوئية، الاتساخ، المراقبة