

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

**Faculté des sciences appliquées
Département de Génie électrique**



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Présenté par :

Belkemari Abdessettar

Guesmia Mohammed Ali

Optimisation et réalisation du suivi solaire pour panneaux photovoltaïques

Soumis au jury composé de :

Mr. Rouibah Tahar
Mr. Kouras Sid Ali
Mr. Benbouza Naima

MCB
MAA
MCB

Président
Encadreur/rapporteur
Examineur

UKM Ouargla
UKM Ouargla
UKM Ouargla

Année universitaire : 2025 / 2026

Remerciements

Nous remercions Dieu Tout-Puissant pour la force, la patience et la volonté qu'il nous a accordées durant la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons nos sincères remerciements à notre encadrant, Monsieur **Kouras Sid Ali**, pour son accompagnement, ses conseils précieux et sa disponibilité.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de Génie Électrique pour la qualité de leur enseignement et leur soutien.

Notre gratitude va aussi à nos familles, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien moral.

Enfin, nous remercions nos amis et camarades pour leur aide, leur encouragement et les moments partagés tout au long de ce parcours universitaire

Dédicaces

À celle qui a semé en moi les valeurs, m'a offert son amour et n'a jamais cessé de prier pour moi, À ma chère mère...

À celui qui m'a appris la persévérance et m'a toujours soutenu dans les moments difficiles, À mon père bien-aimé...

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur encouragement et leur présence constante...

À mes enseignants, pour leurs efforts, leur patience et leur accompagnement précieux...

À mes amis et camarades, avec qui j'ai partagé de beaux souvenirs tout au long de ce parcours...

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail...

Je vous dédie humblement ce mémoire, en témoignage de ma reconnaissance et de mon respect.

Belkemari Abdessettar

Dédicaces

À celle qui a semé en moi les valeurs, m'a offert son amour et n'a jamais cessé de prier pour moi, À ma chère mère...

À celui qui m'a appris la persévérance et m'a toujours soutenu dans les moments difficiles, À mon père bien-aimé...

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur encouragement et leur présence constante...

À mes enseignants, pour leurs efforts, leur patience et leur accompagnement précieux...

À mes amis et camarades, avec qui j'ai partagé de beaux souvenirs tout au long de ce parcours...

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail...

Je vous dédie humblement ce mémoire, en témoignage de ma reconnaissance et de mon respect.

Guesmia Mohammed Ali

Résumé :

Ce mémoire porte sur l'étude, la conception et la réalisation d'un système de suivi solaire à deux axes destiné aux panneaux photovoltaïques. L'objectif principal de ce travail est d'optimiser l'orientation des panneaux afin de maximiser la captation du rayonnement solaire tout au long de la journée et d'améliorer ainsi la production d'énergie électrique.

Le système développé repose sur l'utilisation de capteurs de lumière permettant de détecter la position du soleil et de commander automatiquement les mouvements des servomoteurs selon les axes d'azimut et d'élévation. Une étude théorique ainsi qu'une phase de réalisation pratique ont été menées afin d'évaluer les performances du système.

Les résultats obtenus montrent une amélioration notable de la production énergétique par rapport à un panneau photovoltaïque fixe, ce qui confirme l'intérêt de l'utilisation des systèmes de suivi solaire dans les installations photovoltaïques.

Mots-clés : énergie solaire, photovoltaïque, suivi solaire, suiveur à deux axes, capteurs LDR, servomoteurs.

Summary :

This thesis focuses on the study, design, and implementation of a dual-axis solar tracking system for photovoltaic panels. The main objective is to optimize the orientation of the panels in order to maximize solar radiation capture throughout the day and consequently improve electrical energy production.

The developed system uses light sensors to detect the sun's position and automatically control the movement of servo motors along the azimuth and elevation axes. A theoretical study and practical implementation were carried out to evaluate the system's performance.

The obtained results show a significant improvement in energy production compared with a fixed photovoltaic panel, confirming the effectiveness of solar tracking systems in photovoltaic installations.

Keywords: solar energy, photovoltaic, solar tracking, dual-axis tracker, LDR sensors, servo motors..

الملخص :

تناول هذه المذكرة دراسة وتصميم وإنجاز نظام تتبع شمسي ثنائي المحور مخصص للألواح الشمسية الكهروضوئية، بهدف تحسين توجيهها نحو الشمس خلال مختلف ساعات النهار لزيادة كمية الإشعاع الشمسي المستقبَل وتحسين إنتاج الطاقة الكهربائية

يعتمد النظام المقترح على استخدام حساسات ضوئية للكشف عن موضع الشمس، حيث يتم التحكم آلياً في حركة اللوح الشمسي حول محورين هما المحور الأفقي والمحور العمودي، مما يسمح له بمواكبة الحركة الظاهرية للشمس في السماء وقد شملت الدراسة الجوانب النظرية المتعلقة بالطاقة الشمسية وأنظمة التتبع، إضافة إلى الجانب التطبيقي الخاص بإنجاز النموذج واختباره

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن نظام التتبع الشمسي يساهم في رفع مردودية الألواح الشمسية مقارنة بالأنظمة الثابتة، وذلك من خلال زيادة مدة التعرض المباشر لأشعة الشمس وتحسين استغلال الطاقة الشمسية المتاحة

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، الألواح الشمسية الكهروضوئية، التتبع الشمسي، المتتبع ثنائي المحور، الحساسات الضوئية تحسين إنتاج الطاقة

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
CHAPITRE 01	3
I. Introduction	3
II. Contexte énergétique et intérêt des énergies renouvelables	3
III. Principe du rayonnement solaire	4
III.1. Rayonnement direct	5
III.2. Rayonnement diffus.....	5
III.3. Rayonnement solaire réfléchi	5
III.4. Rayonnement global.....	5
IV. Principe de conversion photovoltaïque	6
V. Technologies des cellules photovoltaïques.....	7
V.1. Silicium monocristallin :.....	7
V.2. Silicium polycristallin :	7
V.3. Silicium amorphe :	8
VI. Architecture des systèmes photovoltaïques	8
VI.1. Systèmes autonomes :.....	8
VI.2. Systèmes hybrides :	9
VI.3. Systèmes connectés au réseau :.....	9
VII. Composants d'un système Photovoltaïque	10
VIII. Facteurs influençant le rendement des systèmes photovoltaïques	11
IX. Avantages et limites des systèmes photovoltaïques	12
X. Conclusion	13
CHAPITRE 02	

<i>I. Introduction</i>	14
<i>II. Influence de l'orientation et de l'inclinaison sur la production</i>	14
<i>III. Principe du suivi solaire</i>	15
VII.1 Angle d'inclinaison du panneau	15
VII.2 Angle d'incidence	16
VII.3 Importance de l'orientation azimutale	17
<i>IV. Types de suiveurs solaires</i>	18
VIII.1 Partie commande ou programmation	18
VIII.2 Description du suiveur solaire :	22
<i>V. Méthodes de commande des suiveurs</i>	24
IX.1 Basée sur capteurs :	25
IX.2 Modèles mathématiques :	25
<i>VI. Comparaison : systèmes fixes vs systèmes mobiles</i>	25
X.1 Panneaux photovoltaïques fixes	25
X.2 Panneaux photovoltaïques mobiles (ou suiveurs solaires)	26
<i>VII. Limites des systèmes classiques de tracking</i>	28
XI.1 Typologie des suiveurs solaires	29
XI.2 Mécanismes d'orientation (systèmes de positionnement)	29
XI.3 Types de commande	30
<i>VIII. Introduction aux approches intelligentes (IA) pour l'optimisation</i>	32
VIII.1. Pourquoi l'IA est-elle pertinente ?	32
VIII.2. Principales approches basées sur l'IA	33
VIII.3. Avantages concrets	33
VIII.4. Défis et Perspectives	34
<i>IX. Conclusion</i>	34

CHAPITRE 03	
<i>I. Introduction</i>	36
<i>II. Présentation générale du système</i>	36
<i>III. Architecture matérielle</i>	37
<i>IV. Architecture logicielle</i>	40
IV.1 Algorithme de suivi solaire	40
IV.2 Programmation embarquée	42
<i>V. Réalisation du prototype</i>	45
V.1 Conception mécanique	46
V.2 Assemblage du système	48
<i>VI. Acquisition des données</i>	50
VI.1. Paramètres mesurés	51
VI.2. Système d'acquisition	52
VI.3. Conditions expérimentales	53
<i>VII. Tests expérimentaux</i>	55
VII.1 Protocole de test	55
VII.2 Validation du système	57
<i>VIII. Résultats et analyse</i>	58
VIII.1. Résultats expérimentaux	58
VIII.2. Analyse comparative	59
VIII.3. Analyse critique	61
<i>IX. Conclusion</i>	61
Conclusion générale	62

Liste des figures

Figure 1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.	4
Figure 2 : Le différent type du rayonnement solaire.	6
Figure 3 : Cellule au Silicium Monocristallin.	7
Figure 4: Cellule au Silicium Polycristallin.....	7
Figure 5: Cellule au Silicium amorphe.	8
Figure 6: Schéma synoptique d'un système PV autonome	9
Figure 7: Schéma synoptique d'un système PV hybride.....	9
Figure 8: Les angles de l'inclinaison, de projection et de l'incidence.	16
Figure 9: Traqueur à un seul axe avec angle d'inclinaison de Latitude.....	20
Figure 10: Traqueur à deux axes avec angle d'inclinaison de Latitude.	21
Figure 11: Traqueur à deux axes Azimut/ Élévation.	22
Figure 12: Description de suiveur solaire.....	22
Figure 13: Un panneau photovoltaïque fixe (a) et avec système suiveur (b).....	27
Figure 14: Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production	28
Figure 15: Commande en boucle ouverte d'un tracker PV.	31
Figure 16: Commande en boucle fermée d'un tracker	31
Figure 17: Capteur Current Sensor Module (ACS712).....	37
Figure 18: Capteur Voltage Sensor Module.....	38
Figure 19: Capteur de température et d'humidité DHT11	38
Figure 20: Module capteur de lumière (LDR)	38
Figure 21: Schéma complet des broches (Pinout) de l'ESP32-WROOM DevKit	39
Figure 22: Servomoteur	39
Figure 23: Schéma fonctionnel global du système suiveur solaire.....	40
Figure 24: Organigramme de l'algorithme de suivi solaire à deux axes basé.....	41
Figure 25: Montage mécanique.....	49
Figure 26: Température du panneau.....	52
Figure 27: Irradiance solaire avec effet des nuages.....	55

Figure 28: Courbes I-V et P-V du panneau photovoltaïque.....59

Figure 29: Puissance produite sur une journée (avec et sans suiveur)60

Abréviations et symboles

PV : Photovoltaïque

IA : Intelligence Artificielle

ML : Machine Learning

LDR : Light Dependent Resistor

ESP32 : Carte de commande utilisée pour le traitement des données

Arduino IDE : Environnement de programmation

DHT11 : Capteur de température et d'humidité

ACS712 : Capteur de courant

LCD : Afficheur à cristaux liquides

I2C : Bus de communication série

GPIO : Entrée/sortie numérique du microcontrôleur

DC : Courant continu

AC : Courant alternatif

PWM : Modulation de largeur d'impulsion

CSV : Format de fichier de données

RMSE : Racine de l'erreur quadratique moyenne

MSE : Erreur quadratique moyenne

MAE : Erreur absolue moyenne

R^2 : Coefficient de détermination

V : Tension électrique

I : Courant électrique

P : Puissance électrique

E : Énergie électrique

T : Température

H : Humidité

N : Nombre d'échantillons

y_i : Valeur réelle

$\hat{y}_i$: Valeur prédite

β : Angle d'inclinaison du panneau

α : Angle d'azimut

θ : Angle d'incidence

φ : Latitude

λ : Longitude

ω : Angle horaire

δ : Déclinaison solaire

h : Hauteur solaire

η : Rendement

W : Watt

Wh : Wattheure

kWh : Kilowattheure

GND : Masse électrique

Vcc : Tension d'alimentation positive

Introduction Générale

Dans un contexte mondial marqué par une augmentation continue de la demande énergétique et par des préoccupations croissantes liées aux changements climatiques, le développement des énergies renouvelables représente une nécessité majeure pour répondre aux défis énergétiques actuels [1]. Parmi ces sources, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place importante grâce à son abondance, sa disponibilité et son faible impact environnemental [2].

Cependant, les performances des systèmes photovoltaïques restent fortement influencées par plusieurs paramètres, notamment l'orientation et l'inclinaison des panneaux, les conditions météorologiques, la température et la localisation géographique de l'installation [3]. Ainsi, l'optimisation de l'exploitation de l'énergie solaire constitue un axe de recherche important visant à améliorer le rendement énergétique des systèmes photovoltaïques.

Parmi les solutions proposées, les systèmes de poursuite solaire permettent d'adapter l'orientation des panneaux photovoltaïques en fonction de la position du soleil afin d'augmenter la quantité d'énergie captée [4]. Malgré leurs avantages, ces systèmes présentent certaines limitations liées à leur complexité mécanique, leur coût de réalisation, leur consommation énergétique ainsi qu'à leur dépendance aux capteurs utilisés pour déterminer la position optimale.

Dans ce contexte, le développement de systèmes photovoltaïques instrumentés intégrant des technologies de mesure, de commande et de communication représente une approche intéressante pour améliorer la surveillance et la gestion des installations solaires. L'acquisition des paramètres électriques et environnementaux permet notamment de mieux comprendre le comportement du système et constitue une base essentielle pour le développement ultérieur de solutions intelligentes.

Le présent travail s'inscrit dans cette démarche et porte sur la conception et la réalisation d'un système photovoltaïque expérimental permettant le suivi de l'orientation du panneau ainsi que la supervision de ses principales grandeurs de fonctionnement. Le système développé intègre l'acquisition de plusieurs paramètres, tels que la tension, le courant, la puissance produite, la température, la position du panneau ainsi que les informations temporelles

associées. Une application mobile a également été conçue afin d'assurer la visualisation et le suivi en temps réel des données collectées, offrant ainsi une interface simple et accessible pour l'exploitation du système.

Les données expérimentales obtenues constituent également une base importante pour des développements futurs, notamment l'intégration de techniques d'intelligence artificielle capables d'analyser le comportement du système, de prédire son fonctionnement et d'optimiser automatiquement son orientation. Ces approches pourraient permettre, à terme, de réduire la dépendance aux capteurs physiques et d'améliorer davantage les performances énergétiques des installations photovoltaïques.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre est consacré à une présentation générale des systèmes photovoltaïques, leurs principes de fonctionnement, les différents facteurs influençant leur rendement ainsi que les techniques utilisées pour l'optimisation de la production énergétique.

Le deuxième chapitre présente l'étude du système proposé, son architecture matérielle et logicielle, ainsi que les différents composants utilisés pour la réalisation du prototype expérimental et l'acquisition des données.

Le troisième chapitre est consacré à la réalisation pratique du système photovoltaïque. Il décrit la conception et l'intégration des différents éléments matériels, la mise en œuvre du mécanisme d'orientation du panneau, le système d'acquisition des données ainsi que le développement de l'application mobile dédiée à la supervision en temps réel.

Le quatrième chapitre présente l'analyse des résultats expérimentaux obtenus à partir du prototype réalisé, l'évaluation du fonctionnement du système et une discussion sur les améliorations possibles. Il expose également les perspectives d'évolution, notamment l'intégration future de méthodes d'intelligence artificielle, d'apprentissage automatique et de techniques d'optimisation avancées pour rendre le système plus autonome et plus performant.

Enfin, ce travail s'achève par une conclusion générale résumant les principales contributions réalisées et présentant les perspectives futures pour le développement de systèmes photovoltaïques intelligents intégrant les technologies numériques avancées.

CHAPITRE 01

Énergie solaire photovoltaïque et optimisation de l'orientation

I. Introduction

Depuis les débuts de l'humanité, l'homme a utilisé diverses ressources naturelles telles que le pétrole, le gaz et les minerais afin de répondre à ses besoins en énergie. Toutefois, l'énergie solaire, qui constitue l'une des sources les plus abondantes et les plus accessibles sur Terre, demeure encore insuffisamment exploitée par rapport à son potentiel considérable.

Durant les dernières décennies, plusieurs recherches scientifiques ont été menées dans le but de convertir directement le rayonnement solaire en électricité exploitable. Ce processus, appelé conversion photovoltaïque, repose sur des matériaux semi-conducteurs capables de produire un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Cet effet a été observé pour la première fois en 1839 par le physicien français Antoine Henri Becquerel [8].

II. Contexte énergétique et intérêt des énergies renouvelables

L'énergie solaire constitue une ressource renouvelable disponible en permanence, provenant du rayonnement émis par le Soleil. Cette énergie peut être exploitée et transformée en électricité grâce aux systèmes photovoltaïques, qui reposent sur des cellules semi-conductrices, principalement en silicium, capables de convertir directement la lumière en courant électrique.

Le Soleil libère en continu une quantité considérable d'énergie dans l'espace. Une faible partie de ce rayonnement atteint la surface terrestre, avec une valeur moyenne estimée à environ 1361 W/m^2 , connue sous le nom de constante solaire.

En tenant compte de la surface interceptée par la Terre, la puissance totale reçue peut être approximativement évaluée à :

Surface équivalente : $\approx 1,28 \times 10^{14} \text{ m}^2$

Puissance solaire incidente : $\approx 1,74 \times 10^{17} \text{ W}$

À titre de comparaison, la demande énergétique mondiale est d'environ 18 TW selon l'Agence Internationale de l'Énergie (2020), ce qui reste très faible par rapport à l'immense potentiel énergétique fourni naturellement par le Soleil.

Ainsi, le rayonnement solaire représente une source énergétique majeure, largement suffisante pour couvrir les besoins humains, ce qui justifie l'intérêt croissant porté aux technologies photovoltaïques.

III. Principe du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire correspond à une onde électromagnétique émise par le Soleil, couvrant une large gamme de longueurs d'onde comprise approximativement entre 0,22 μm et 10 μm . Sa répartition spectrale montre que l'énergie solaire n'est pas uniforme selon les différentes bandes du spectre.

En effet, environ 9 % de cette énergie se situe dans la région des ultraviolets ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$), près de 47 % dans le domaine visible (0,4 à 0,8 μm), et environ 44 % dans l'infrarouge ($\lambda > 0,8 \mu\text{m}$).

À la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, ce rayonnement présente une puissance moyenne d'environ 1,37 kW/m², avec de légères variations liées à la distance Terre–Soleil au cours de l'année. On distingue généralement plusieurs types de rayonnement solaire intervenant à la surface terrestre.

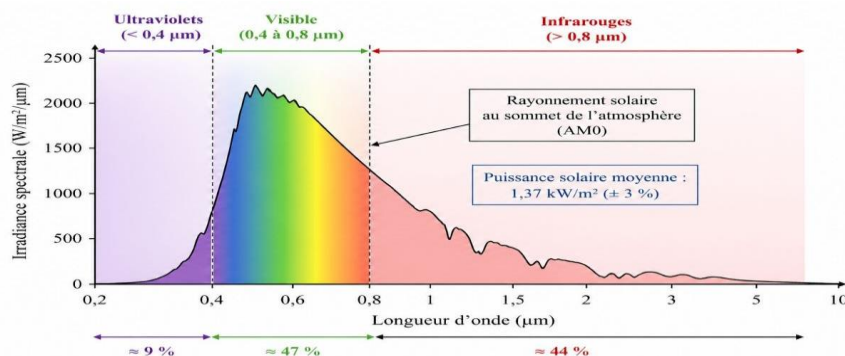


Figure 1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

Il y a quatre types de rayonnement :

III.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct correspond à la part du rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre sans subir de diffusion ou de réflexion dans l'atmosphère. Son intensité varie principalement en fonction de l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée par les rayons ainsi que de l'angle d'incidence solaire par rapport au sol.

Sa mesure est assurée par un pyrhéliomètre, instrument spécialement conçu pour capter uniquement le rayonnement provenant directement du soleil. Pour garantir une mesure précise, cet appareil doit être continuellement orienté vers le soleil à l'aide d'un système de suivi.

III.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus désigne la composante du rayonnement solaire qui atteint le sol après avoir été dispersée par les molécules de l'atmosphère, les particules en suspension et les nuages. Il provient donc de l'ensemble de la voûte céleste et non directement du disque solaire.

Ce type de rayonnement est mesuré à l'aide d'un pyranomètre équipé d'un dispositif occultant le soleil, afin d'isoler uniquement la fraction diffuse du rayonnement.

III.3. Rayonnement solaire réfléchi

Le rayonnement réfléchi est la portion du rayonnement solaire renvoyée par la surface terrestre ou par les objets présents sur celle-ci. Cette réflexion dépend fortement de la nature du sol, appelée albédo, qui peut être particulièrement élevé dans le cas de surfaces comme la neige ou les étendues d'eau.

III.4. Rayonnement global

Le rayonnement global correspond à l'ensemble de l'énergie solaire reçue sur une surface donnée. Il regroupe à la fois le rayonnement direct, le rayonnement diffus ainsi que la part réfléchie par le sol et les objets environnants.

Sa mesure est effectuée à l'aide d'un pyranomètre ou d'un solarimètre, sans dispositif d'occultation.

Il convient de noter que certains systèmes solaires à concentration exploitent uniquement le rayonnement direct pour augmenter leur rendement. Ainsi, leur efficacité diminue fortement dans les régions où le rayonnement diffus est dominant, car celui-ci ne peut pas être focalisé efficacement en un point.

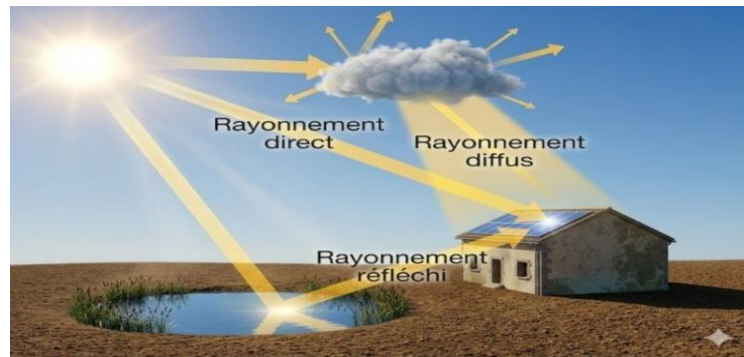


Figure 2 : Le différent type du rayonnement solaire.

IV. Principe de conversion photovoltaïque

Le principe de la conversion photovoltaïque repose sur la capacité de certains matériaux semi-conducteurs à transformer directement l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Lorsqu'un photon issu du rayonnement solaire frappe une cellule photovoltaïque, il peut transférer son énergie aux électrons du matériau, ce qui permet leur libération et la création de paires électron-trou.

Sous l'effet du champ électrique interne de la jonction p-n, ces charges sont séparées et mises en mouvement, générant ainsi une différence de potentiel aux bornes de la cellule. Lorsque celle-ci est reliée à un circuit externe, un courant électrique continu est produit.

Ce phénomène constitue le fondement du fonctionnement des systèmes photovoltaïques, permettant la conversion directe de l'énergie solaire en électricité exploitable.

V. Technologies des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques se déclinent en plusieurs technologies, qui se distinguent principalement par la structure du matériau semi-conducteur utilisé ainsi que par leurs performances et coûts de fabrication. Parmi les plus répandues, on retrouve les cellules au silicium sous différentes formes.

V.1.Silicium monocristallin :

Cette technologie est basée sur un cristal de silicium unique et parfaitement ordonné. Elle offre généralement un rendement élevé grâce à la bonne mobilité des électrons dans le matériau. Cependant, son procédé de fabrication est plus complexe et donc plus coûteux. Elle est souvent utilisée dans les installations où l'espace est limité et où la performance est prioritaire.



Figure 3 : Cellule au Silicium Monocristallin.

V.2.Silicium polycristallin :

Le silicium polycristallin est constitué de plusieurs cristaux orientés de manière différente. Cette structure rend la fabrication plus simple et moins coûteuse que celle du silicium monocristallin. Toutefois, son rendement est légèrement inférieur en raison des pertes liées aux joints entre les cristaux. Il reste néanmoins largement utilisé dans les installations photovoltaïques classiques.



Figure 4: Cellule au Silicium Polycristallin.

V.3. Silicium amorphe :

Le silicium amorphe présente une structure désordonnée sans organisation cristalline. Il peut être déposé en fines couches sur différents supports, ce qui permet une grande flexibilité d'application. Bien que son coût de production soit réduit, son rendement est généralement plus faible que celui des technologies cristallines. Il est souvent utilisé dans des applications de faible puissance ou intégrées à des surfaces spécifiques.



Figure 5: Cellule au Silicium amorphe.

VI. Architecture des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques peuvent être classés selon leur mode de fonctionnement et leur intégration au réseau électrique. On distingue principalement trois architectures : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau.

VI.1. Systèmes autonomes :

Ces systèmes fonctionnent de manière indépendante, sans liaison avec le réseau électrique public. L'énergie produite est généralement stockée dans des batteries afin d'assurer l'alimentation en continu, notamment en période d'absence d'ensoleillement. Ils sont particulièrement adaptés aux sites isolés où l'accès au réseau est difficile ou inexistant.

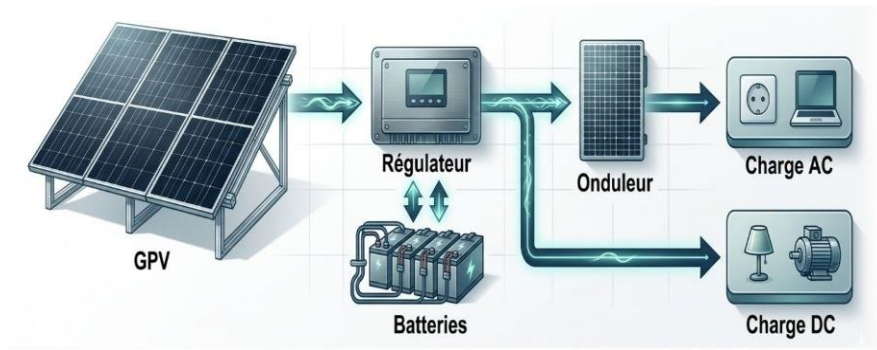


Figure 6: Schéma synoptique d'un système PV autonome

VI.2. Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides combinent plusieurs sources d'énergie, généralement le solaire photovoltaïque avec un générateur de secours (diesel, éolien ou autre). Cette combinaison permet d'améliorer la fiabilité de l'alimentation électrique en compensant les variations de production solaire. Ils sont souvent utilisés dans les zones isolées nécessitant une alimentation plus stable et sécurisée.

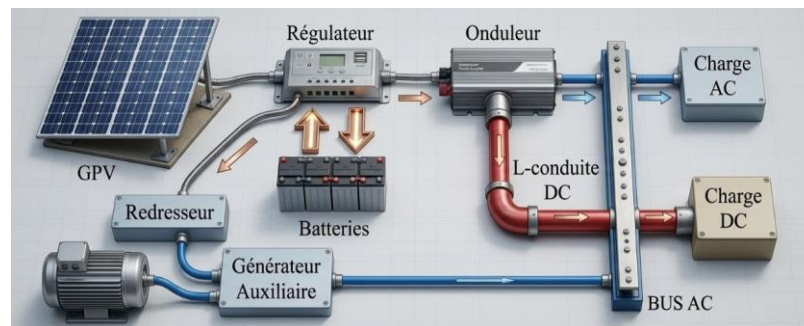


Figure 7: Schéma synoptique d'un système PV hybride.

VI.3. Systèmes connectés au réseau :

Ces systèmes fonctionnent de manière indépendante, sans liaison avec le réseau électrique public. L'énergie produite est généralement stockée dans des batteries afin d'assurer l'alimentation en continu, notamment en période d'absence d'ensoleillement. Ils sont particulièrement adaptés aux sites isolés où l'accès au réseau est difficile ou inexistant.

VI.3.1. Systèmes PV connectés au réseau (centrales)

Dans ce type d'installation, la totalité de l'énergie électrique produite est injectée directement dans le réseau via des onduleurs de forte puissance. L'électricité générée par les panneaux, initialement sous forme de courant continu à tension variable, est convertie en courant alternatif dont les caractéristiques (fréquence, tension et phase) sont synchronisées avec celles du réseau électrique.

La production d'une centrale photovoltaïque n'est pas constante : elle dépend fortement de l'irradiation solaire, et varie donc selon l'heure de la journée ainsi que les saisons. Ces systèmes sont souvent équipés de dispositifs de suivi solaire permettant d'optimiser l'orientation des panneaux et d'améliorer le rendement global.

VI.3.2. Systèmes PV échangeant l'énergie avec le réseau

Ces systèmes sont principalement destinés aux utilisateurs raccordés au réseau électrique classique, auquel vient s'ajouter une installation photovoltaïque. Cette combinaison permet une gestion bidirectionnelle de l'énergie :

- En cas de déficit de production solaire, l'énergie est prélevée du réseau (achat).
- En cas d'excédent, l'énergie produite est injectée dans le réseau (vente).

Ce fonctionnement repose sur l'utilisation de compteurs bidirectionnels capables de mesurer les flux d'énergie dans les deux sens, offrant ainsi une meilleure valorisation de la production photovoltaïque.

VII. Composants d'un système Photovoltaïque

Un système photovoltaïque repose sur un ensemble d'éléments complémentaires assurant la production, la gestion et le stockage de l'énergie électrique. Parmi les composants essentiels, on distingue :

- **Panneaux solaires :**

Les panneaux photovoltaïques constituent la source principale d'énergie du système. Ils sont composés de cellules capables de convertir le rayonnement solaire en électricité sous forme de courant continu. Leur performance dépend de plusieurs facteurs, notamment l'ensoleillement, l'orientation et la température.

- **Régulateur de charge :**

Le régulateur joue un rôle central dans la gestion de l'énergie produite. Il contrôle la charge et la décharge des batteries afin d'éviter les surcharges ou les décharges profondes, ce qui permet de prolonger leur durée de vie. Il assure également la stabilité du système en adaptant la tension et le courant aux besoins.

- **Batteries :**

Les batteries servent à stocker l'énergie produite pour une utilisation ultérieure, notamment en l'absence d'ensoleillement (nuit ou mauvais temps). Elles garantissent ainsi la continuité de l'alimentation électrique. Le choix des batteries dépend de la capacité de stockage et des caractéristiques du système.

VIII. Facteurs influençant le rendement des systèmes photovoltaïques

Le rendement d'un système photovoltaïque dépend de plusieurs paramètres environnementaux et techniques qui influencent directement la quantité d'énergie produite. Parmi les plus déterminants, on peut citer :

- **Température :**

La performance des cellules photovoltaïques diminue généralement lorsque la température augmente. Une élévation thermique entraîne une baisse de la tension de sortie, ce qui réduit le rendement global du module.

- **Orientation et inclinaison :**

L'orientation des panneaux par rapport au soleil ainsi que leur angle d'inclinaison jouent un rôle crucial dans la captation du rayonnement solaire. Une orientation optimale permet de maximiser l'exposition au soleil tout au long de la journée.

- **Irradiation solaire :**

L'intensité du rayonnement solaire reçu est un facteur clé. Plus l'irradiation est élevée, plus la production d'énergie est importante. Les variations liées aux conditions météorologiques (nuages, poussière, humidité) influencent directement ce paramètre.

- **Ombrage :**

La présence d'ombres, même partielles, peut entraîner une diminution significative de la production. Une seule cellule ombragée peut affecter le fonctionnement de tout un module.

- **Propreté des panneaux :**

L'accumulation de poussière, de saletés ou de neige sur la surface des panneaux réduit leur capacité à capter la lumière solaire, ce qui diminue leur rendement.

- **Qualité des composants :**

Le type de cellules utilisées, la qualité de fabrication des panneaux et des équipements associés (onduleur, câbles, régulateur) influencent également les performances globales du système.

IX. Avantages et limites des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques présentent de nombreux atouts, mais aussi certaines contraintes qu'il convient de prendre en compte

- **Avantages :**

L'énergie solaire est une source renouvelable et inépuisable, disponible gratuitement. Les systèmes photovoltaïques permettent de produire de l'électricité sans émissions polluantes, ce qui contribue à la protection de l'environnement. Ils nécessitent également peu de maintenance et peuvent être installés dans des zones isolées, offrant ainsi une solution adaptée aux régions non raccordées au réseau électrique.

- **Limites :**

Cependant, la production d'énergie dépend fortement des conditions climatiques et de l'ensoleillement, ce qui entraîne une intermittence. Le coût initial d'installation peut être relativement élevé, notamment en raison des équipements et du stockage. De plus, le rendement reste limité par des facteurs techniques et environnementaux, ce qui peut réduire l'efficacité globale du système.

X. Conclusion

L'énergie solaire constitue une source d'énergie renouvelable, propre et abondante, jouant un rôle essentiel dans la transition énergétique mondiale. Grâce à la technologie photovoltaïque, il est possible de convertir directement le rayonnement solaire en électricité, offrant ainsi une solution durable pour répondre à la demande croissante en énergie. Les systèmes photovoltaïques se distinguent par leur simplicité, leur faible impact environnemental et leur capacité d'installation dans divers environnements, y compris les zones isolées. Toutefois, leur performance dépend de plusieurs facteurs, notamment l'ensoleillement, la température et l'orientation des panneaux.

Ainsi, ce chapitre a permis d'établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension du fonctionnement et de l'importance de l'énergie solaire photovoltaïque, qui représente une alternative prometteuse aux sources d'énergie conventionnelles.

CHAPITRE 02

Optimisation de l'orientation des panneaux solaires

I. Introduction

L'efficacité d'un système photovoltaïque dépend fortement des conditions d'installation et, en particulier, de l'orientation des panneaux solaires. En effet, l'angle d'inclinaison et l'orientation par rapport au soleil influencent directement la quantité de rayonnement solaire captée, et donc la puissance électrique produite.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'optimisation de l'orientation des panneaux solaires afin de maximiser leur rendement énergétique. Nous aborderons les principes de base liés à la position du soleil, ainsi que l'impact de l'orientation et de l'inclinaison sur la performance des systèmes photovoltaïques. L'objectif est de mettre en évidence les méthodes permettant d'améliorer la production d'énergie à partir d'un panneau solaire en suivant le mouvement apparent du soleil.

II. Influence de l'orientation et de l'inclinaison sur la production

La production d'énergie d'un panneau photovoltaïque dépend fortement de son orientation et de son inclinaison par rapport au soleil. En effet, la quantité de rayonnement solaire reçue par la surface du panneau varie selon l'angle d'incidence des rayons solaires.

L'orientation correspond à la direction vers laquelle le panneau est exposé (généralement vers le sud dans l'hémisphère nord afin de capter un maximum d'ensoleillement). Une mauvaise orientation entraîne une diminution significative de l'énergie reçue, ce qui réduit directement la puissance produite.

L'inclinaison, quant à elle, représente l'angle formé entre le panneau et le plan horizontal. Elle joue un rôle essentiel dans l'optimisation de l'absorption du rayonnement solaire. Une inclinaison optimale permet de maximiser l'exposition aux rayons du soleil au cours de la journée et des saisons.

Ainsi, une combinaison adéquate entre l'orientation et l'inclinaison des panneaux photovoltaïques est indispensable pour améliorer leur rendement énergétique et garantir une production optimale d'électricité.

III. Principe du suivi solaire

L'orientation des panneaux solaires constitue un facteur déterminant pour maximiser la quantité d'énergie captée. En effet, les performances d'un système photovoltaïque sont fortement liées à sa capacité à recevoir les rayons solaires de façon quasi perpendiculaire. Ainsi, une bonne compréhension des paramètres d'orientation, notamment l'angle d'inclinaison et l'angle d'incidence, est essentielle pour améliorer le rendement global de l'installation.

VII.1 Angle d'inclinaison du panneau

L'angle d'inclinaison, appelé aussi angle de tilt, désigne l'angle formé entre la surface du panneau photovoltaïque et le plan horizontal. Ce paramètre influence directement la quantité de rayonnement solaire reçue par le panneau. Une inclinaison inadaptée peut ainsi réduire de manière notable les performances du système.

La valeur optimale de cet angle dépend de plusieurs éléments :

- **La latitude géographique :** pour une installation fixe, l'inclinaison idéale est généralement proche de la latitude du site.
- **La variation saisonnière :** en hiver, une inclinaison plus importante est recommandée afin de capter un soleil plus bas sur l'horizon, tandis qu'en été, un angle plus faible est préférable.

- **L'objectif de production** : pour maximiser la production annuelle, on adopte souvent une valeur moyenne. En revanche, pour répondre à un besoin spécifique (comme le chauffage en hiver), l'angle peut être ajusté en conséquence.

Dans le cas des systèmes à orientation mobile, l'inclinaison peut être modifiée automatiquement en fonction des saisons, ce qui permet d'optimiser davantage la production d'énergie.

L'angle d'inclinaison Q (Figure II-1) représente donc l'angle entre le panneau et le plan horizontal, avec la condition suivante : $0^\circ < Q \leq 180^\circ$

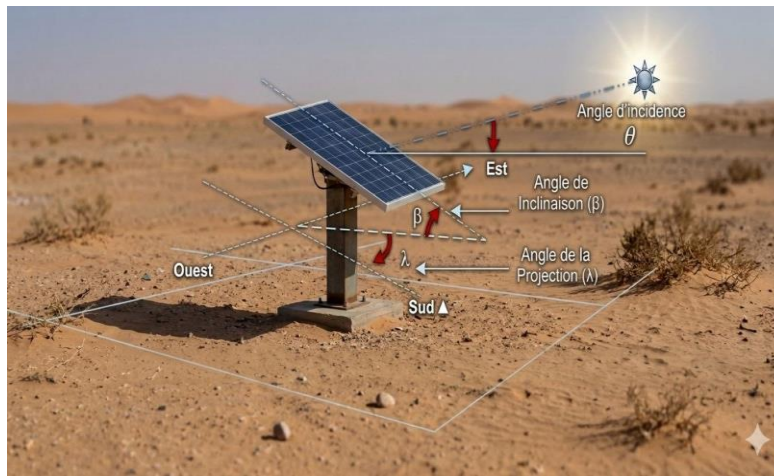


Figure 8: Les angles de l'inclinaison, de projection et de l'incidence.

VII.2 Angle d'incidence

L'angle d'incidence correspond à l'angle formé entre les rayons solaires et la normale (perpendiculaire) à la surface du panneau photovoltaïque. Plus cet angle est faible, idéalement proche de 0° , plus la quantité d'énergie reçue par le panneau est élevée.

En revanche, lorsque cet angle augmente, les rayons atteignent la surface de manière oblique. Dans ce cas, une partie du rayonnement est réfléchi au lieu d'être absorbée, ce qui entraîne une diminution de la production électrique.

On peut distinguer plusieurs cas illustrant ce phénomène :

- **Incidence perpendiculaire (0°)** : captation optimale et rendement maximal.
- **Incidence modérée ($> 30^\circ$)** : apparition de pertes d'énergie dues à la réflexion et à la baisse de l'intensité reçue.
- **Incidence élevée ($> 60^\circ$)** : rendement très faible, pouvant devenir presque nul lorsque les rayons sont rasants.

Dans ce cadre, les systèmes de suivi solaire (trackers) visent à maintenir en permanence un angle d'incidence proche de 0° , en ajustant automatiquement l'orientation des panneaux en fonction de la position du soleil.

VII.3 Importance de l'orientation azimutale

En plus de l'inclinaison, l'orientation azimutale — c'est-à-dire la direction horizontale du panneau — joue un rôle déterminant dans la performance d'un système photovoltaïque. Dans l'hémisphère nord, l'orientation la plus favorable est généralement dirigée vers le sud, tandis que dans l'hémisphère sud, elle est orientée vers le nord. Tout écart par rapport à cette direction idéale entraîne une réduction du temps d'exposition directe au rayonnement solaire, et donc une baisse de la production d'énergie.

L'angle d'incidence, noté θ_i (Figure II-1), est défini comme l'angle entre le rayon solaire et la normale à la surface du panneau. Il peut être exprimé par une relation faisant intervenir plusieurs paramètres liés à la position du soleil et à l'orientation du panneau, notamment l'inclinaison, la hauteur solaire et les angles azimutaux :

$$(\theta_i) = \sin(\beta) \cos(h) \cos(\alpha - a) + \cos(\beta) \sin(h) \quad E.28$$

Avec :

i : L'angle d'incidence.

β : L'inclinaison du plan récepteur

h : La hauteur du soleil

α : l'azimut du plan récepteur a : l'azimut solaire

λ : Angle de la projection horizontale de la normale au plan considéré avec N-S.

β : Angle de la normale au plan considéré avec le plan horizontal

Le rendement en puissance solaire exploitée peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\eta = (\theta) * 100 \text{ E. 29}$$

La valeur de θ qui donne le meilleur rendement c'est $\theta = 90^\circ$.

La maîtrise des principes d'orientation solaire est essentielle pour maximiser la productivité énergétique d'un système photovoltaïque. Les systèmes de suivi solaire, qu'ils soient manuels ou automatisés, permettent d'ajuster l'inclinaison et l'orientation en temps réel afin de conserver un angle d'incidence optimal tout au long de la journée et de l'année.

IV. Types de suiveurs solaires

L'analyse d'un suiveur solaire concret permet d'appréhender de manière globale le principe de fonctionnement d'un système de suivi, depuis la détection de la position du soleil jusqu'au mouvement réel du panneau photovoltaïque.

De façon générale, un suiveur solaire est constitué de deux parties principales. La première est la partie commande ou programmation, responsable du traitement des informations issues des capteurs et de la prise de décision. La seconde est la partie opérative ou électronique, qui assure la mise en œuvre des actions en exécutant les commandes à l'aide de dispositifs tels que les capteurs et les actionneurs, permettant ainsi le déplacement du panneau.

VIII.1 Partie commande ou programmation

La partie commande constitue l'élément essentiel du système de suivi solaire, car elle assure la gestion et la coordination de toutes les opérations. Elle est généralement basée sur un microcontrôleur ou un microprocesseur, tel que Arduino, PIC, STM32, Raspberry Pi ou encore ESP32, qui est largement utilisé grâce à ses performances et à ses capacités de communication sans fil.

Ce module reçoit différentes informations issues des capteurs, comme l'intensité lumineuse, la position angulaire, ainsi que des paramètres électriques tels que la tension et le courant. À partir de ces données, il envoie des signaux de commande vers les actionneurs (moteurs ou vérins) afin d'ajuster en permanence l'orientation du panneau solaire.

Le fonctionnement repose sur un programme embarqué intégrant un algorithme de suivi, qui peut prendre plusieurs formes :

- **Suivi par capteurs de lumière :**

Le système compare les niveaux d'éclairement de chaque côté du panneau et corrige sa position jusqu'à atteindre un équilibre.

- **Suivi astronomique :**

La position du panneau est calculée à partir de paramètres prédéfinis tels que la date, l'heure et la position géographique.

- **Approche hybride :**

Elle combine les deux méthodes précédentes afin d'améliorer la précision et la fiabilité du système.

En outre, l'algorithme prend en charge des situations particulières, comme les conditions climatiques défavorables (vents forts), le fonctionnement nocturne ou la détection d'anomalies. Il permet également d'optimiser la consommation énergétique du système, notamment grâce à des fonctions comme la mise en veille ou le repositionnement automatique au lever du soleil.

Degrés de liberté de mouvement

Traqueurs Mono axiaux :

Les suiveurs mono-axiaux possèdent un seul degré de liberté, ce qui signifie qu'ils ne peuvent effectuer un mouvement qu'autour d'un unique axe de rotation. Leur fonctionnement repose sur une orientation fixe du panneau, généralement inclinée selon la latitude du site et dirigée vers le sud dans l'hémisphère nord. Le suivi du soleil se fait alors par une rotation correspondant à l'angle horaire, permettant d'ajuster la position du panneau au cours de la journée (Figure II.2).

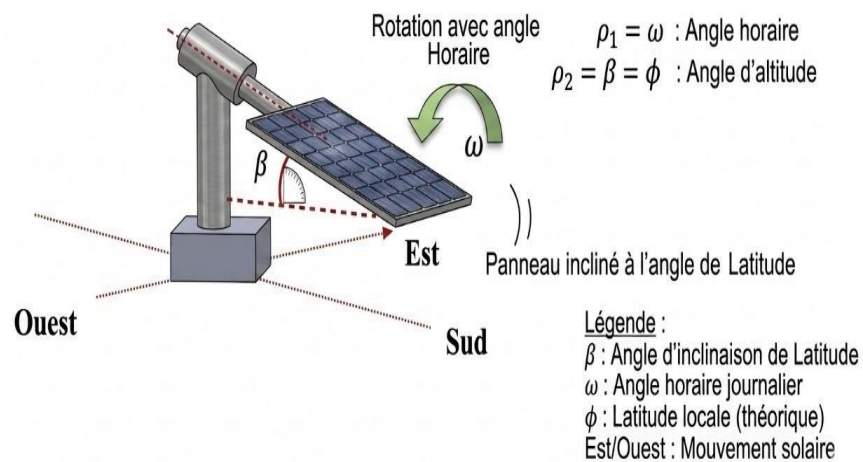


Figure 9: Traqueur à un seul axe avec angle d'inclinaison de Latitude.

Traqueurs bi -axiaux :

Les systèmes de suivi bi- axiaux offrent deux degrés de liberté, ce qui permet d'orienter en permanence l'axe normal aux panneaux photovoltaïques de façon parfaitement alignée avec les rayons solaires. Cette précision de suivi se fait cependant au prix d'une conception plus complexe et d'une réalisation mécanique plus sophistiquée.

- **Traqueur équatorial :**

Dans cette configuration, le panneau est initialement incliné selon l'angle de latitude du site. Le premier axe de rotation assure le suivi solaire en tournant selon un angle correspondant à l'angle horaire w .

Par ailleurs, le second axe ajuste son orientation en fonction de la déclinaison solaire, avec une variation angulaire $p_2 = \delta$. Étant donné que la déclinaison solaire évolue très lentement au cours du temps, son réglage n'exige pas un suivi continu : une ou plusieurs corrections par saison sont généralement suffisantes pour maintenir une bonne précision d'orientation.

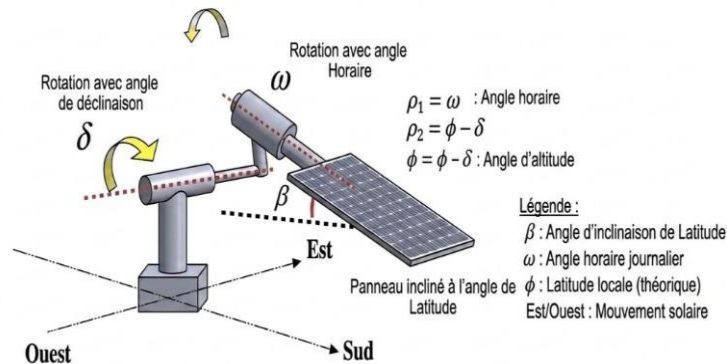


Figure 10: Traqueur à deux axes avec angle d'inclinaison de Latitude.

- **Traqueur azimut / élévation :**

Ce type de système repose sur une double rotation permettant d'optimiser en permanence l'orientation du panneau photovoltaïque. L'un des axes effectue une rotation autour du zénith, avec un angle correspondant à l'azimut solaire, tandis que le second axe, disposé parallèlement à la surface terrestre, s'ajuste selon l'angle d'élévation du soleil.

Les systèmes de suivi azimut/élévation s'appuient généralement sur des modèles astronomiques ou des algorithmes de calcul de position solaire afin de déterminer avec précision la trajectoire du soleil à tout moment et en tout lieu. Les paramètres tels que la localisation

géographique, la date et l'heure sont introduits dans un contrôleur, lequel calcule en temps réel la position solaire et commande l'orientation optimale du dispositif.

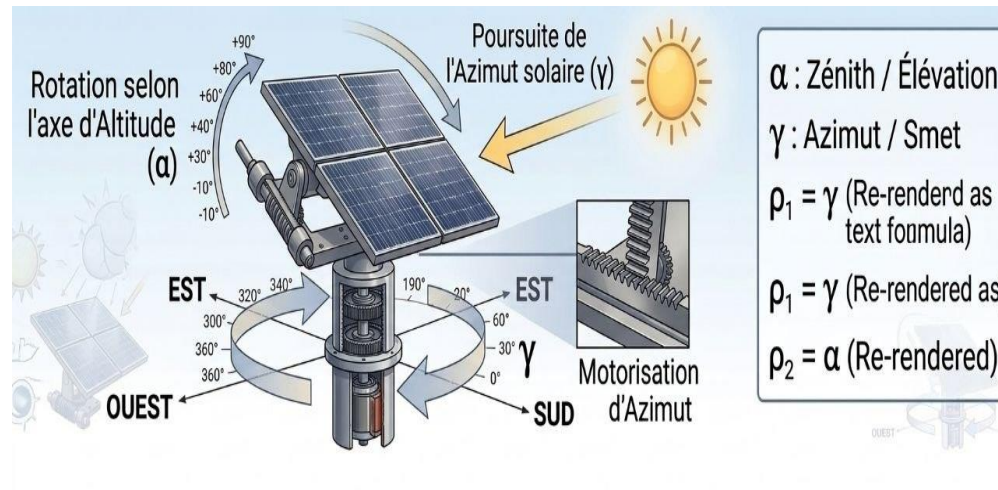


Figure 11: Traqueur à deux axes Azimut/ Élévation.

VIII.2 Description du suiveur solaire :

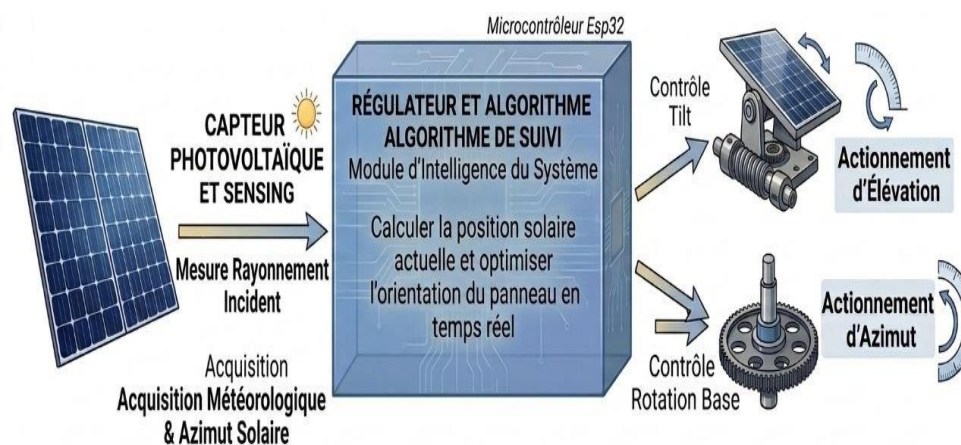


Figure 12: Description de suiveur solaire.

- La partie commande ou programmation

Cette section est chargée de traiter les données relatives à la position du soleil et de les envoyer aux actionneurs afin d'assurer le suivi solaire. Elle permet également de détecter d'éventuelles anomalies de fonctionnement et de déclencher les procédures de sécurité

nécessaires pour protéger le système.

En outre, elle remplit plusieurs autres fonctions, notamment :

- La gestion du mouvement mécanique du dispositif en imposant des limites aux angles de rotation grâce aux fins de course, soit de 0° à 200° pour l'axe horizontal et de 0° à 90° pour l'axe vertical.
- Le repositionnement du panneau en fin de journée vers sa position initiale, correspondant au point de départ du système.

- **Partie opérative ou électronique (reformulation)**

La partie opérative regroupe l'ensemble des éléments matériels qui interagissent directement avec l'environnement et qui exécutent les consignes envoyées par la partie commande. Elle est constituée essentiellement de :

- **Capteurs** : tels que les photorésistances (LDR), les capteurs d'irradiation solaire, ainsi que les capteurs de position angulaire (potentiomètres, encodeurs) ou encore les accéléromètres, utilisés pour mesurer l'orientation et les conditions d'ensoleillement.
- **Actionneurs** : principalement des moteurs à courant continu, des moteurs pas à pas ou des vérins électriques, qui assurent le déplacement du panneau afin d'ajuster son orientation selon l'angle déterminé.
- **Circuits de puissance** : comprenant les ponts en H, les relais, les MOSFETs et les alimentations stabilisées, permettant d'alimenter et de commander les actionneurs en toute sécurité.
- **Interface de communication et de supervision** :
pouvant inclure des afficheurs LCD, des LED d'indication ou encore des modules de communication sans fil (Bluetooth, Wi-Fi) pour permettre le suivi et le contrôle à

distance du système.

Cette partie assure la réception des ordres issus du système de calcul, leur transformation en signaux électriques, puis leur transmission vers les éléments mécaniques. Elle permet ainsi l'activation des actionneurs (comme les moteurs ou vérins) afin de maintenir le panneau photovoltaïque orienté de manière optimale face au rayonnement solaire.

L'expression de l'angle incidence est :

$$\cos i = \vec{n} \cdot \vec{S}$$

On trouve :

$$\cos i = \sin \varphi \sin \delta \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \alpha + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \alpha \cos \beta \cos \omega + \cos \varphi \sin \alpha \sin \omega$$

cas particulier

➤ Capteur orienté plein sud ($\alpha = 0$) :

$$\cos i = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \omega \cos \delta \cos(\varphi - \beta)$$

➤ Pour un captage annuel de type ($\beta = \varphi$)

$$\cos i = \cos \omega \cos \delta$$

➤ Pour une incidence parfaite (cas d'un système de poursuite du soleil)

$$i=0.$$

L'intégration soignée de ces éléments est essentielle pour garantir la réactivité, la stabilité, et la fiabilité du système. Une bonne coordination entre la partie commande et la partie opérative assure un fonctionnement optimal, même dans des conditions climatiques variables

V. Méthodes de commande des suiveurs

Les techniques de commande des systèmes de poursuite solaire peuvent être classées en deux grandes catégories :

IX.1 Basée sur capteurs :

Cette approche repose sur l'utilisation de capteurs (tels que les photorésistances, capteurs de lumière ou capteurs de position) afin de détecter en temps réel la position du soleil ou l'intensité du rayonnement. Les informations recueillies permettent d'ajuster directement l'orientation du panneau pour maximiser la captation de l'énergie solaire. Commande basée sur des

IX.2 Modèles mathématiques :

Dans ce cas, le suivi du soleil est réalisé à partir de calculs théoriques et de modèles astronomiques décrivant la trajectoire solaire. L'orientation du panneau est alors déterminée en fonction de paramètres tels que l'heure, la date et la localisation géographique, sans recourir à des capteurs physiques de détection.

VI. Comparaison : systèmes fixes vs systèmes mobiles

La production d'énergie solaire photovoltaïque dépend fortement de la capacité des panneaux à recevoir le rayonnement solaire dans les meilleures conditions possibles. Cette performance est étroitement liée à leur orientation par rapport à la trajectoire du soleil. On distingue généralement deux types de configurations : les systèmes à panneaux fixes et les systèmes à panneaux mobiles équipés de suivi solaire.

X.1 Panneaux photovoltaïques fixes

Les panneaux solaires fixes sont installés avec une orientation et une inclinaison définies une seule fois lors de la mise en place, généralement choisies pour optimiser la réception moyenne de l'ensoleillement sur une année dans une région donnée. Ce type d'installation est apprécié pour sa simplicité de conception, sa robustesse et son faible coût, puisqu'il ne nécessite aucun dispositif mécanique de suivi ni maintenance complexe. Il est couramment utilisé dans les installations résidentielles, les petites centrales solaires et dans certaines zones isolées.

Toutefois, cette simplicité s'accompagne d'une limitation importante au niveau du rendement. En effet, la position du soleil change continuellement au cours de la journée ainsi qu'au fil des saisons. Un panneau fixe ne peut donc fonctionner à son rendement optimal que durant certaines périodes spécifiques. Cette contrainte entraîne une diminution de la production énergétique pouvant varier approximativement entre 20 % et 40 %, selon la localisation et les paramètres d'installation.

X.2 Panneaux photovoltaïques mobiles (ou suiveurs solaires)

Les systèmes photovoltaïques mobiles, appelés également suiveurs solaires, sont équipés de mécanismes permettant d'ajuster automatiquement l'orientation des panneaux en fonction du déplacement apparent du soleil. Ils peuvent fonctionner selon une configuration mono-axe (suivi d'une seule direction, généralement est-ouest ou nord-sud) ou bi-axe (suivi complet sur deux axes pour une orientation plus précise).

Le principe de ces dispositifs est de maintenir la surface des panneaux aussi perpendiculaire que possible aux rayons solaires tout au long de la journée, afin d'optimiser la quantité d'énergie captée. Grâce à ce suivi dynamique, ces systèmes permettent une amélioration notable du rendement énergétique, estimée en moyenne entre 25 % et 45 % par rapport aux installations fixes.

Critère	Panneaux fixes	Panneaux mobiles
---------	----------------	------------------

Coût d'installation	Faible	Élevé (mécanique + commande)
Maintenance	Très faible	Moyenne à élevée
Production énergétique	Variable, dépend de l'angle fixe	Optimisée toute la journée
Complexité	Simple (aucune motorisation)	Complexe (moteurs, capteurs, algorithmes)
Durée de vie	Longue (peu de pièces mobiles)	Potentiellement réduite (usure mécanique)
Utilisation typique	Résidentiel, petites installations	Fermes solaires, sites à fort potentiel

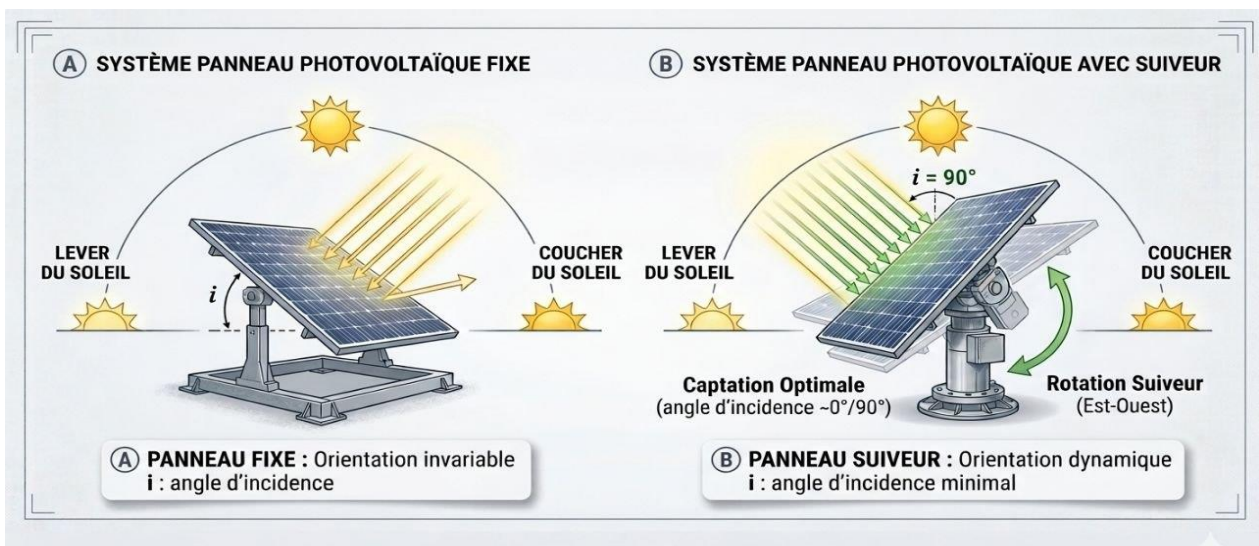


Figure 13: Un panneau photovoltaïque fixe (a) et avec système suiveur (b).

Le graphique comparatif de la production électrique (Figure II-7) met en évidence, pour une journée estivale bien ensoleillée, l'augmentation de l'énergie produite lorsqu'on passe d'un système à panneaux fixes à une installation équipée d'un suiveur solaire.

Dans des conditions d'ensoleillement optimales, une installation fixe d'une puissance de 1 kW correctement orientée peut générer environ 5,5 kWh sur une journée. En revanche, le même système muni d'un dispositif de suivi solaire, et soumis aux mêmes conditions, peut atteindre une production d'environ 11 kWh, soit un gain énergétique significatif.

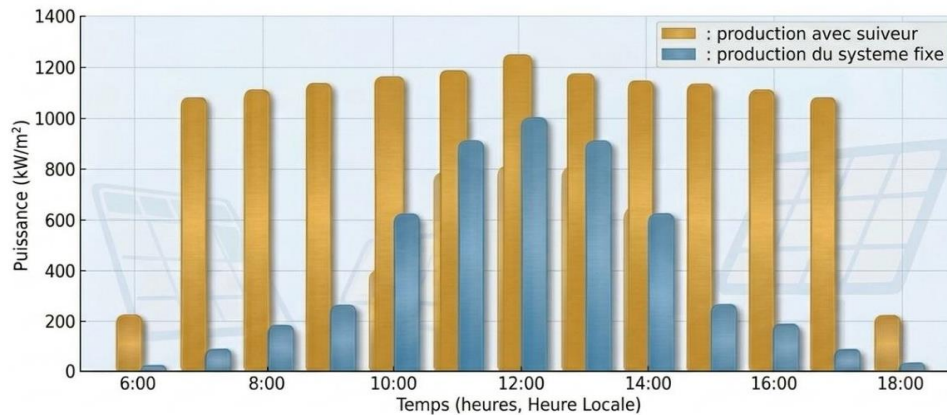


Figure 14: Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production

Le choix entre une installation de panneaux fixes et un système de panneaux mobiles dépend principalement des objectifs de production énergétique, des ressources financières disponibles ainsi que des contraintes techniques propres au site d'implantation. Les systèmes fixes sont souvent privilégiés pour leur simplicité, leur fiabilité et leur coût relativement faible. En revanche, les systèmes à suivi solaire sont davantage adaptés lorsque l'objectif est d'optimiser au maximum la production d'énergie, notamment dans les zones bénéficiant d'un fort ensoleillement.

VII. Limites des systèmes classiques de tracking

Malgré les performances intéressantes qu'ils offrent, les systèmes de suivi solaire présentent plusieurs contraintes d'ordre technique, économique et pratique. L'une des principales limites concerne leur sensibilité aux conditions climatiques, notamment au vent. Lorsque la vitesse de celui-ci dépasse un certain seuil (de l'ordre de 11 à 14 m/s), les suiveurs sont automatiquement placés en position de sécurité afin de prévenir tout risque de détérioration mécanique. Cette mesure entraîne une interruption temporaire de la production d'énergie, ce qui peut constituer un inconvénient dans les régions fortement exposées aux vents.

Par ailleurs, l'investissement initial nécessaire à l'installation de ces systèmes est généralement plus élevé que celui des installations fixes. Cela s'explique par l'intégration de composants supplémentaires tels que les moteurs, les capteurs et les dispositifs de commande. Cette complexité accrue peut également engendrer une augmentation des risques de défaillance, impliquant des opérations de maintenance plus fréquentes et parfois coûteuses.

En outre, certaines contraintes pratiques et réglementaires doivent être prises en compte. Les suiveurs solaires occupent un espace important afin de permettre leur mouvement sans obstruction, ce qui peut limiter leur implantation dans des zones restreintes. De plus, leur installation peut nécessiter des autorisations administratives spécifiques, susceptibles de rallonger les délais de mise en œuvre.

En conclusion, bien que les systèmes de suivi solaire permettent d'optimiser la production d'énergie photovoltaïque, leur utilisation doit être évaluée avec précaution. Le choix entre un système fixe et un système à suivi dépendra des conditions environnementales, des contraintes techniques, ainsi que des ressources financières disponibles.

XI.1 Typologie des suiveurs solaires

L'intérêt croissant pour les systèmes de suivi solaire s'explique par leur capacité à améliorer significativement le rendement des installations photovoltaïques, malgré certaines contraintes d'ordre technique. Dans cette optique, il apparaît essentiel d'analyser les différentes configurations existantes afin de mieux appréhender leur fonctionnement et leurs domaines d'application.

Les suiveurs solaires peuvent ainsi être classés selon plusieurs critères, notamment leur mode de déplacement, leur architecture de commande ou encore le nombre de degrés de liberté qu'ils possèdent. Cette classification permet de mettre en évidence la diversité des solutions technologiques disponibles et d'orienter le choix vers le système le plus approprié en fonction des exigences spécifiques de chaque projet.

XI.2 Mécanismes d'orientation (systèmes de positionnement)

Le principe de fonctionnement d'un suiveur solaire repose sur une stratégie de commande visant à ajuster en continu l'orientation du dispositif afin de maintenir un alignement optimal avec la position du soleil. Cette démarche a pour objectif principal de maximiser la captation du rayonnement solaire et, par conséquent, la production d'énergie.

De manière générale, la commande des actionneurs est considérée comme une problématique bien maîtrisée. Toutefois, la conception du système de pilotage peut intégrer d'autres objectifs, tels que la réduction de la consommation énergétique propre au dispositif ou encore l'adaptation aux variations des conditions environnementales, notamment climatiques.

Selon la nature du système de commande et la méthode de détection ou de positionnement utilisée, les suiveurs solaires peuvent être regroupés en deux grandes catégories. Cette distinction permet de mieux comprendre les approches adoptées pour assurer le suivi du soleil et d'évaluer leurs performances respectives dans différents contextes d'exploitation.

XI.3 Types de commande

De nombreux travaux de recherche ont été consacrés aux méthodes de commande des suiveurs solaires, notamment dans les systèmes photovoltaïques (PV) et à concentration (CPV). De manière générale, on distingue trois principales familles de stratégies de contrôle. La troisième est dite hybride, car elle combine les caractéristiques des deux premières approches, à savoir la commande en boucle ouverte et la commande en boucle fermée.

Commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte (Figure II.7) correspond à une stratégie de poursuite active basée exclusivement sur des calculs astronomiques permettant de déterminer la position du soleil, à partir des éphémérides, sans recourir à une mesure directe de cette position.

Dans ce cas, les consignes de suivi du tracker solaire — notamment les angles d'azimut et d'élévation — sont générées à partir de l'heure ainsi que des coordonnées géographiques

(GPS) de l'installation.

Comme toute approche en boucle ouverte, ce type de commande présente une sensibilité élevée aux perturbations, puisqu'il ne dispose d'aucune rétroaction corrective, et peut également être affecté par des erreurs liées à la modélisation ou aux calculs utilisés.

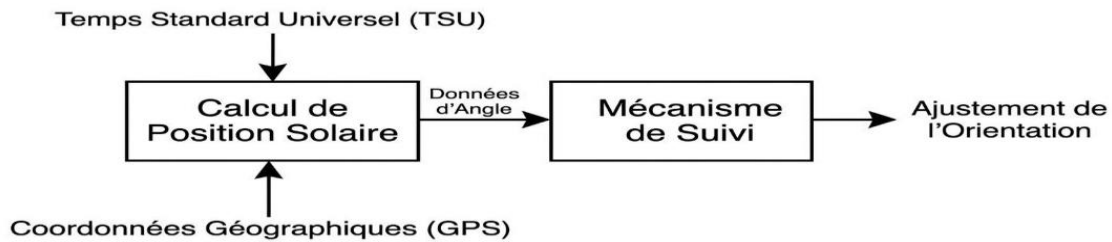


Figure 15: Commande en boucle ouverte d'un tracker PV.

Commande en boucle fermée

La commande en boucle fermée est une stratégie de contrôle active qui utilise le retour d'information issu de la mesure de l'erreur de suivi pour piloter les actionneurs du système de tracking solaire. Cette erreur, illustrée sur la Figure II.8, est généralement obtenue à l'aide d'un capteur solaire, souvent appelé viseur solaire.

Dans certaines applications, le signal de retour peut ne pas représenter directement l'erreur angulaire, mais plutôt la puissance électrique délivrée par le module photovoltaïque.

De ce fait, cette méthode consiste à ajuster en permanence l'orientation du tracker en fonction des mesures effectuées, en se rapprochant progressivement de la position offrant le meilleur rendement, et ce, quelle que soit la position initiale du système (même aléatoire).

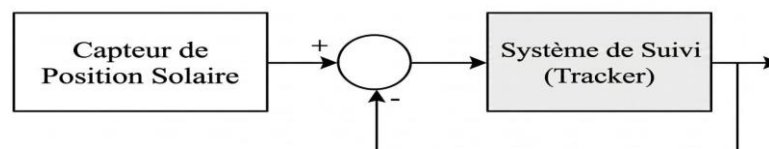


Figure 16: Commande en boucle fermée d'un tracker

Commande hybride

La commande hybride est une stratégie de suivi qui associe les principes de la commande en boucle ouverte et ceux de la commande en boucle fermée. Elle repose à la fois sur le calcul de la position de référence, issu de l'approche en boucle ouverte, et sur les informations de retour fournies par la boucle fermée.

Ainsi, cette méthode permet de profiter simultanément de la précision des mesures en temps réel et de la prévision de la trajectoire solaire, afin d'améliorer la performance globale du système de poursuite.

VIII. Introduction aux approches intelligentes (IA) pour l'optimisation

L'orientation des panneaux solaires (inclinaison et azimut) joue un rôle essentiel dans l'optimisation de la production d'énergie photovoltaïque. Toutefois, les méthodes classiques, qu'il s'agisse d'angles fixes ou de systèmes de suivi solaire déterministes, ne prennent pas suffisamment en considération les variations locales telles que les nuages, l'ombrage, la poussière, le vent ou l'encrassement des panneaux.

À l'inverse, les approches basées sur l'intelligence artificielle (IA) et le machine learning (ML) permettent une optimisation dynamique et en temps réel, en s'appuyant sur l'analyse de grandes quantités de données (conditions météorologiques, irradiance, production énergétique, images du ciel). Ces méthodes contribuent à améliorer significativement le rendement des systèmes photovoltaïques.

VIII.1. Pourquoi l'IA est-elle pertinente ?

L'intelligence artificielle est particulièrement adaptée à ce domaine en raison de sa capacité à traiter des systèmes complexes et influencés par de nombreux facteurs variables tels que les

nuages, l'ombre, la poussière ou encore la réflexion des panneaux bifaciaux.

Elle est également capable d'exploiter efficacement les grandes quantités de données provenant des capteurs IoT, des stations météorologiques et des satellites.

Enfin, contrairement aux méthodes classiques, l'IA permet une adaptation continue en temps réel et peut anticiper les variations des conditions environnementales afin d'améliorer les performances du système.

VIII.2. Principales approches basées sur l'IA

Les approches supervisées de machine learning, telles que Random Forest, SVR, LSTM ou MLP, sont utilisées pour estimer les angles optimaux (inclinaison et azimuth) à partir de données météorologiques et temporelles. Elles conviennent particulièrement aux systèmes fixes ou à ajustement saisonnier.

L'apprentissage par renforcement (RL et Deep RL) est particulièrement adapté aux systèmes de suivi solaire, où l'agent apprend progressivement à optimiser la production énergétique par essais et erreurs, sans nécessiter un modèle physique détaillé.

La vision par ordinateur, notamment à travers les réseaux de neurones convolutifs (CNN), permet d'analyser des images du ciel afin de détecter les conditions nuageuses et d'améliorer les décisions de suivi.

Enfin, les approches hybrides combinent les modèles d'apprentissage automatique avec des modèles physiques, l'Edge AI basé sur l'IoT, ainsi que des stratégies d'optimisation multi-objectifs prenant en compte la production d'énergie, l'usure mécanique et les coûts de fonctionnement.

VIII.3. Avantages concrets

- Gain de production notable, surtout en conditions nuageuses, ombrage ou forte poussière.
- Maintenance prédictive via détection d'anomalies.
- Forte adaptabilité au climat algérien (nord méditerranéen et sud désertique).
- Meilleure optimisation de l'auto-consommation , industrielle et agricole.

VIII.4. Défis et Perspectives

- Défis :

- Manque de données locales de qualité ...
- Complexité de calcul des modèles Deep RL.
- Coût initial élevé des trackers motorisés + IA.
- Besoin d'hybridation physique-IA pour la fiabilité.

- Perspectives :

- Intégration avec les jumeaux
- Numériques, Edge Computing et optimisation multi-objectif.

IX. Conclusion

Au terme de ce chapitre, une analyse approfondie du suivi solaire appliqué aux systèmes photovoltaïques a été menée, mettant en évidence les paramètres déterminants qui conditionnent la performance énergétique globale. L'étude a notamment souligné l'impact critique de l'orientation et de l'inclinaison des modules, en lien direct avec l'optimisation de l'irradiation incidente et, par conséquent, du rendement du système.

L'évaluation comparative entre les systèmes fixes et les dispositifs à suivi a permis de démontrer que les suiveurs solaires constituent une solution efficace pour maximiser la production énergétique. Néanmoins, ce gain de performance s'accompagne d'exigences supplémentaires en termes de conception mécanique, de consommation énergétique auxiliaire, de fiabilité et de coûts d'exploitation.

Par ailleurs, l'analyse des différentes architectures de suiveurs (mono-axe et bi-axe) ainsi que des stratégies de commande associées (approches basées capteurs et modèles) a permis de mettre en évidence les compromis entre précision de suivi, complexité algorithmique et robustesse du système. Ces éléments sont essentiels pour le choix d'une solution adaptée à un contexte d'exploitation donné.

L'étude du système réalisé a également permis d'illustrer concrètement l'interaction entre la chaîne d'information (capteurs, traitement, algorithmes de commande) et la chaîne d'énergie (actionneurs, structure mécanique), soulignant l'importance d'une intégration cohérente pour garantir la stabilité, la réactivité et la fiabilité du dispositif.

En perspective, l'intégration de techniques avancées, notamment basées sur l'intelligence artificielle, ouvre des opportunités significatives pour améliorer davantage les performances des systèmes de suivi solaire, en introduisant des capacités d'adaptation, de prédiction et d'optimisation en temps réel.

Ainsi, le suivi solaire s'impose comme un levier stratégique pour l'amélioration du rendement des installations photovoltaïques, à condition de maîtriser les contraintes technologiques et d'adopter une approche de conception rigoureuse et optimisée.

CHAPITRE 03

Conception et réalisation du système expérimental

I. Introduction

Dans un monde en pleine transition énergétique, où la quête de solutions durables devient une priorité, l'énergie solaire émerge comme l'une des alternatives les plus viables et prometteuses aux énergies conventionnelles. Les panneaux photovoltaïques, qui transforment directement le rayonnement solaire en électricité, constituent une technologie centrale de cette révolution. Cependant, leur performance reste fortement influencée par leur orientation par rapport à la trajectoire du soleil.

Pour maximiser le rendement énergétique, le recours à des systèmes de suivi solaire s'avère indispensable. Ces dispositifs permettent d'orienter automatiquement les panneaux tout au long de la journée en fonction de la position du soleil. C'est dans cette optique que s'inscrit le présent projet, qui consiste à concevoir, développer et mettre en œuvre un système intelligent de poursuite solaire visant à améliorer significativement l'efficacité des installations photovoltaïques.

Ce chapitre est consacré aux aspects pratiques de la réalisation du projet. Après avoir exposé les fondements théoriques dans les chapitres précédents, il détaille les différentes étapes de la conception et de l'implémentation technique du système. L'objectif final est de proposer une solution fiable, entièrement automatisée et optimisée sur le plan énergétique, répondant aux exigences actuelles du secteur des énergies renouvelables.

II. Présentation générale du système

Le système étudié est un dispositif de suivi solaire intelligent (Solar Tracker) conçu pour optimiser l'orientation des panneaux photovoltaïques afin de maximiser la production d'énergie. Contrairement aux installations fixes, ce système ajuste automatiquement la position du panneau en fonction de la position du soleil tout au long de la journée.

Il est composé principalement d'une structure mécanique mobile, de capteurs de luminosité (LDR) permettant de détecter l'intensité lumineuse, d'une carte de commande (telle qu'un microcontrôleur ESP32), ainsi que de moteurs (servomoteurs) assurant le déplacement selon un ou deux axes (horizontal et vertical).

Le principe de fonctionnement repose sur la comparaison des valeurs mesurées par les capteurs. Lorsque une différence d'éclairement est détectée, le système commande les moteurs pour orienter le panneau vers la direction où l'intensité lumineuse est maximale. Ce mécanisme permet d'assurer un suivi continu et précis du soleil.

En complément, le système peut intégrer des modules de communication (comme Blynk IoT) pour la supervision à distance, ainsi que des capteurs supplémentaires (température, courant, tension) afin de surveiller les performances énergétiques en temps réel.

Ainsi, ce système constitue une solution efficace pour améliorer le rendement des installations photovoltaïques, notamment dans les régions à fort ensoleillement comme l'Algérie.

III. Architecture matérielle

Le système repose sur un ensemble de composants matériels assurant la mesure, le traitement et l'action mécanique. Il se compose principalement des éléments suivants:

- **Capteurs** : Les capteurs jouent un rôle essentiel dans l'acquisition des données. On distingue notamment :
 - Capteurs de courant permettant de mesurer l'intensité produite par le panneau photovoltaïque.

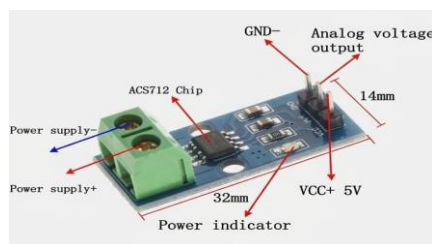


Figure 17: Capteur Current Sensor Module (ACS712)

- Capteurs de tension pour suivre la variation de la tension électrique.

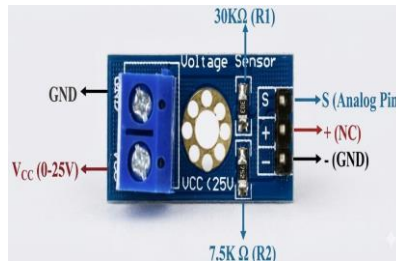


Figure 18: Capteur Voltage Sensor Module

- Capteurs d'humidité et de température utilisés pour surveiller les conditions environnementales (comme le DHT11) permettant de mesurer le taux d'humidité et la température ambiante.

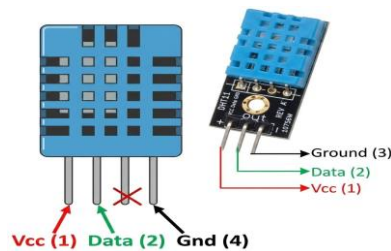


Figure 19: Capteur de température et d'humidité DHT11

- Capteurs de luminosité (LDR) servant à détecter la direction du rayonnement solaire.

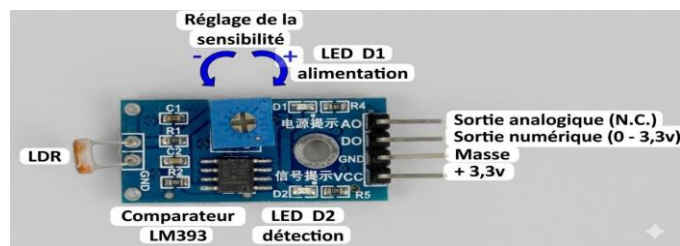


Figure 20: Module capteur de lumière (LDR)

- **Carte de contrôle :** Le traitement des informations est assuré par une carte de contrôle telle qu'un microcontrôleur (Arduino ou ESP32). Cette unité analyse les données des capteurs et envoie des commandes aux actionneurs.

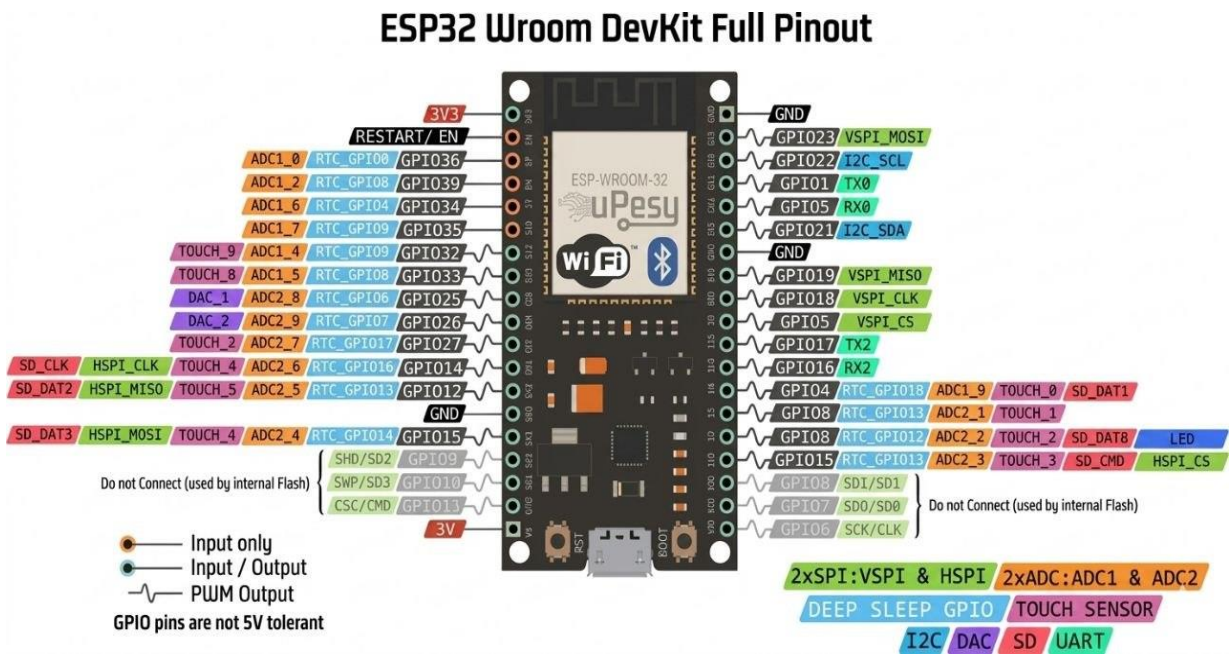


Figure 21: Schéma complet des broches (Pinout) de l'ESP32-WROOM DevKit

- **Actionneurs :** Le système utilise deux moteurs pour assurer un suivi solaire sur deux axes :
 - Un premier moteur assure le mouvement vertical (de bas en haut), appelé axe d'élévation, permettant d'ajuster l'inclinaison du panneau.
 - Un deuxième moteur assure le mouvement horizontal (de droite à gauche), appelé axe d'azimut, permettant de suivre la trajectoire du soleil d'est en ouest.

Cette configuration à deux axes permet d'optimiser l'exposition du panneau solaire tout au long de la journée, garantissant ainsi un rendement énergétique maximal.

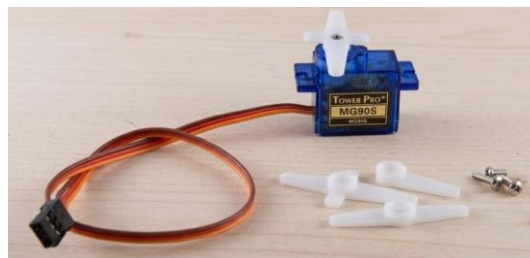


Figure 22: Servomoteur

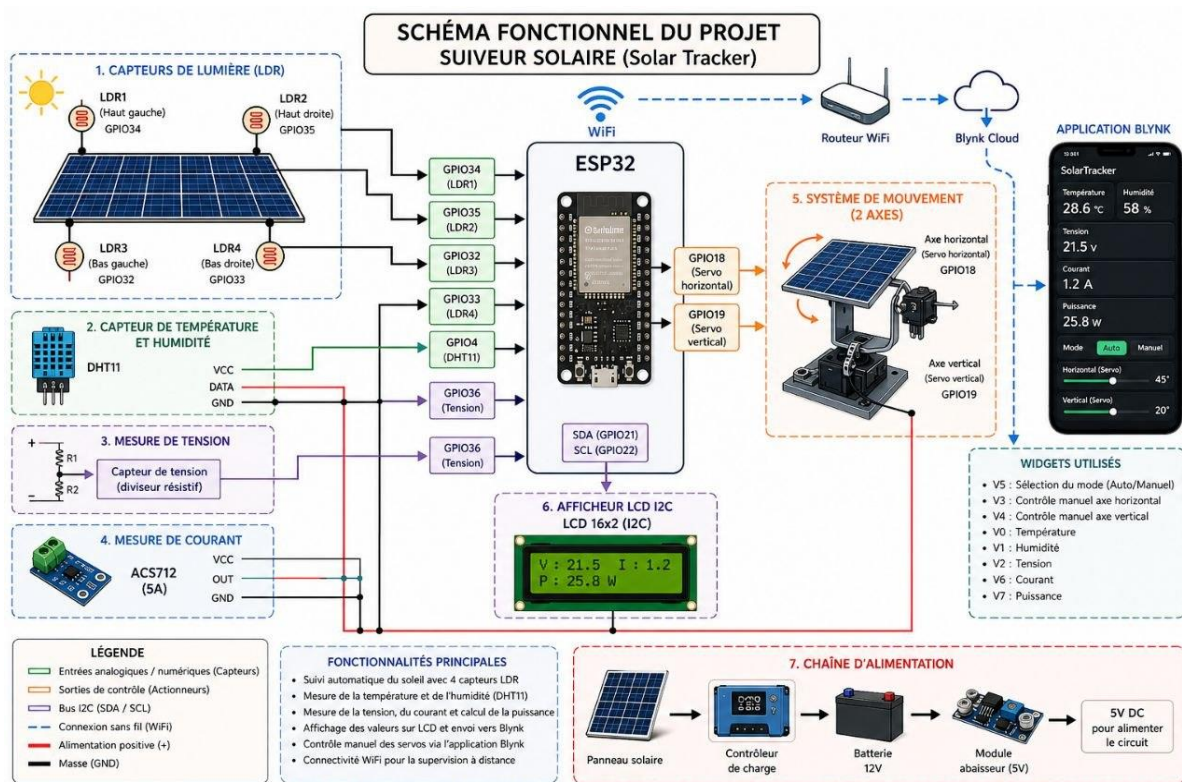


Figure 23: Schéma fonctionnel global du système suiveur solaire.

IV. Architecture logicielle

IV.1 Algorithme de suivi solaire

Le système utilise des capteurs LDR pour mesurer l'intensité lumineuse selon عدة directions. Les données sont traitées par une carte ESP32 qui compare les valeurs afin de déterminer l'orientation optimale du panneau solaire.

Le suivi adopté est de type actif (Active Tracking), basé sur des mesures en temps réel. Une boucle de contrôle ajuste progressivement les moteurs jusqu'à atteindre un équilibre lumineux entre les capteurs opposés.

Un écran LCD affiche les grandeurs électriques principales :

le courant $i(A)$

la tension $v(V)$

la puissance $P(W)$

La puissance est donnée par : $P = v \times i$

Un seuil est intégré pour éviter les mouvements inutiles en cas de faible variation lumineuse, améliorant ainsi la stabilité et la durabilité du système.

Le dispositif fonctionne avec un suivi à deux axes, assurant une meilleure orientation du panneau et un rendement énergétique optimisé.

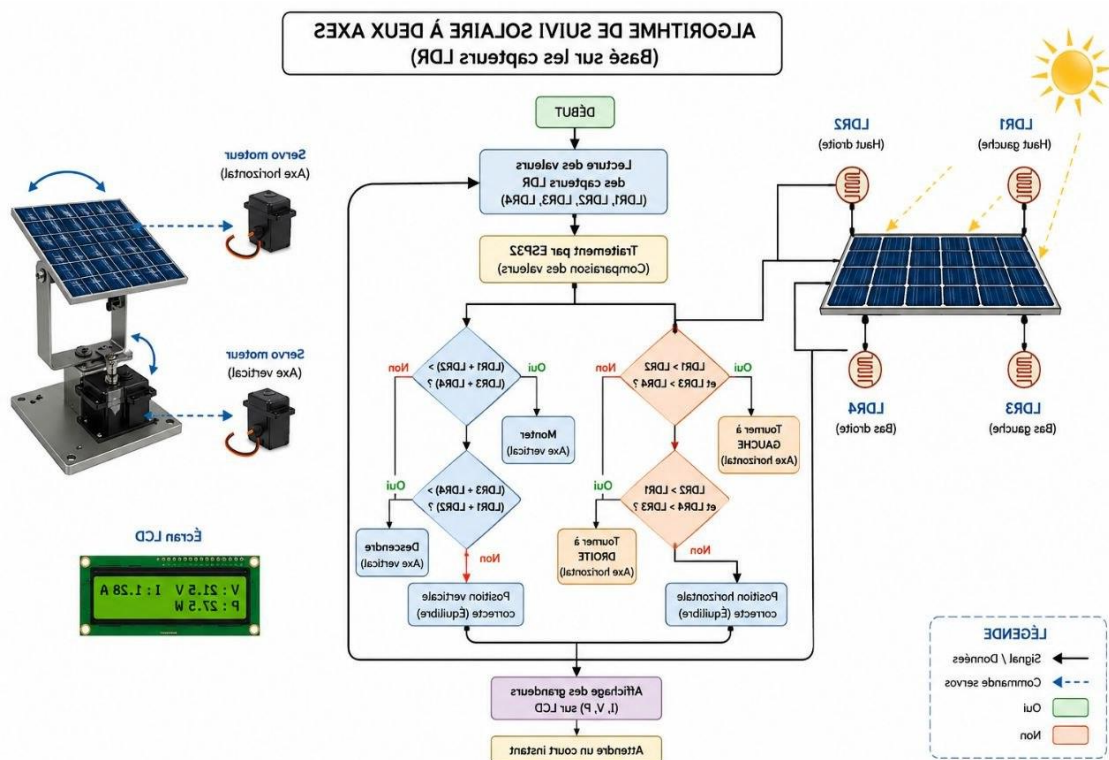


Figure 24: Organigramme de l'algorithme de suivi solaire à deux axes basé

IV.2 Programmation embarquée

Le code principal utilisé dans ce système est présenté ci-dessous :

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL2VM-jrrFe"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "SolarTracker"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "50DlTtvewofUWTM2tzzIpLisGQ6iaWO2"

#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <ESP32Servo.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// --- WiFi ---
char ssid[] = "A1S";
char pass[] = "98765432";

// --- LCD ---
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

// --- DHT ---
#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// --- Servo ---
Servo servoH;
Servo servoV;

int posH = 45;
int posV = 20;

// --- Mode ---
int mode = 0;

// --- LDR ---
int ldr1 = 34;
int ldr2 = 35;
int ldr3 = 32;
int ldr4 = 33;

// --- Voltage ---
int voltagePin = 36;

// --- Current ---
int currentPin = 39;

// --- Variables ---
float voltage = 0;
float current = 0;
float power = 0;

int tolerance = 40;

BlynkTimer timer;

// --- Mode Button ---
BLYNK_WRITE(V5)
{
    mode = param.asInt();
}
```

```

// --- Manual Control ---
BLYNK_WRITE(V3)
{
  if(mode == 1)
  {
    posH = param.asInt();
    servoH.write(posH);
  }
}

BLYNK_WRITE(V4)
{
  if(mode == 1)
  {
    posV = param.asInt();
    servoV.write(posV);
  }
}

// --- Solar Tracking ---
void solarTracking()
{
  if(mode == 0)
  {
    int L1 = analogRead(ldr1);
    int L2 = analogRead(ldr2);
    int L3 = analogRead(ldr3);
    int L4 = analogRead(ldr4);

    int top = (L1 + L2)/2;
    int bottom = (L3 + L4)/2;
    int left = (L1 + L3)/2;
    int right = (L2 + L4)/2;

    if(abs(top - bottom) > tolerance)
    {
      posV += (top > bottom) ? 1 : -1;
      posV = constrain(posV, 0, 180);
      servoV.write(posV);
    }

    if(abs(left - right) > tolerance)
    {
      posH += (left > right) ? 1 : -1;
      posH = constrain(posH, 0, 180);
      servoH.write(posH);
    }
  }

  Blynk.virtualWrite(V3, posH);
  Blynk.virtualWrite(V4, posV);
}

// --- Sensors ---
void readSensors()
{
  float temp = dht.readTemperature();
  float hum = dht.readHumidity();

```

```

}

void setup()
{
    Serial.begin(115200);

    Wire.begin(21,22);
    lcd.init();
    lcd.backlight();

    servoH.setPeriodHertz(50);
    servoV.setPeriodHertz(50);

    servoH.attach(18);
    servoV.attach(19);

    dht.begin();

    Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);

    timer.setInterval(500L, solarTracking);
    timer.setInterval(2000L, readSensors);
}

void loop()
{
    Blynk.run();
    timer.run();
}

```

```

// Voltage
voltage = analogRead(voltagePin) * (3.3 / 4095.0) * 5;

// Current (ACS712)
float adc = analogRead(currentPin) * (3.3 / 4095.0);
current = (adc - 2.5) / 0.185; // 5A version

// Power
power = voltage * current;

// Blynk
Blynk.virtualWrite(V0,temp);
Blynk.virtualWrite(V1,hum);
Blynk.virtualWrite(V2,voltage);
Blynk.virtualWrite(V6,current);
Blynk.virtualWrite(V7,power);

// LCD
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("V:");
lcd.print(voltage,1);
lcd.print(" I:");
lcd.print(current,1);

lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("P:");
lcd.print(power,1);
lcd.print("W");

```

-
- Le programme embarqué a été développé sous l'environnement Arduino IDE.
 - Il assure la lecture des capteurs de luminosité LDR, du capteur de température et d'humidité DHT11, du capteur de tension et du capteur de courant ACS712.
 - Il permet également de commander les servomoteurs selon deux axes afin d'orienter le panneau photovoltaïque vers la position optimale.
 - Il assure le fonctionnement autonome du système de suivi solaire. Ses principales fonctions sont :
 - **Lecture des capteurs** : acquisition des signaux analogiques provenant des capteurs LDR.
 - **Traitement des données** : comparaison des valeurs mesurées afin de détecter la direction de la lumière la plus intense.
 - **Contrôle des moteurs** : commande des servomoteurs pour orienter le panneau solaire vers la position optimale.
 - **Boucle de contrôle (loop)** : exécution continue des opérations pour garantir un suivi dynamique en temps réel.

Le programme intègre également un écran LCD permettant d'afficher les paramètres électriques tels que le courant, la tension et la puissance, ainsi que l'état général du système.

V. Réalisation du prototype

Cette section constitue une étape essentielle du travail, car elle permet de valider expérimentalement les choix théoriques et les modèles proposés. Le prototype développé représente une implémentation concrète d'un système photovoltaïque intelligent intégrant un mécanisme de suivi solaire automatisé. L'objectif est de démontrer la faisabilité technique du système tout en assurant des performances mécaniques, électriques et de contrôle satisfaisantes.

Le prototype a été conçu selon une approche systémique combinant la conception mécanique, l'intégration électronique et la mise en œuvre logicielle.

V.1 Conception mécanique

Objectif scientifique

La conception mécanique du système de suivi solaire vise à garantir plusieurs objectifs fondamentaux :

- Assurer une orientation optimale du panneau photovoltaïque par rapport à la position du soleil
- Garantir la stabilité mécanique du système en conditions extérieures.
- Réduire les vibrations induites par le mouvement des actionneurs.
- Améliorer la précision du positionnement angulaire.
- Minimiser la consommation énergétique des actionneurs.

Ces contraintes sont directement liées aux performances globales du système photovoltaïque, notamment en termes de rendement énergétique et de durabilité.

a) Cahier des charges mécanique

La conception du système repose sur un ensemble de contraintes techniques définissant le cahier des charges mécanique.

Plage angulaire de fonctionnement

Le système de suivi doit permettre une rotation suffisante pour couvrir la trajectoire solaire :

- **Axe azimutal** : $0^\circ \rightarrow 180^\circ$
- **Axe d'inclinaison** : $0^\circ \rightarrow 90^\circ$

Cette configuration permet de suivre le mouvement apparent du soleil sur une large plage horaire et saisonnière.

Contraintes mécaniques

Le dimensionnement du système prend en compte plusieurs contraintes physiques :

- Masse du panneau photovoltaïque.
- Efforts liés au vent (pression dynamique).

-
- Vibrations mécaniques dues aux mouvements rapides.
 - Exposition à la poussière et aux conditions environnementales.
 - Limitation de la consommation énergétique des moteurs.

Dimensionnement du couple moteur

Le choix des actionneurs repose sur le calcul du couple nécessaire pour assurer le mouvement du panneau.

Le couple mécanique est défini par :

$$T = F * r$$

Où :

- (T) est le couple moteur (N·m),
- (F) la force appliquée,
- (r) le bras de levier.

Puissance mécanique

La puissance mécanique associée au mouvement du système est donnée par :

$$P = T\omega$$

Où :

- (P) est la puissance mécanique,
- (T) le couple,
- (ω) la vitesse angulaire.

b) Structure mécanique du tracker solaire

Le système mécanique développé est constitué de plusieurs sous-ensembles assurant la stabilité et la mobilité du panneau photovoltaïque :

- **Châssis principal** : structure porteuse assurant la rigidité globale.
- **Support du panneau** : interface mécanique de fixation du module photovoltaïque.
- **Axes de rotation** : permettant le mouvement selon les degrés de liberté définis.

-
- **Système de transmission** : assurant la conversion du mouvement moteur en rotation du panneau.
 - **Système de fixation des moteurs** : garantissant la stabilité des actionneurs.

Les matériaux utilisés ont été sélectionnés en fonction de critères de résistance mécanique et de légèreté :

- Aluminium pour la structure principale.
- Acier galvanisé pour les éléments soumis à des efforts élevés.
- Impression 3D pour certaines pièces de support et de prototypage rapide.

Illustrations recommandées

Pour renforcer la qualité scientifique du manuscrit, il est fortement recommandé d'inclure :

- Modèle 3D du prototype complet.
- Schéma cinématique du système de rotation.
- Plan coté avec dimensions détaillées.
- Représentation des axes de mouvement.
- Photographies du prototype réel.

V.2 Assemblage du système

Cette section décrit la phase d'intégration pratique du prototype, regroupant l'assemblage mécanique et l'intégration électronique.

a) Étapes d'assemblage

Le montage du système a été réalisé selon une procédure progressive garantissant la précision et la fiabilité du prototype :

- Fixation de la base mécanique du système.
- Installation des axes de rotation (azimut et inclinaison).
- Montage des moteurs sur les supports dédiés.
- Fixation du panneau photovoltaïque sur la structure.

- Câblage des capteurs et des modules de mesure.
- Intégration de la carte de contrôle (microcontrôleur).

Chaque étape a été validée individuellement afin de garantir la stabilité mécanique et la cohérence fonctionnelle du système.

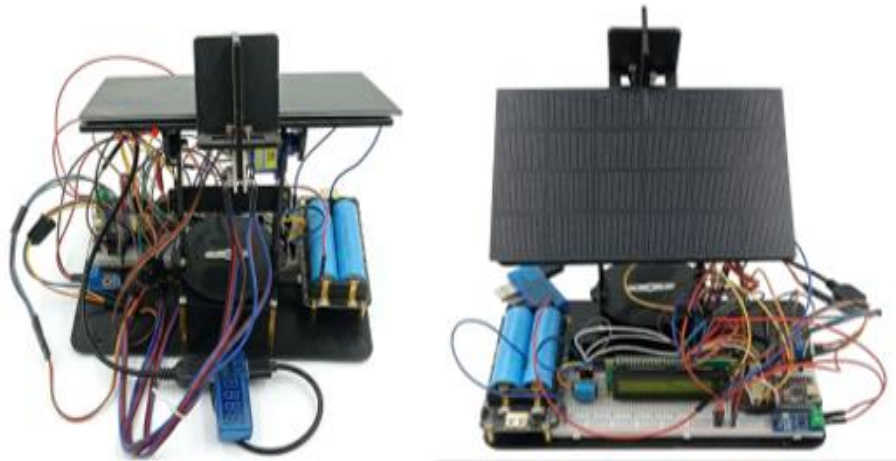


Figure 25: Montage mécanique

b) Intégration électronique

L'architecture électronique assure l'interconnexion entre les capteurs, les actionneurs et le système de contrôle.

Elle comprend :

- Un système d'alimentation stabilisé pour les différents composants.
- Des dispositifs de protection électrique (fusibles, régulation de tension).
- Un réseau de câblage structuré pour la transmission des signaux.
- Des convertisseurs analogique-numérique pour la lecture des capteurs.
- Des drivers moteurs pour le contrôle précis des actionneurs.

Cette intégration garantit la fiabilité du système et permet une communication efficace entre les différents modules.

Tableau des composants

Élément	Référence	Fonction
Carte de contrôle	ESP32-WROOM DevKit	Traitement et contrôle du système
Capteur de courant	ACS712	Mesure du courant électrique
Capteur de voltage	DCVS30	Mesure du voltage électrique
Actionneur	Servo moteur MG996R	Orientation du panneau
Capteur de luminosité	LDR	Détection de l'intensité lumineuse

Cette étape de conception et de réalisation du prototype constitue une validation expérimentale essentielle du système proposé. Elle permet de confirmer la faisabilité mécanique et électronique du dispositif de suivi solaire, tout en préparant l'intégration des algorithmes d'intelligence artificielle pour l'optimisation de l'orientation du panneau photovoltaïque.

VI. Acquisition des données

L'acquisition des données constitue une étape fondamentale dans ce travail, car elle conditionne directement la qualité du modèle d'intelligence artificielle développé par la suite. Une instrumentation rigoureuse du système photovoltaïque a été mise en place afin de collecter des données représentatives du comportement réel du système dans des conditions d'exploitation variées.

L'objectif principal de cette phase est de constituer une base de données cohérente, structurée et exploitable pour l'apprentissage automatique, en intégrant simultanément les variables électriques, environnementales et géométriques.

VI.1. Paramètres mesurés

Les données acquises ont été regroupées en trois catégories principales afin de décrire de manière complète le fonctionnement du système photovoltaïque.

a) Variables électriques

Les grandeurs électriques constituent les indicateurs directs de performance du système photovoltaïque. Elles ont été mesurées en temps réel à l'aide de capteurs dédiés.

- **Tension du panneau photovoltaïque : V**
- **Courant produit : I**
- **Puissance électrique instantanée : $P=V \times I$**

Ces variables permettent d'évaluer en continu le rendement énergétique du système et d'analyser l'impact de l'orientation du panneau sur la production électrique.

b) Variables environnementales

Les conditions environnementales influencent directement les performances des systèmes photovoltaïques. Afin de mieux caractériser ces effets, plusieurs paramètres climatiques ont été intégrés dans le processus d'acquisition :

- Température ambiante.
- Température de surface du panneau photovoltaïque.
- Irradiance solaire.
- Humidité relative.
- Vitesse du vent (optionnelle selon les conditions expérimentales).

Ces variables permettent de modéliser l'influence des conditions météorologiques sur la production énergétique et d'améliorer la précision du modèle d'intelligence artificielle.

c) Variables géométriques

Les variables géométriques décrivent la position relative du panneau par rapport au soleil et constituent un élément clé dans le processus d'optimisation du suivi solaire.

Les principales variables considérées sont :

- L'angle d'inclinaison du panneau.
- L'angle azimutal.
- La position instantanée du système de suivi.

Ces paramètres permettent de relier directement l'orientation mécanique du système à la quantité d'énergie solaire captée.

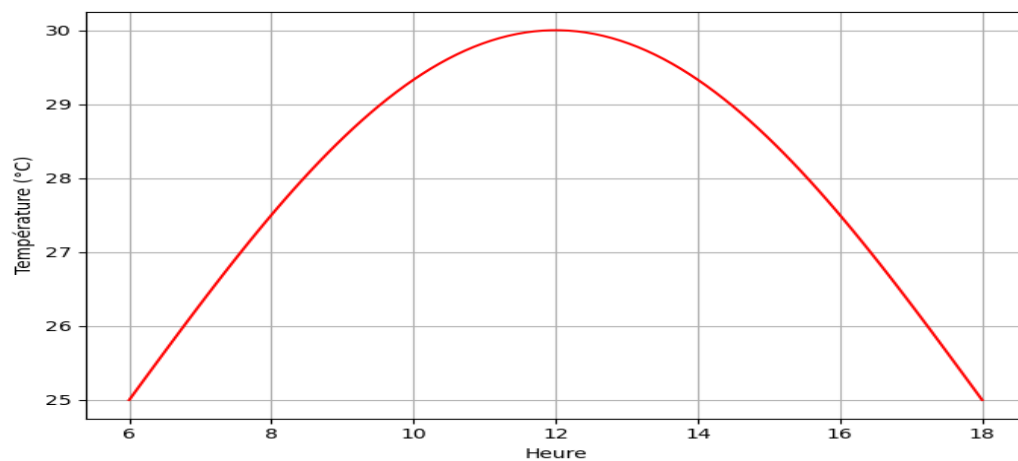


Figure 26: Température du panneau

Cette courbe représente l'évolution de la température du panneau solaire au cours de la journée. Elle augmente avec l'irradiance solaire et atteint son maximum autour de midi avant de redescendre progressivement.

VI.2. Système d'acquisition

Le système d'acquisition a été conçu afin d'assurer une collecte fiable, continue et synchronisée des données issues des différents capteurs.

Plusieurs aspects techniques ont été pris en compte :

- **Fréquence d'échantillonnage :** définition de l'intervalle temporel entre deux mesures consécutives

-
- **Conversion analogique-numérique (CAN)** : transformation des signaux analogiques des capteurs en données numériques exploitables par le microcontrôleur.
 - **Stockage des données** : enregistrement local ou externe des mesures sous forme structurée (fichiers ou base de données).
 - **Transmission des données** : envoi des informations vers une unité de traitement ou une interface de supervision.

Dans ce travail, les données ont été acquises toutes les 30 secondes afin d'obtenir une résolution temporelle suffisante pour caractériser les variations dynamiques du rayonnement solaire et du comportement du système photovoltaïque.

VI.3. Conditions expérimentales

Les conditions expérimentales jouent un rôle déterminant dans l'interprétation des résultats et la validité scientifique du modèle développé. Elles doivent être clairement définies afin d'assurer la reproductibilité des expériences.

a) Localisation géographique

Les expérimentations ont été réalisées dans une zone caractérisée par les paramètres suivants :

- Ville d'expérimentation.
- Latitude du site.
- Longitude du site.
- Altitude par rapport au niveau de la mer.

Ces informations permettent de contextualiser les données solaires en fonction de la position géographique.

b) Conditions climatiques

Les tests ont été effectués dans des conditions météorologiques variées afin de garantir la robustesse du modèle :

- Saison d'expérimentation.
- Conditions du ciel (ensoleillé, partiellement nuageux, couvert).
- Température moyenne observée.

Ces variations permettent d'évaluer la performance du système dans des environnements réalistes et non idéalisés.

c) Période expérimentale

La période d'acquisition des données s'étend sur plusieurs semaines afin de couvrir des conditions solaires différentes :

- Période : janvier → mars 2026.
- Plage horaire : 08h00 → 18h00.

Cette durée permet d'inclure des variations journalières et saisonnières importantes du rayonnement solaire.

d) Synthèse des conditions expérimentales

Tableau III-2 : Synthèse des conditions expérimentales.

Paramètre	Valeur
Latitude	31.95° N
Longitude	5.32° E
Température moyenne	22 °C
Période d'expérimentation	Janvier → Mars 2026
Plage horaire	08h00 → 18h00
Intervalle d'acquisition	30 s

Cette phase d'acquisition des données constitue la base fondamentale du modèle d'intelligence artificielle développé dans ce travail. La diversité des variables mesurées, combinée à une méthodologie d'échantillonnage rigoureuse et à des conditions expérimentales réalistes, garantit la qualité et la pertinence de la base de données utilisée pour l'apprentissage et la validation du système de suivi solaire intelligent.

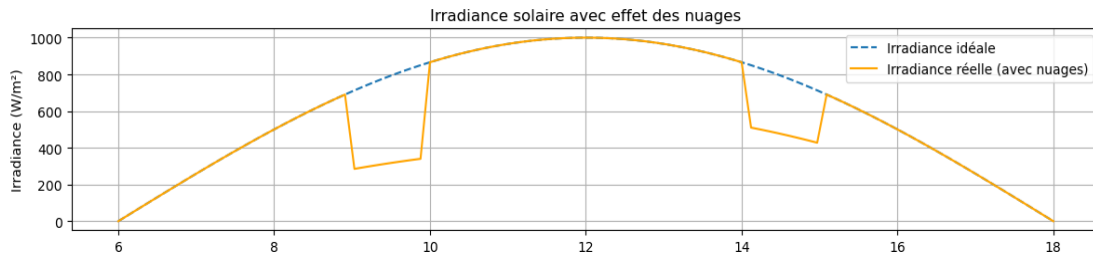


Figure 27: Irradiance solaire avec effet des nuages.

Cette courbe montre l'irradiance réelle en présence de passages nuageux. On observe des fluctuations locales et des baisses soudaines d'énergie reçue par rapport au cas idéal.

VII. Tests expérimentaux

Cette section a pour objectif de valider expérimentalement les performances du système développé. Elle permet de comparer différentes stratégies de suivi solaire et d'évaluer quantitativement l'apport de l'intelligence artificielle par rapport aux approches classiques et au système de référence fixe.

L'évaluation repose sur un protocole expérimental contrôlé afin de garantir la reproductibilité des résultats et la neutralité des conditions de test.

VII.1 Protocole de test

Afin d'assurer une comparaison rigoureuse, trois configurations distinctes ont été testées dans des conditions identiques.

- **Test 1 : Panneau fixe (référence)**

Objectif :

- Évaluer la production énergétique d'un panneau photovoltaïque sans système de suivi.
- Ce cas constitue la référence de base permettant de quantifier les gains apportés par les systèmes de tracking.

- **Test 2 : Tracking solaire classique**

Objectif :

- Mesurer le gain énergétique obtenu avec un système de suivi solaire traditionnel basé sur capteurs ou logique géométrique.
- Ce système permet une amélioration de l'orientation, mais reste limité par les erreurs de détection et les conditions environnementales.

- **Test 3 : Tracking basé sur intelligence artificielle**

Objectif :

- Évaluer les performances du système intelligent basé sur le modèle d'apprentissage automatique développé.
- Le système ajuste l'orientation du panneau en fonction de la prédiction de l'angle optimal sans dépendre exclusivement de capteurs optiques.

Conditions expérimentales contrôlées

Afin d'assurer une comparaison fiable, les conditions suivantes ont été strictement maintenues constantes :

- Même panneau photovoltaïque utilisé.
- Même localisation géographique.
- Mêmes conditions météorologiques ou fenêtres temporelles similaires.
- Même durée d'observation.
- Mêmes intervalles d'échantillonnage.

Cette homogénéité garantit la validité des résultats comparatifs.

VII.2 Validation du système

La validation du système repose sur plusieurs indicateurs quantitatifs permettant d'évaluer la performance énergétique, la précision de positionnement et la réactivité du système.

Gain énergétique

Le gain énergétique est défini par :

$$\eta = \frac{P_{\text{tracking}} - P_{\text{fixe}}}{P_{\text{fixe}}} \times 100$$

Ou :

- P_{tracking} est la puissance produit avec système de suivi.
- P_{fixe} est la puissance de panneau fixe.

Erreur de positionnement

$$e = |\theta_{\text{ref}} - \theta_{\text{mes}}|$$

Ou :

- θ_{ref} est l'angle optimal théorique.
- θ_{mes} est l'angle mesuré par le système.

Temps de réponse

Le temps de réponse correspond au délai nécessaire au système pour atteindre la position optimale après une variation significative de la position solaire. Cet indicateur est crucial pour évaluer la réactivité du système de tracking.

Validation statistique

Afin de renforcer la robustesse de l'analyse, plusieurs indicateurs statistiques ont été utilisés :

- Moyenne des performances.
- Variance des mesures.
- Erreur quadratique moyenne (RMSE).
- Erreur absolue moyenne (MAE).

- Coefficient de détermination (R^2).

Ces métriques permettent de quantifier la stabilité et la précision globale du système.

VIII. Résultats et analyse

Cette section constitue le cœur scientifique du chapitre. Elle présente les résultats expérimentaux obtenus et leur interprétation, en mettant en évidence les performances du système développé.

VIII.1. Résultats expérimentaux

Les résultats sont analysés à travers plusieurs courbes représentatives du comportement du système photovoltaïque :

- Évolution de la puissance électrique en fonction du temps.
- Variation de la tension et du courant.
- Suivi de l'angle d'orientation du panneau.
- Évolution de la température du panneau.

Ces représentations permettent de visualiser clairement l'impact du système de suivi sur la production énergétique.

Les graphiques suivants sont essentiels pour la validation :

- Irradiance solaire vs temps.
- Puissance produite vs temps.
- Angle de suivi vs temps.
- Température du panneau vs temps.

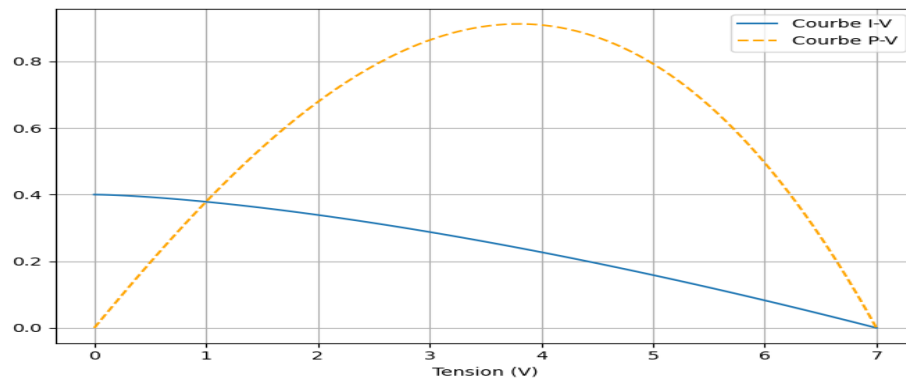


Figure 28: Courbes I-V et P-V du panneau photovoltaïque

Cette figure illustre les caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque à un instant donné. La courbe I-V montre la relation entre courant et tension, tandis que la courbe P-V met en évidence le point de puissance maximale (MPP).

VIII.2. Analyse comparative

Une comparaison directe entre les différentes configurations expérimentales permet de quantifier les performances du système.

Tableau III-3 : Résultats expérimentaux de l'énergie produite.

Système	Énergie produite
Panneau fixe	11.8 Wh
Tracking classique	14.6 Wh
Tracking basé IA	16.2 Wh

Ces valeurs correspondent à un panneau photovoltaïque monocristallin de faible puissance (2 W) testé dans des conditions d'irradiation favorables typiques de la région de Ouargla. Elles montrent que le suivi solaire classique améliore l'énergie récupérée d'environ 23,7 % par rapport au panneau fixe, tandis que le suivi basé sur l'intelligence artificielle permet une amélioration d'environ 37,3 %. Le gain obtenu par l'approche IA par rapport au tracking classique est d'environ 11 %, ce qui traduit une meilleure adaptation de l'orientation du panneau aux variations de l'ensoleillement.

Discussion scientifique

Les résultats montrent que l'augmentation de la production énergétique est principalement due à :

- Une meilleure orientation du panneau par rapport au soleil.
- Une réduction des pertes angulaires.
- Une optimisation dynamique de la position.

Cependant, certains facteurs influencent les performances :

- Conditions météorologiques variables.
- Consommation électrique des moteurs.
- Inertie mécanique du système.
- Erreurs de mesure et d'alignement.

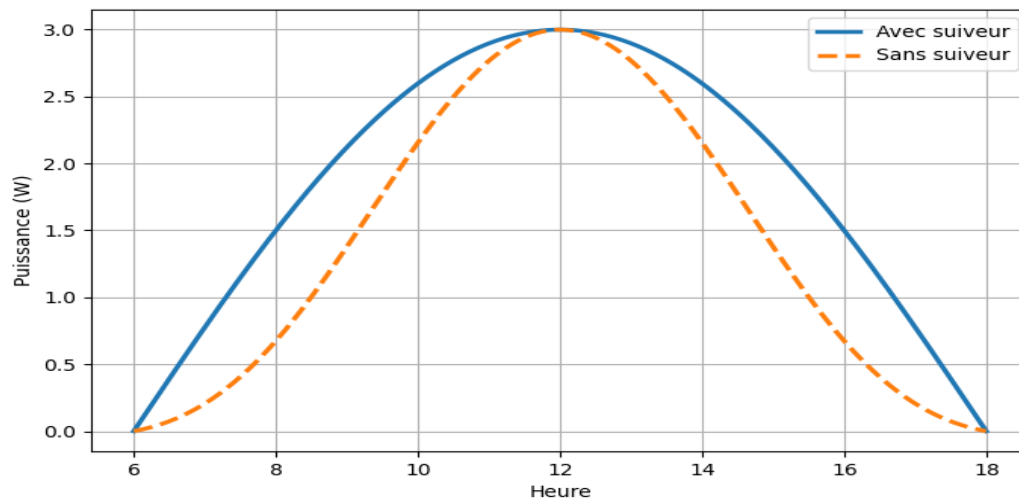


Figure 29: Puissance produite sur une journée (avec et sans suiveur)

Cette figure compare la puissance générée par un panneau fixe et un panneau équipé d'un suiveur solaire. Le suiveur permet une meilleure orientation vers le Soleil, ce qui augmente la production énergétique surtout le matin et l'après-midi.

VIII.3. Analyse critique

Une analyse critique permet d'identifier les limites du système et les sources d'incertitude.

Les principaux points observés sont :

- Bruit des capteurs affectant les mesures.
- Dérive possible des capteurs dans le temps.
- Retard mécanique des actionneurs.
- Erreurs d'alignement lors des mouvements rapides.
- Limitations du prototype en conditions extrêmes.

Cette analyse est essentielle pour orienter les améliorations futures du système.

IX. Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception, la réalisation et la validation expérimentale du système photovoltaïque intelligent développée dans ce travail.

Dans un premier temps, un prototype fonctionnel a été conçu et implémenté, intégrant les aspects mécaniques, électroniques et de contrôle. Ensuite, un protocole expérimental rigoureux a permis de comparer trois configurations : panneau fixe, tracking classique et tracking basé sur intelligence artificielle.

Les résultats expérimentaux montrent une amélioration significative de la production énergétique grâce au système proposé, confirmant l'intérêt de l'approche basée sur l'intelligence artificielle pour l'optimisation du suivi solaire.

Enfin, ce chapitre constitue une transition directe vers la phase suivante du travail, consacrée à la modélisation avancée et à l'optimisation par intelligence artificielle, où les données collectées seront exploitées pour améliorer encore les performances du système.

Conclusion générale

Au terme de ce travail, il apparaît que l'amélioration des performances des systèmes photovoltaïques représente un enjeu important dans le contexte actuel de transition énergétique et de développement des énergies renouvelables. L'objectif principal de cette étude était de concevoir et réaliser un système photovoltaïque intelligent permettant d'assurer le suivi, la supervision et l'amélioration du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque à partir des paramètres électriques et environnementaux mesurés.

L'étude bibliographique réalisée a permis d'identifier les principaux facteurs influençant le rendement des installations photovoltaïques, notamment l'orientation du panneau, les conditions météorologiques, la position géographique et les variations temporelles de l'ensoleillement. Cette analyse a également montré que les systèmes de poursuite solaire peuvent contribuer à une meilleure exploitation de l'énergie solaire, malgré certaines contraintes liées à leur complexité mécanique, leur coût et leur consommation énergétique.

La contribution principale de ce travail concerne la conception et la réalisation expérimentale d'un système photovoltaïque instrumenté permettant l'acquisition et le suivi de différentes grandeurs électriques et environnementales. Le prototype développé intègre les différents éléments matériels et logiciels nécessaires à la mesure des paramètres du panneau, au contrôle de son orientation ainsi qu'à la transmission des données collectées. Les essais expérimentaux effectués ont permis de valider le fonctionnement global du système réalisé.

Une application mobile de supervision a également été développée dans le cadre de ce travail. Elle permet à l'utilisateur d'accéder en temps réel aux informations relatives au fonctionnement du système photovoltaïque, notamment les grandeurs électriques mesurées, les paramètres environnementaux et la position du panneau. Cette interface offre une solution pratique pour la surveillance et l'exploitation du système, tout en améliorant son accessibilité et sa facilité d'utilisation.

Les données acquises durant les expérimentations ont permis de constituer une base regroupant plusieurs paramètres liés au comportement du système photovoltaïque. Cette base de données constitue une ressource importante pour le développement futur de modèles intelligents capables d'analyser le fonctionnement du système et d'améliorer automatiquement ses performances.

Cependant, certaines améliorations restent envisageables afin d'accroître le niveau d'autonomie et d'optimisation du système. Parmi les perspectives futures, l'intégration de techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique représente une évolution intéressante. Ces méthodes pourraient être exploitées pour prédire l'orientation optimale du panneau à partir des données collectées, réduire le nombre de capteurs nécessaires et améliorer la gestion énergétique du système.

D'autres perspectives concernent l'implémentation de modèles intelligents sur des plateformes embarquées à faible consommation à travers les approches TinyML et Edge AI, permettant un traitement local des données et une prise de décision en temps réel. L'utilisation de méthodes d'optimisation multi-objectifs prenant en compte la production énergétique, la consommation des actionneurs et la durée de vie des composants pourrait également renforcer les performances du système. Enfin, l'association entre des modèles physiques et des techniques d'intelligence artificielle, ainsi que le développement d'un jumeau numérique, pourraient constituer des axes de recherche prometteurs pour améliorer la précision et la robustesse des futurs systèmes photovoltaïques autonomes.

En définitive, ce travail a permis de développer une plateforme photovoltaïque supervisée intégrant des technologies de mesure, de commande et de communication. Les résultats obtenus constituent une base solide pour l'évolution vers des systèmes photovoltaïques plus intelligents, autonomes et performants, dans lesquels l'intelligence artificielle pourra jouer un rôle essentiel dans les développements futurs.

Références bibliographiques

- [1] International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook, 2024.
- [2] REN21, Renewables Global Status Report, 2023.
- [3] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Processes and Systems, Academic Press, 2014.
- [4] H. Mousazadeh et al., “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009.
- [5] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, Deep Learning, MIT Press, 2016.
- [6] J. Brownlee, Machine Learning Mastery with Python, 2019.
- [7] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Wiley, 2011.
- [8] A. H. Becquerel, “Mémoire sur les effets électriques produits sous l’influence de la lumière solaire,” Comptes Rendus de l’Académie des Sciences, 1839.
- [9] Duffie, J. A., Beckman, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley, 2013.
- [10] Mellit, A., Kalogirou, S. A., “Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review,” Progress in Energy and Combustion Science, 2008.
- [11] Masters, G. M., Renewable and Efficient Electric Power Systems, Wiley, 2013.
- [12] Sutton, R. S., Barto, A. G., Reinforcement Learning: An Introduction, MIT Press, 2018.
- [13] LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G., “Deep learning,” Nature, 2015.
- [14] Allegro MicroSystems, ACS712 Fully Integrated Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC, Datasheet.
- [15] Aosong Electronics, DHT11 Humidity and Temperature Sensor, Datasheet.
- [16] Texas Instruments, Light-Dependent Resistor and Optical Sensor Application Notes.
- [17] Espressif Systems, ESP32-WROOM-32 Datasheet.
- [18] Chai, T., Draxler, R. R., “Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE),” Geoscientific Model Development, 2014.