

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

UNIVERSITE Dr. TAHAR MOULAY – SAIDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de

Master en Electronique

Option : Electronique des Systèmes Embarqués

THEME

Prototype intégré pour le suivi solaire : Banc d'essai didactique avec arduino Uno

Présenté par

Nouari Nassima

Soutenu publiquement, le 11 /06/2025 devant le jury composé de :

Pr Garadi Ahmed	Président	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Pr Arbouche Omar	Examineur	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Pr. Driss Khodja Fatima Z	Encadreur	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Dr. Yahy Youcef	Invité	Dr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda

Année Universitaire 2024- 2025

Remerciements

Avant tout, je remercie le bon Dieu de m'avoir aidé à réaliser ce présent travail.

*Ce travail a été effectué sous la direction de Madame **Driss Khodja Fatima Zohra**, Professeur à l'Université de Saïda. Je tiens à la remercier pour la confiance qu'elle m'a témoignée, pour la disponibilité dont elle a fait preuve tout le long de ce travail et ses conseils judicieux me furent d'une très grande utilité.*

*En toute complémentarité, Monsieur **Yahi Youcef**, Docteur à l'Université de Saïda, a co-dirigé ce travail. Il a suivi ce travail avec beaucoup d'intérêt.*

*Je suis reconnaissante à Monsieur **A. Garadi**, Professeur à l'Université de Saïda, pour l'attention qu'il a portée à ce travail et je le remercie d'avoir accepté de présider le Jury.*

*Je tiens à manifester ma gratitude à Monsieur **O. Arbouche**, Professeur à l'Université de Saïda, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail et je le remercie d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

Enfin, j'adresse mes vifs remerciements à tous les enseignants de la faculté de Technologie qui ont contribué à ma formation.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A Mes parents : Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils

ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mes respects, ma considération, ma reconnaissance et

Mes profonds sentiments envers eux,

A mes sœurs et mes frères

Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance

pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes amis et mes collègues qu'ils trouvent ici le témoignage d'une fidélité et

d'une amitié infinie.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant mes études.

Nouari Nassima

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception et la simulation d'un système hybride de production d'énergie pour véhicules, combinant trois sources : l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne et l'énergie cinétique récupérée lors du freinage. L'objectif est de proposer une solution durable pour alimenter les véhicules électriques tout en maximisant l'efficacité énergétique et en réduisant la dépendance aux sources d'énergie non renouvelables.

Les différents types de suiveurs (passifs, actifs, mono-axe, double-axe) ainsi que les méthodes de suivi (capteurs lumineux ou données astronomiques) sont présentés. Ce suivi permet d'optimiser l'orientation des panneaux pour un rendement énergétique maximal.

Le schéma de câblage, les organigrammes de commande, la modélisation mécanique du dispositif, ainsi que les résultats de simulation pour les différentes sources d'énergie sont discutés. L'influence des conditions climatiques (irradiation et température) est aussi analysée.

Ce travail met en évidence l'efficacité d'un système hybride contrôlé automatiquement, capable de produire une énergie propre et renouvelable pour les véhicules modernes.

Mots clés : Système hybride, production d'énergie, véhicules électriques, énergie solaire, énergie éolienne, photovoltaïque, énergie cinétique de freinage, panneaux solaires, capteurs LDR, Arduino, rayonnement solaire, suivi solaire, servomoteurs, conditions climatiques, modélisation mécanique, contrôle automatique, simulation.

Summary

This thesis focuses on the design and simulation of a hybrid vehicle power generation system, combining three sources: photovoltaic solar energy, wind energy, and kinetic energy recovered during braking. The objective is to propose a sustainable solution for powering electric vehicles while maximizing energy efficiency and reducing dependence on non-renewable energy sources.

The different types of trackers (passive, active, single-axis, dual-axis) as well as tracking methods (light sensors or astronomical data) are presented. This tracking allows the orientation of the panels to be optimized for maximum energy efficiency.

The wiring diagram, control flowcharts, mechanical modeling of the device, and simulation results for different energy sources are discussed. The influence of climatic conditions (irradiation and temperature) is also analyzed.

This work highlights the effectiveness of an automatically controlled hybrid system capable of producing clean and renewable energy for modern vehicles.

Keywords : Hybrid systems, power generation, electric vehicles, solar energy, wind energy, photovoltaics, kinetic braking energy, solar panels, LDR sensors, Arduino, solar radiation, solar tracking, servomotors, climate conditions, mechanical modeling, automatic control, simulink.

الملخص

هذا العمل يتناول تصميم ومحاكاة نظام هجين لإنتاج الطاقة مخصص للمركبات، يجمع بين ثلاث مصادر: الطاقة الشمسية الكهروضوئية، الطاقة الريحية، والطاقة الحركية المسترجعة أثناء الكبح. يهدف هذا النظام إلى تقديم حل مستدام لتغذية المركبات الكهربائية بالطاقة، مع تعظيم الكفاءة الطاقوية وتقليل الاعتماد على المصادر غير المتجددة.

يتم عرض الأنواع المختلفة للمتبعات الشمسية (السلبية، النشطة، ذات المحور الواحد، ذات المحورين) بالإضافة إلى طرق التتبع (باستخدام الحساسات الضوئية أو البيانات الفلكية). يهدف هذا التتبع إلى تحسين توجيه الألواح الشمسية من أجل تحقيق أقصى مردودية للطاقة.

تمت مناقشة مخطط التوصيل الكهربائي، مخططات التحكم، النمذجة الميكانيكية للنظام، إلى جانب نتائج المحاكاة لمصادر الطاقة المختلفة. كما تم تحليل تأثير الظروف المناخية مثل الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة على أداء النظام.

يبرز هذا العمل فعالية نظام هجين يتم التحكم فيه تلقائيًا، قادر على إنتاج طاقة نظيفة ومتجددة لتلبية احتياجات المركبات الحديثة.

الكلمات المفتاحية: نظام هجين، إنتاج الطاقة، المركبات الكهربائية، الطاقة الشمسية، الطاقة الريحية، الكهروضوئية، الطاقة الحركية الناتجة عن الكبح، الألواح الشمسية، الحساسات الضوئية (LDR)، أردوينو، الإشعاع الشمسي، التتبع الشمسي، المحركات السيرفو، الظروف المناخية، النمذجة الميكانيكية، التحكم الآلي، المحاكاة

Table des matières

Table des matières

Résumé	i
Table des matières	ii
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Liste des abréviations	viii
Introduction générale	01

Chapitre I : Étude des composantes et de l'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction	03
I.2 Étude des différents blocs	03
I.2.1 Bloc de commande	03
I.2.2 Circuit de Commande	05
I.3 L'énergie solaire photovoltaïque	05
I.4 Les panneaux solaires photovoltaïques	10
I.4.1 Regroupement des cellules	11
I.4.2 Zones de fonctionnement du module solaire	13
I.4.3 Fonctionnement optimal du module photovoltaïque	14
I.4.4 Avantages des panneaux solaires mobiles (suiveurs solaires)	14
I.4.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	15
I.5 Conclusion	16

Chapitre II : Étude du système de poursuite solaire

II.1 Introduction	17
II.2 Partie A : Trajectoire solaire	17
II.2.1 L'angle d'altitude solaire (α)	17
II.2.2 La déclinaison solaire (δ)	18
II.2.3 L'angle d'azimut solaire (Az)	18
II.3 Partie B : Le système de poursuite solaire	19
II.3.1 État de l'art des suiveurs solaire	19
II.3.2 Principes fondamentaux des suiveurs solaires	20
II.3.3 Catégories de suiveurs solaires	20

II.3.4 Méthodes et techniques de suivi solaire	22
II.3.5 Étapes du fonctionnement	24
II.3.6 Avantages et inconvénients des suiveurs solaires	25
II.3.6.1 Avantages	25
II.3.6.2 Inconvénients	25
III.4 Description des composants du système ²	25
II.4.1 Le dispositif programmable Arduino	25
II.4.2 Structure de la carte Arduino UNO	26
II.4.3 Pourquoi avoir choisi l'Arduino UNO	27
II.4.4 Caractéristiques techniques de l'Arduino UNO	28
II.4.5 Servomoteur	28
II.4.6 Capteur LDR	31
II.4.7 Câble USB	33
II.5 Comparaisons des systèmes	34
II.5.1 Revue des méthodes de contrôle conventionnelles et leurs limitations	34
II.5.2 Mise en Œuvre d'Algorithmes de contrôle intelligents	34
II.5.3 Développement d'un Algorithme de Suivi Hybride (Combinaison Données Capteurs et Astronomiques)	35
II.5.4 Simulation et comparaison des performances des stratégies de contrôle avancées	35
II.5.5 Défis de Mise en Œuvre en temps réel des contrôleurs sophistiqués	36
II.6 Conception détaillée et prototypage du suiveur solaire à deux Axes	36
II.6.1 Architecture du système et intégration des composants (Microcontrôleur, Capteurs, Actionneurs)	36
II.6.2 Conception du circuit électronique et gestion de l'énergie	37
II.6.3 Structure mécanique : Stabilité, durabilité et degrés de liberté	37
II.6.4 Développement Code Matlab	37
II.7 Simulation, validation expérimentale et analyse des performances	37
II.7.1 Modélisation dynamique du système et simulation	37
II.7.2 Dispositif Expérimental et protocole d'acquisition des données	38
II.7.3 Comparaison de la Production d'Énergie	38
II.7.4 Analyse de la Précision du suivi et de l'efficacité du système en conditions réelles	38
II.7.5 Discussion sur les écarts	38
II.8 Fiabilité économique et évaluation de l'impact environnemental	38
II.8.1 Analyse coût-bénéfice du Suiveur Solaire	38
II.8.2 Analyse du cycle de vie (ACV) du système de Suivi	39
II.8.3 Potentiel de fabrication locale et bénéfices socio-économiques	39
II.8.4 Contribution à l'adoption des énergies renouvelables et à la réduction des émissions de CO ₂	39
II.9 Optimisation, défis et perspectives futures	39
II.9.1 Stratégies d'optimisation de la consommation énergétique du suiveur	39
II.9.2 Principaux défis	39
II.9.3 Améliorations possibles	40
II.9.4 Scalabilité et adaptabilité à différentes tailles de systèmes photovoltaïques	40
II.9.5 Contribution sur l'avenir des technologies de suivi-solaire	40
II.10 Conclusion	40

Chapitre III : Simulation du suiveur solaire

III.1.Introduction	41
III.2. Simulation du suiveur solaire	41
III.2.1 Carte de commande du suiveur solaire	41
III.2.2 Câblage et fonctionnement du système	41
III.2.3 L'organigramme	43
III.2.3.1 L'organigramme principal	43
III.2.3.2 Sous-programme	44
III.2.4 Programme	47
III.3 Partie mécanique	48
III.3.1 Orientation selon l'axe horizontal (azimut) et l'axe vertical (élévation)	49
III.3.2 Positionnement des capteurs LDR	49
III.4 Interprétation de résultats	50
III.4.1 Système photovoltaïque	50
III.4.2 Effet de la température et de l'irradiation	50
III.4.2.1 Effet de la température	54
III.4.2.2 Effet de l'irradiation	55
III.4.3 Les sorties du MPPT	56
III.4.4 Résultats de la simulation du système éolien	58
III.4.5 Alimentation de la charge moteur DC	66
III.5 Analyse et interprétation détaillée des résultats de simulation	67
III.5.1 Influence de la température sur les Performances Photovoltaïques	67
III.5.2 Effet de l'Irradiation Solaire sur la Puissance Produite	68
III.5.3 Caractéristiques électriques du module Photovoltaïque en Point de Puissance Maximale	68
III.5.4 Évaluation des performances de la génération éolienne	68
III.5.5 Comportement dynamique du Système Hybride	68
III.5.6 Contrôle et Stabilisation de la vitesse du rotor et des moteurs	68
III.5 Conclusion	68
Conclusion générale	69
Bibliographie	71

Liste des figures

Liste des figures

I.1	LDR	03
I.2	La carte Arduino avec ses capteurs en entrée et ses actionneurs en sortie	05
I.3	Analyse spectrale du rayonnement solaire	06
I.4	Les différents types du rayonnement solaire	07
I.5	Description d'une cellule photovoltaïque	08
I.6	Cellule au silicium monocristallin	09
I.7	Cellule au Silicium Poly cristallin	09
I.8	Cellule au Silicium	10
I.9	Evolution de constructions des systèmes de production PV	11
I.10	Association des modules en série	12
I.11	Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques	12
I.12	Association des modules en parallèle	13
I.13	Caractéristique résultante d'un regroupement en parallèle de n_p cellules identiques	13
I.14	Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$, $T=25^\circ C$	14
I.15	: Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système	15
II.1	Représentation latitude et longitude	18
II.2	Représentation des angles Zénith, Azimut et altitude solaires	19
II.3	Modèle d'un héliostat dans ses premières applications	19
II.4	Champ d'héliostat - centrale solaire Thémis France	20
II.5	Types de suiveurs solaires.	20
II.6	Suiveur solaire passif	21
II.7	Panneaux solaires avec système de poursuite mono-axiale	22
II.8	Panneau solaire avec système de poursuite bi-axiale	22
II.9	Suiveur basé sur des capteurs de lumière	23
II.10	Méthode de poursuite astronomique	24
II.11	Constitution de la carte Arduino UNO	28
II.12	Servomoteur chinois "9 grammes".	29

II.13	Photo représentant un Servomoteur Futuba S3003	29
II.14	Vue éclatée d'un servomoteur	30
II.15	Illustration du signal de contrôle	31
II.16	Symbole et capteur LDR.	32
II.17	Circuit équivalent du capteur LDR utilisé	33
II.18	Câble USB type A/B (Arduino UNO	33
III.1	Carte de commande de suiveur solaire	41
III.2	Schéma du câblage de suiveur solaire	42
III.3	Interface de simulation sur le simulink	47
III.4	Simulation du système global « Suiveur photovoltaïque »	48
III.5	Résultats de la récupération l'énergie cinétique au niveau des freins	50
III.6	Résultats issus de l'enregistrement Simulink du système de freinage énergétique	51
III.7	Comparaison des stratégies d'utilisation du système électrique lors de l'accélération	52
III.8	Architecture de System globale l'energie PV	53
III.9	Le comportement dynamique d'un système de propulsion hybride destiné à un véhicule	55
III.10	Le comportement dynamique d'un système de propulsion hybride destiné	5
III.11	La réponse dynamique éoliennes face aux variations naturelles du vent	58
III.12	Le comportement énergétique d'un véhicule hybride	59
III.13	L'application de référence pour véhicule électrique (EV)	61
III.14	Simulation de double fonctionnement de moteur électrique (frein actif)	63
III.15	Le comportement dynamique d'un système de propulsion hybride destiné	56

Liste des tableaux

Liste des tableaux

I.1	Avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques	10
I.2	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	15
III.1	Caractéristiques techniques de l'Arduino UNO	28

Liste des abréviations

Liste des abréviations

L	Longitude
PV	Photovoltaïque
DC	Courant Continu (Direct Current)
ENR	Énergie(s) Renouvelable(s)
δ	Déclinaison solaire
GW	Gigawatt
Imp	Courant au point de puissance maximale
kW	Kilowatt
MW	Mégawatt
PV	Panneaux pho-voltaïques
φ	Latitude
ω	Angle horaire
Az	Angle Azimut
α	Angle d'altitude
θ_z	Angle de zénith
J	Date du jour
h	Hauteurs solaire
β	Angle d'inclinaison
3D	Trois Dimensions
AC	Courant Alternatif (Alternating Current)
h	Hauteurs solaire
β	Angle d'inclinaison
SM1	Servomoteur 1
SM2	Servomoteur 2
HEX	Hexadécimal
IDE	Interface logiciel Arduino

Introduction générale

Introduction Générale

La majeure partie de l'énergie utilisée aujourd'hui provient des sources fossiles telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel, ainsi que de l'énergie nucléaire. Cependant, ces ressources deviennent de plus en plus limitées, tandis que les besoins énergétiques mondiaux ne cessent de croître. Il est estimé que ces réserves pourraient être épuisées aux alentours de 2030 si les habitudes de consommation ne changent pas profondément, ou au plus tard vers 2100 si des efforts importants sont entrepris pour améliorer la production et la consommation énergétique.

Étant donné que ces sources représentent une grande part de la production actuelle, il devient impératif d'identifier une alternative capable de les remplacer. Cette alternative doit être à la fois économique et respectueuse de l'environnement, car la préservation de ce dernier est devenue une priorité.

Dans cette optique, les énergies renouvelables telles que : l'énergie solaire (thermique ou photovoltaïque), l'éolien ou l'hydraulique, apparaissent comme des solutions durables, inépuisables et facilement exploitables. Par exemple, une surface de 145 000 km² recouverte de panneaux photovoltaïques, soit seulement 4 % de la superficie des déserts arides suffirait à satisfaire l'ensemble de la demande énergétique mondiale.

La quantité d'électricité produite par un capteur solaire dépend de l'intensité de la lumière qu'il reçoit, elle-même liée à la position du soleil au cours de la journée.

Pour maximiser cette production, on utilise des dispositifs appelés systèmes de suivi solaire, aussi connus sous le nom de suiveurs ou «trackers solaires».

Le système de suivi solaire doit être configuré de manière à orienter le capteur aussi perpendiculairement que possible aux rayons du soleil.

Actuellement, deux grandes catégories de systèmes dominent le marché : les suiveurs à un seul axe et ceux à deux axes. Les systèmes à un axe présentent l'avantage d'être moins onéreux et faciles à piloter, mais leur rendement est inférieur à celui des dispositifs à deux axes, bien que ces derniers soient plus coûteux.

Notre travail porte sur la conception et la simulation d'un suiveur solaire à deux axes, basé sur une carte Arduino UNO. Nous avons structuré ce projet en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes photovoltaïques, abordant les principes de la conversion photovoltaïque, la cellule solaire et le générateur photovoltaïque.

Le deuxième chapitre traite le système de suivi solaire, où nous présentons un aperçu de la géométrie solaire et de la trajectoire du soleil, suivis d'une étude des différents types de suiveurs, de leurs méthodes de suivi, ainsi qu'une description des composants électroniques utilisés.

Dans le troisième chapitre est consacré aux résultats et discussion. Nous présentons les résultats de simulation par le logiciel de simulation **MATLAB SIMULINK** avec interprétations.

Enfin, nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale et les perspectives offertes par ce travail.

Chapitre I : Étude des composants et de l'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction

Cette étape du projet présente la phase de simulation ou de modélisation, qui constitue un aspect essentiel dans toute recherche scientifique.

Le système de suivi solaire conçu repose sur une structure mécanique spécialement conçue pour supporter le panneau photovoltaïque et l'orienter selon l'incidence perpendiculaire du rayonnement solaire, sur deux axes : l'un horizontal et l'autre vertical.

Il est également constitué d'un volet électronique comprenant des capteurs solaires associés à une carte microcontrôleur de type « Arduino », ainsi que des actionneurs, ici représentés par deux moteurs électriques de type pas à pas.

Le système de suivi est piloté par un programme développé sur la plateforme simulink, permettant le déplacement du panneau solaire à des intervalles définis, du lever au coucher du soleil, suivant la trajectoire apparente du soleil. L'objectif est de maintenir la face active du panneau perpendiculaire aux rayons solaires tout au long de la journée, assurant ainsi un angle d'incidence nul.

I.2 Étude des différents blocs

I .2.1 Bloc de commande

I.2.1.1 Capteurs solaires LDR (photorésistances)

Une photorésistance, aussi appelée cellule photo-dépendante ou photoconductrice, est un composant électronique dont la résistance électrique varie en fonction de l'intensité lumineuse qu'elle reçoit : plus elle est exposée à la lumière, plus sa résistance diminue.

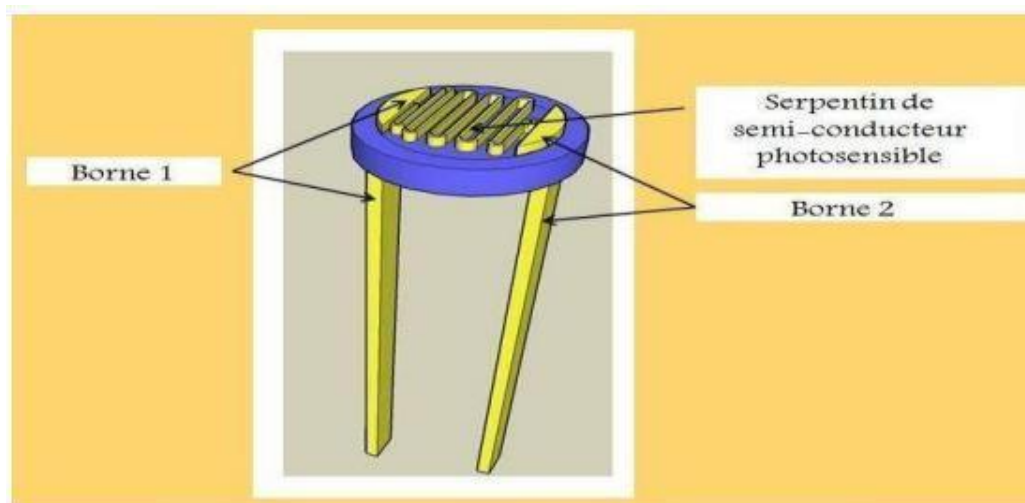


Figure I.1: Photorésistance LDR.

Lorsque le photon incident possède une énergie suffisante, il favorise la création de paires électron-trou, dont la quantité augmente proportionnellement à l'intensité du flux lumineux. Ainsi, la résistance de la photorésistance diminue lorsque l'éclairement augmente, suivant une relation inverse exprimée par l'équation exprimée par l'équation suivante :

$$R(E) = K \cdot E^{-\gamma} \quad (I.1)$$

où :

- **E** représente l'éclairement lumineux,
- **y** est un coefficient numérique généralement compris entre 0,5 et 1,
- **K** est une constante qui dépend du matériau utilisé, de la température ambiante, et des caractéristiques spectrales du rayonnement incident.

Par ailleurs, la photorésistance est influencée par la température ambiante et présente une sensibilité variable selon les longueurs d'onde de la lumière. Ainsi, sa réponse peut varier légèrement selon qu'il fasse très chaud ou très froid. De même, la valeur mesurée dépend de la couleur de la lumière incidente. Dans le cadre de notre application, le capteur est connecté via un montage en diviseur de tension, comme illustré dans la figure ci-après.

I.2.1.2 Applications de la photorésistance

Les photorésistances sont utilisées dans de nombreux dispositifs de détection basés sur la lumière. Parmi leurs applications les plus courantes, on retrouve :

*- **Les détecteurs de flammes**, utilisant des photorésistances sensibles aux infrarouges ou aux ultraviolets (UV). Ces capteurs sont fiables sauf en cas de forte fumée, qui peut inhiber les capteurs UV. En revanche, certains phénomènes comme la foudre ou la soudure peuvent provoquer des déclenchements erronés. Pour les versions infrarouges, la vapeur d'eau réduit significativement la sensibilité du capteur.

*- **Les détecteurs de présence**, basés sur deux principes distincts : le premier détecte une augmentation du flux lumineux provoquée par la présence d'un corps dans le champ du capteur (généralement des capteurs infrarouges), tandis que le second perçoit une baisse du flux due à l'ombre portée par un corps, en utilisant des photorésistances plus directives, sensibles à la lumière visible.

*- **Les récepteurs infrarouges**, qui permettent la communication sans fil entre deux dispositifs : l'un émet un signal infrarouge, l'autre équipé d'une photorésistance le reçoit.

*- **Les capteurs UV**, servant à identifier la présence de rayonnements ultraviolets, utiles pour déclencher un mécanisme, surveiller une source ou repérer une fuite.

*- **L'allumage automatique des éclairages**, dans les espaces publics ou domestiques, lorsque la luminosité ambiante chute en dessous d'un certain seuil.

*- **La mesure de la luminosité ambiante**, intégrée dans les appareils photo ou les ordinateurs pour ajuster automatiquement les paramètres d'affichage ou d'exposition.

I.2.2 Circuit de commande

I.2.2.1 La carte Arduino

La carte Arduino est un microcontrôleur compact monté sur une petite carte électronique de dimensions approximatives 5,33 x 6,85 cm. Elle est conçue pour recevoir des signaux provenant de capteurs, les analyser selon un programme prédéfini, puis déclencher des actions via des actionneurs. Grâce à sa capacité de programmation et son interface simple, la carte Arduino constitue une passerelle entre le monde physique (via les capteurs) et les composants actifs (comme les moteurs). Elle est illustrée dans la figure I.2 ci-dessous.



Figure I.2 : La carte Arduino avec ses capteurs en entrée et ses actionneurs en sortie.

Le système Arduino permet de combiner les avantages de la programmation avec ceux de l'électronique, rendant possible la conception de systèmes électroniques intelligents. L'électronique programmable présente un atout majeur : elle simplifie considérablement les circuits, ce qui réduit à la fois les coûts de fabrication et le temps nécessaire à la conception d'un système.

Le terme Arduino désigne l'ensemble suivant : une carte à microcontrôleur, un environnement de développement logiciel (IDE), et une large communauté de développeurs et utilisateurs. À noter que la plateforme Arduino repose sur un matériel et un logiciel en open-source, comme illustré dans la figure ci-après.

I.3 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte de la conversion directe d'une partie du rayonnement solaire en électricité. Cette transformation est assurée par une cellule photovoltaïque, qui repose sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, lequel génère un courant électrique lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière.

Dans ce chapitre, nous expliquons en détail les éléments liés à cette source d'énergie ainsi que son processus de transformation en électricité.

I.3.1 L'énergie solaire

Le rayonnement solaire représente la source d'énergie la plus abondante sur notre planète. En une heure, l'énergie solaire captée par la Terre pourrait couvrir la consommation énergétique mondiale d'une année entière. Le Soleil émet en continu une immense quantité d'énergie rayonnante à travers le système solaire, dont une infime fraction est interceptée par la terre.

En moyenne, une puissance de 1367 watts atteint chaque mètre carré de la limite externe

de l'atmosphère terrestre, pour une distance moyenne de 150 millions de kilomètres entre la Terre et le Soleil. Cette valeur est connue sous le nom de *constante solaire*, équivalente à 1367 W/m^2 .

La quantité d'énergie qui atteint la surface terrestre dépend de l'épaisseur d'atmosphère traversée, définie par le *nombre de masse d'air* (AM). Le rayonnement qui parvient au niveau de la mer à midi sous un ciel dégagé est d'environ 1000 W/m^2 , correspondant à une masse d'air de 1 (AM1). Lorsque le Soleil est plus bas dans le ciel, la lumière traverse une couche atmosphérique plus importante, ce qui diminue la quantité d'énergie transmise. Comme le Soleil est rarement au zénith, la masse d'air est généralement supérieure à 1, ce qui réduit l'intensité énergétique disponible.

I.3.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est une onde électromagnétique dont les longueurs d'onde varient approximativement de $0,22 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$. La figure (I-3) illustre la distribution spectrale de cette énergie.

L'énergie émise par le Soleil peut être répartie approximativement comme suit :

- 9 % dans le domaine des ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$),
- 47 % dans le spectre visible (de $0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$),
 - 44 % dans l'infrarouge ($> 0,8 \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre capte ce rayonnement avec une puissance moyenne de $1,37 \text{ kW/m}^2$, avec une variation d'environ $\pm 3 \%$ selon la position de la Terre dans son orbite autour du Soleil.

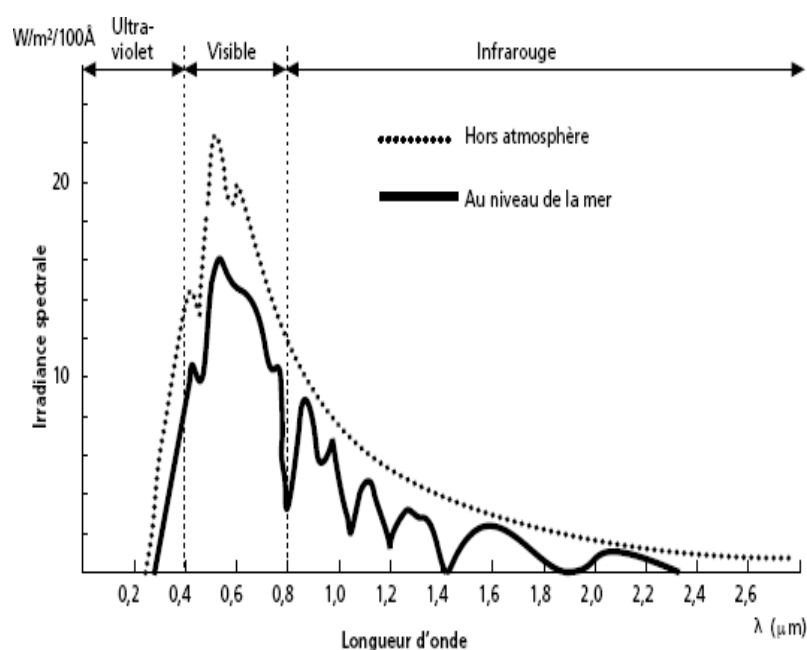


Figure I.3 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

I.3.2.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct correspond à l'énergie solaire qui parvient à la surface de la Terre en ligne droite depuis le Soleil, sans être déviée. Son intensité dépend de la trajectoire traversée dans l'atmosphère et de l'angle d'incidence des rayons solaires sur le sol. Pour mesurer cette intensité, on utilise un pyréliomètre, un instrument orienté en continu vers le Soleil grâce à un système de suivi.

I.3.2.2 Rayonnement diffus

Ce type de rayonnement provient de toutes les directions du ciel. Il résulte de la dispersion et de l'absorption d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère, ainsi que de sa réflexion par les nuages. Sa mesure se fait à l'aide d'un pyranomètre équipé d'un masque pour bloquer le rayonnement solaire direct.

I.3.2.3 Rayonnement réfléchi

Il s'agit du rayonnement solaire qui est renvoyé par la surface terrestre ou par les objets présents au sol. Ce phénomène, appelé albédo, peut être particulièrement marqué lorsque la surface est très réfléchissante, comme l'eau ou la neige.

I.3.2.4 Rayonnement global

C'est la combinaison de l'ensemble des composantes : rayonnement direct, diffus, et réfléchi par le sol ou les objets à proximité. Il est mesuré à l'aide d'un **pyranomètre** ou d'un **solarimètre** non masqué.

Il est important de noter que certains capteurs solaires sont conçus pour concentrer le rayonnement afin d'accroître leur efficacité sur une surface réduite. Cependant, ces capteurs ne sont efficaces qu'avec le rayonnement direct. Dans les zones où le rayonnement diffus est dominant, ces systèmes à concentration deviennent inefficaces, car le rayonnement diffus ne peut être focalisé.

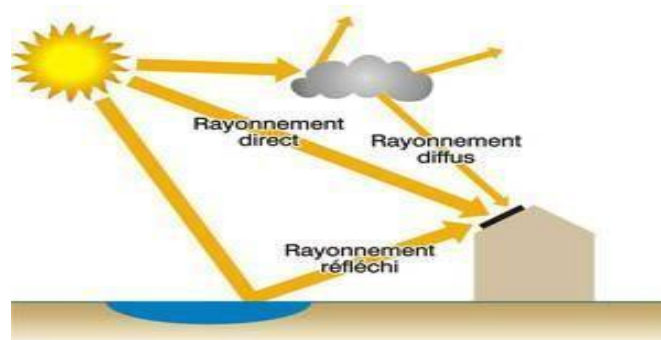


Figure I.4 : Les différents types du rayonnement solaire.

I.3.3 L'effet photovoltaïque

La cellule photovoltaïque fonctionne grâce à un principe physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. Ce phénomène se manifeste par la génération d'une force électromotrice lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière. La figure (I.5) présente une cellule photovoltaïque standard, accompagnée d'un schéma détaillant sa structure.

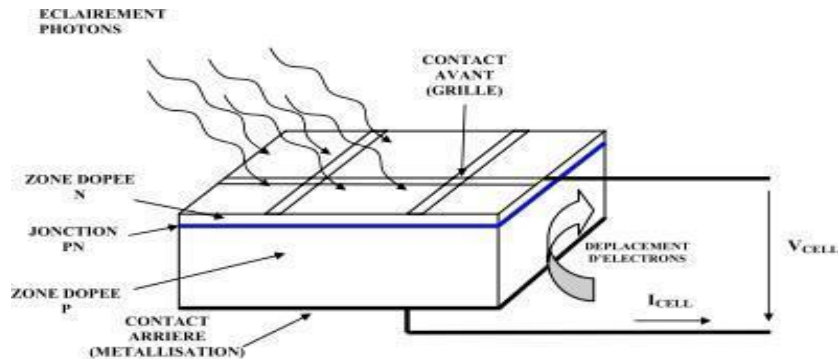


Figure I.5 : Description d'une cellule photovoltaïque.

I.3.4 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque, aussi appelée photopile, représente l'unité de base d'un système de production d'énergie solaire. Fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs, elle permet la conversion directe de la lumière du soleil en électricité. Elle est composée des multiples parties commençant par d'une mince couche de matériau semi-conducteur (comme le silicium), caractérisé par une bande interdite. Celle-ci agit comme une barrière énergétique que les électrons ne peuvent franchir qu'en recevant une excitation, comme celle produite par les photons lumineux. Le silicium est largement utilisé en raison de sa bonne conductivité électrique. D'une couche antireflet qui favorise une absorption maximale des rayons lumineux.

D'une grille conductrice (cathode) en surface et d'un contact métallique conducteur (anode) pour assurer le transport du courant électrique.

Les cellules de dernière génération intègrent également des structures multicouches réfléchissantes positionnées au-dessus du semi-conducteur. Cela permet aux rayons lumineux de rebondir plus longtemps à l'intérieur de la cellule, augmentant ainsi son efficacité.

I.3.5 Technologie des cellules photovoltaïques

On distingue trois principaux types de silicium utilisés : le silicium monocristallin, le silicium polycristallin et le silicium amorphe.

I.3.5.1 Cellules en silicium monocristallin

Le silicium cristallin est aujourd'hui le matériau le plus couramment utilisé pour les cellules photovoltaïques commerciales. Le terme « cristallin » signifie que tous les atomes sont organisés de manière régulière au sein du matériau, sans défauts de structure. Les cellules fabriquées en silicium monocristallin offrent les meilleurs rendements, pouvant atteindre jusqu'à 20 %.

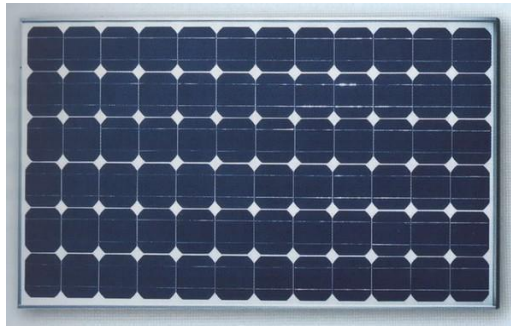


Figure I.6 : Cellule au Silicium Monocristallin.

I.3.5.2 Cellule en silicium poly-cristallin

Ce type de cellule est constitué de multiples cristaux de silicium formant de petits grains. Contrairement au silicium monocristallin, le silicium poly-cristallin présente des frontières entre les grains qui perturbent la circulation des électrons (Voir figure I.7). Cette particularité entraîne une diminution du rendement énergétique global de la cellule. En pratique, l'efficacité de conversion d'une cellule photovoltaïque commerciale à base de silicium poly-cristallin se situe généralement entre 11 % et 15 %.

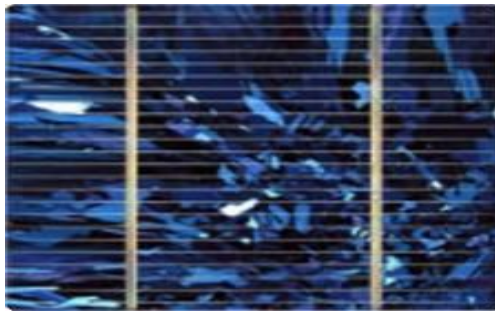


Figure I.7 : Cellule au silicium poly-cristallin.

I.3.5.3 Cellule en silicium amorphe

Dans ce type de cellule, le silicium est appliqué sous forme de couches minces sur un support, comme du verre ou un matériau souple. En raison de la structure désordonnée de ses atomes, sa capacité à conduire l'électricité est limitée. Les cellules en silicium amorphe sont principalement utilisées dans des applications nécessitant peu d'énergie ou lorsqu'une solution à faible coût est recherchée, telles que les montres, les calculatrices ou les dispositifs d'éclairage d'urgence. Leur fort pouvoir d'absorption permet d'utiliser des couches extrêmement fines, de l'ordre du micron. Toutefois, leur rendement reste faible (entre 7 % et 8 %) et leur performance tend à se dégrader plus rapidement sous exposition lumineuse.



Figure I.8 : Cellule au Silicium amorphe.

I.3.6 Avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques

Le tableau (I.1) met en évidence les points forts et les limites des principales technologies de cellules photovoltaïques actuellement les plus répandues sur le marché. Il permet ainsi de comparer leur efficacité, leur coût, leur durabilité ainsi que leurs domaines d'application respectifs.

Type de cellule	Durée de vie	Avantages	Inconvénients
Silicium monocristallin	Environ 35 ans	- Très bon rendement en ensoleillement direct.	- Faible efficacité en lumière diffuse (temps nuageux). - Coût de fabrication élevé.
Silicium polycristallin	Environ 35 ans	- Bon rendement en soleil direct (inférieur au monocristallin mais supérieur à l'amorphe).	- Moins performant en lumière diffuse. - Prix toujours relativement élevé.
Silicium amorphe	Moins de 10 ans	- Flexible, léger, économique. - Bon rendement en lumière diffuse.	- Faible rendement en plein soleil. - Durée de vie réduite.

Tableau I.1 : Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques.

I.4 Les panneaux solaires photovoltaïques

Pour obtenir une tension plus élevée adaptée aux besoins d'utilisation, les cellules photovoltaïques sont assemblées en série. Généralement, un module standard comporte 36 cellules, avec une tension nominale correspondant à celle requise par la charge. En raison de leur

fragilité face aux cassures et à la corrosion, les cellules sont encapsulées dans du verre ou un matériau plastique protecteur, formant ainsi un module photovoltaïque.

Ces modules peuvent ensuite être interconnectés en série et en parallèle afin d'accroître la tension et l'intensité disponibles. Cependant, il est essentiel de prendre certaines précautions, car la présence de cellules moins performantes ou l'ombrage partiel (causé par la poussière ou d'autres obstacles) peut entraîner des dommages irréversibles à certaines cellules du module.

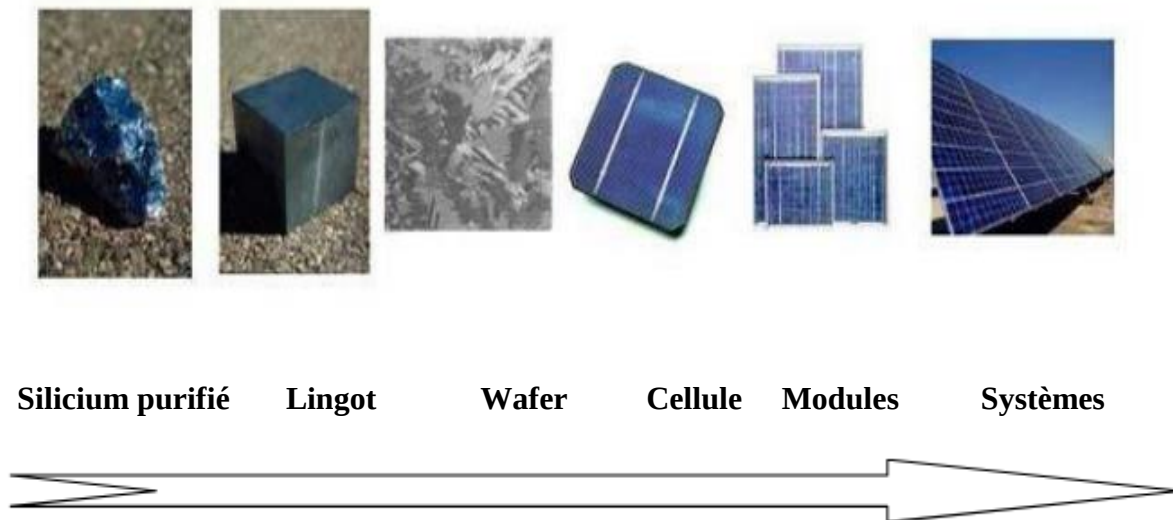


Figure I.9 : Evolution de constructions des systèmes de production PV.

I.4.1 Regroupement des cellules

I.4.1.1 Regroupement en série

Dans une configuration en série, comme illustré dans la figure (I.10), les cellules photovoltaïques sont traversées par le même courant. La caractéristique électrique résultant de ce type de connexion est obtenue par l'addition des tensions individuelles à un courant donné.

La figure (I.11) illustre la courbe caractéristique (I_s , V_s) d'un assemblage en série (noté par l'indice s) de n_s cellules identiques, chacune ayant un courant de court-circuit (I_{cc}) et une tension en circuit ouvert (V_{co}).

Les grandeurs résultantes de l'association sont les suivantes :

- **$I_{scc} = I_{cc}$** : le courant de court-circuit reste identique à celui d'une cellule unique.
- **$V_{sco} = n_s \times V_{co}$** : la tension de circuit ouvert est la somme des tensions des cellules connectées.

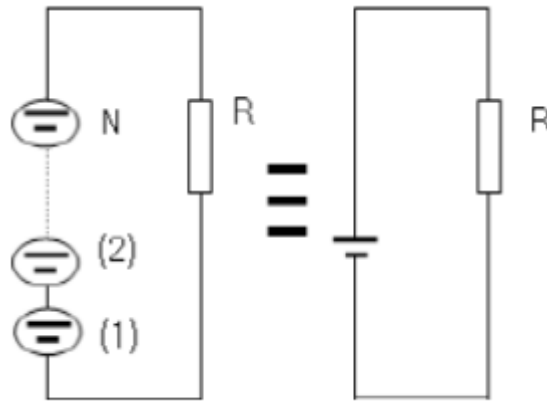


Figure I.10 : Association des modules en série.

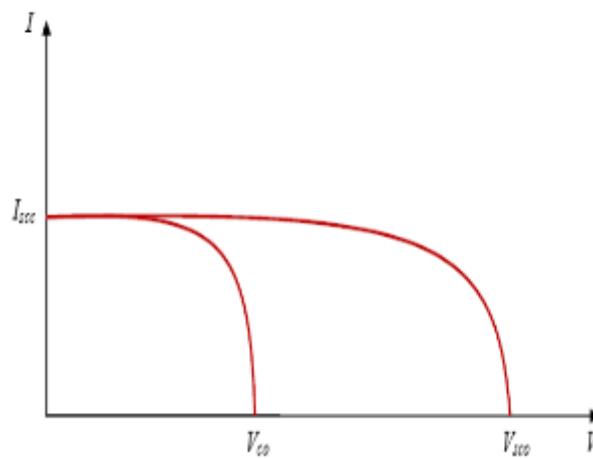


Figure I.11 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n cellules identiques.

I.4.1.2 Regroupement en parallèle

Dans une configuration de cellules connectées en parallèle, illustrée par la figure (I.12), toutes les cellules sont soumises à la **même tension**. L'intensité résultante est la **somme des courants** individuels à cette tension constante.

La figure (I.13) présente la caractéristique résultante de l'association en parallèle, notée (I_{pcc} , V_{pco}), pour un groupement de np cellules identiques, chacune ayant un courant de court-circuit (I_{cc}) et une tension de circuit ouvert (V_{co}).

Les relations suivantes décrivent cette configuration :

- **$I_{pcc} = np \times I_{cc}$** : le courant de court-circuit est multiplié par le nombre de cellules.
- **$V_{pco} = V_{co}$** : la tension de circuit ouvert reste la même qu'une cellule unique.

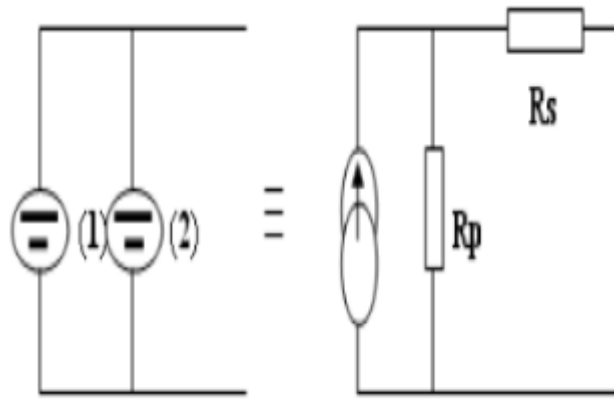


Figure I.12 : Association des modules en parallèle.

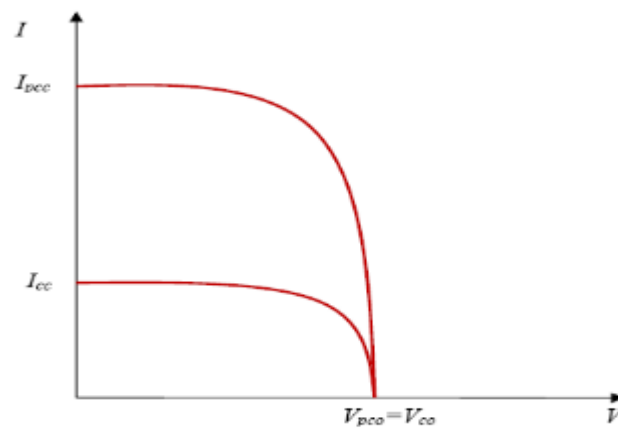


Figure I.13 : Caractéristique résultante d'un regroupement en parallèle de n cellules identiques.

I.4.2 Zones de fonctionnement du module solaire

La courbe caractéristique courant-tension (Voir figure I.14) d'un module solaire photovoltaïque représente son comportement électrique sous un éclairage et une température donnés. Cette courbe n'impose pas directement un point de fonctionnement : c'est la charge connectée au générateur qui fixe la tension et le courant de fonctionnement.

La figure (I .14) identifie trois zones caractéristiques :

- Zone I - Générateur de courant : Dans cette zone, le courant reste presque constant même si la tension varie. Le module fonctionne comme un générateur de courant. Cette zone correspond au début de la courbe (Voir figure I.14).
- Zone II - Zone de puissance optimale : C'est la région du coude de la courbe, entre les zones de courant constant et de tension constante. Elle contient le point de puissance maximale (MPP). C'est la zone idéale de fonctionnement, permettant de maximiser l'énergie produite.

- La zone III, bien que non mentionnée ici, correspond en général à la zone où la tension reste quasi constante mais le courant chute brusquement, simulant un comportement de générateur de tension.) La zone (III) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

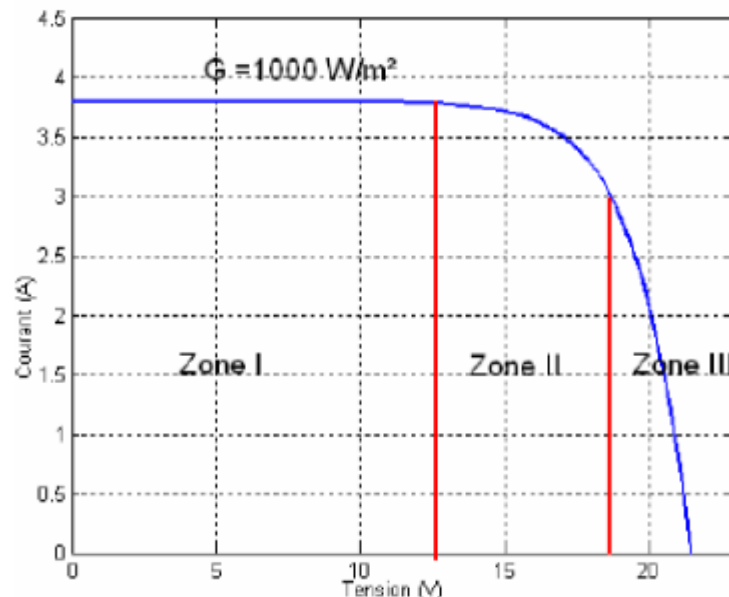


Figure I.14 : Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C.

I.4.3 Fonctionnement optimal du module photovoltaïque

Pour tirer le meilleur parti d'un module photovoltaïque, il est essentiel de l'exploiter au point de puissance maximale, aussi appelé point de fonctionnement optimal (V_{opt} , I_{opt}). Ce point correspond à la condition dans laquelle le générateur délivre la puissance maximale possible sous un éclairement et une température donnés. Ce point varie continuellement en fonction de l'environnement (ensoleillement G et température T).

Pour assurer cette performance, la charge électrique connectée doit présenter une impédance optimale R_{opt} , égale à :

$$R_{opt} = I_{opt} \cdot V_{opt} \quad (I.2)$$

L'impédance doit être adaptée en temps réel pour suivre les variations d'éclairement et de température, ce qui justifie l'usage de systèmes d'adaptation automatique comme les régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracking).

I.4.4 Avantages des panneaux solaires mobiles (Suiveurs solaires)

Les panneaux fixes captent au mieux l'énergie solaire uniquement à midi, moment où l'irradiation solaire est perpendiculaire. Durant le reste de la journée, l'angle du soleil diminue leur efficacité.

Les suiveurs solaires, quant à eux, orientent automatiquement les panneaux vers le soleil tout au long de la journée, maintenant une exposition optimale. Le résultat est un doublement de la production d'énergie dans certaines conditions : un système fixe de 1 kW peut produire environ 5,5 kWh/jour, tandis qu'un système avec suiveur peut atteindre 11 kWh/jour, en journée ensoleillée.



Figure I.15 : Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système.

I.4.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

Les avantages	Les inconvénients
L'énergie photovoltaïque est une technologie fiable et sécurisée. Les panneaux solaires sont généralement couverts par une garantie de 25 ans, témoignant de leur durabilité. Ce système permet de générer de l'électricité directement sur le site d'installation, ce qui le rend idéal pour des lieux isolés, sans nécessité de connexion au réseau électrique. De plus, il fonctionne de manière totalement silencieuse, contrairement aux systèmes éoliens.	Les panneaux solaires présentent un coût élevé en raison de la complexité technologique qu'ils impliquent. Par ailleurs, la filière photovoltaïque est confrontée à une pénurie de silicium : la forte hausse de la demande, mal anticipée, dépasse la capacité actuelle de production, tant pour les besoins de l'industrie électronique que solaire.

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

I.5 Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable issue de la transformation de la lumière solaire en électricité, grâce à des matériaux spécifiques comme les semi-conducteurs (silicium, germanium, arséniure de gallium, etc.). Pour être exploitable sur le plan pratique, cette transformation nécessite un ensemble d'équipements appelé système photovoltaïque, intégrant les composants permettant d'adapter l'électricité produite aux besoins de consommation (régulation, conversion courant continu/courant alternatif, etc.).

Ce chapitre a permis de présenter les notions fondamentales relatives au système photovoltaïque, la configuration des modules solaires, ainsi qu'une description des différentes zones de fonctionnement, sans oublier les principaux avantages et limites de cette technologie.

Chapitre II : Conception du système de poursuite solaire

II.1 Introduction

Un suiveur solaire est un dispositif basé sur le principe de l'héliostat, conçu pour orienter en permanence les capteurs solaires vers le soleil. Cette orientation dynamique permet d'optimiser considérablement la captation de l'énergie solaire et, par conséquent, d'augmenter la productivité énergétique du système.

Le suivi du soleil peut être simulé selon deux axes (azimut et altitude), assurant ainsi une orientation précise tout au long de la journée. Il existe également des systèmes à un seul axe, généralement en azimut, offrant une solution plus simple mais moins performante.

II.2 Partie A : Trajectoire solaire

L'énergie solaire reçue par une surface située hors de l'atmosphère terrestre est déterminée par des lois purement astronomiques et géométriques. Ces lois dépendent principalement de la latitude du site, de la déclinaison solaire, de l'heure solaire et de l'orientation de la surface exposée.

La position du soleil dans le ciel varie en fonction du temps solaire et du jour de l'année, et elle peut être décrite à l'aide de plusieurs angles caractéristiques :

II.2.1 L'angle d'altitude solaire (α)

L'angle d'altitude, aussi appelé angle d'élévation, correspond à l'angle formé entre le rayon direct du soleil et le plan horizontal (voir Figure II.1).

Cet angle peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

(À compléter avec l'équation que tu veux insérer)

$$\alpha = \text{Arcsin}(\sin\varphi * \sin\delta + \cos\varphi * \cos\delta * \cos\omega). \quad (\text{I.1})$$

Avec :

φ : Latitude du lieu.

δ : Déclinaison solaire.

ω : Angle horaire.

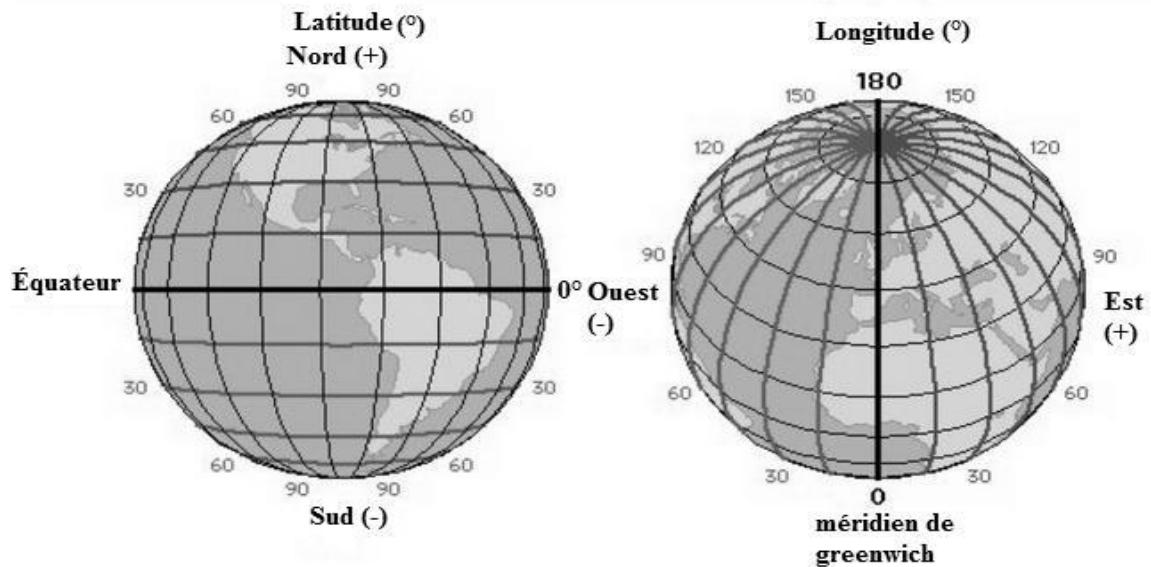


Figure II.1 : Représentation latitude et longitude.

La latitude est une grandeur angulaire qui exprime la position nord-sud d'un point sur la surface terrestre. Elle correspond à l'angle formé entre le plan de l'équateur et la droite reliant le centre de la Terre au point considéré. Sa valeur varie de 0° à l'équateur jusqu'à $\pm 90^\circ$ aux pôles (90° Nord ou Sud).

La longitude, également une grandeur angulaire, définit la position est-ouest d'un point à la surface du globe. Elle est mesurée par rapport au méridien de référence de Greenwich. Sa valeur s'étend de -180° (180° Ouest) à $+180^\circ$ (180° Est).

II.2.2. La déclinaison solaire (δ , en degrés)

Il s'agit de l'angle formé entre le vecteur reliant le centre de la Terre au Soleil et le plan équatorial terrestre. Cette valeur varie au cours de l'année : elle atteint un maximum de $+23,45^\circ$ lors du solstice d'été (vers le 21 juin), un minimum de $-23,45^\circ$ au solstice d'hiver (vers le 21 décembre), et elle est nulle (0°) aux équinoxes (environ le 21 mars et le 23 septembre). Cette variation résulte de l'inclinaison de l'axe terrestre par rapport au plan de l'écliptique, phénomène à l'origine de l'alternance des saisons.

II.2.3. L'angle d'azimut solaire (Az , en degrés)

Il s'agit d'un angle mesuré dans le plan horizontal, défini entre le méridien local (généralement le sud) et la projection horizontale du rayon solaire incident. Il correspond à la direction horizontale d'où proviennent les rayons du soleil, par rapport à un point d'observation au sol. La figure (II.2) illustre cet angle.

$$Az = \text{Arcsin}(\sin \omega * \cos \delta \div \cos \alpha) \quad (\text{II.2})$$

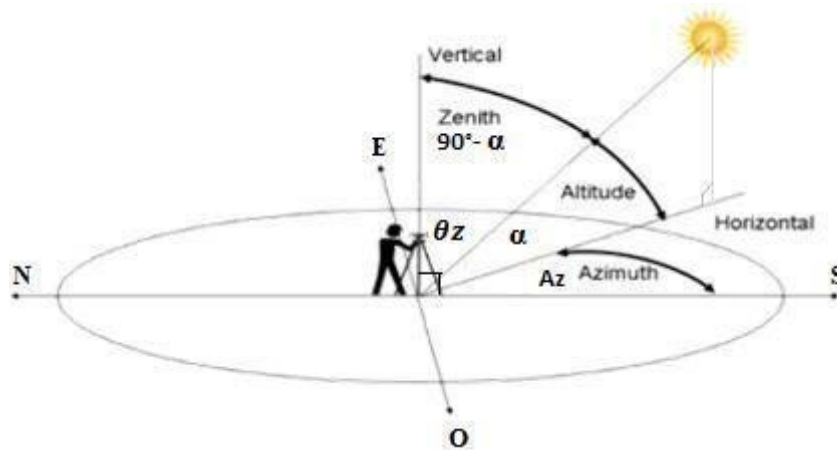


Figure II.2 : Représentation des angles Zénith, Azimut et altitude solaires.

II.3 Partie B : Le système de poursuite solaire

II.3.1 État de l'art des suiveurs solaires

Les premières utilisations des systèmes de suivi solaire remontent aux environs de 1750, reposant sur le concept de l'héliostat. À cette époque, la rotation du miroir était commandée par un mécanisme horloger. L'une des plus anciennes descriptions de ce système figure dans les écrits de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacob 's Gravesande.

Les champs d'héliostats suivent le déplacement du soleil en orientant les rayons lumineux vers un point focal unique, concentrant ainsi la lumière à l'aide de miroirs réfléchissants tout au long de la journée. Ce procédé est notamment utilisé dans les centrales solaires à concentration, appelées également champs d'héliostats. En France, un exemple notable est la centrale solaire Thémis, qui a été opérationnelle de 1983 à 1986 avant d'être reconvertie en site expérimental à partir de 2007.



Figure II.3 : Modèle d'un héliostat dans ses premières applications.



Figure II.4 : Champ d'héliostat - centrale solaire Thémis France.

II.3.2 Principes fondamentaux des suiveurs solaires

Un suiveur solaire est un mécanisme conçu pour orienter automatiquement un panneau photovoltaïque en direction du soleil. Ce procédé permet d'améliorer considérablement le rendement, notamment en début et fin de journée, périodes pendant lesquelles un panneau fixe ne capte pas les rayons solaires de manière optimale. Le coût initial d'un système à suivi solaire varie selon le type et la dimension du dispositif utilisé. Toutefois, un traqueur bien dimensionné peut optimiser la production en nécessitant moins de panneaux, ce qui compense en partie les coûts d'installation.

II.3.3 Catégories de suiveurs solaires

Les suiveurs solaires se répartissent principalement en deux catégories : les systèmes passifs et les systèmes actifs, ces derniers comprenant des dispositifs à un seul axe ou à deux axes de rotation.

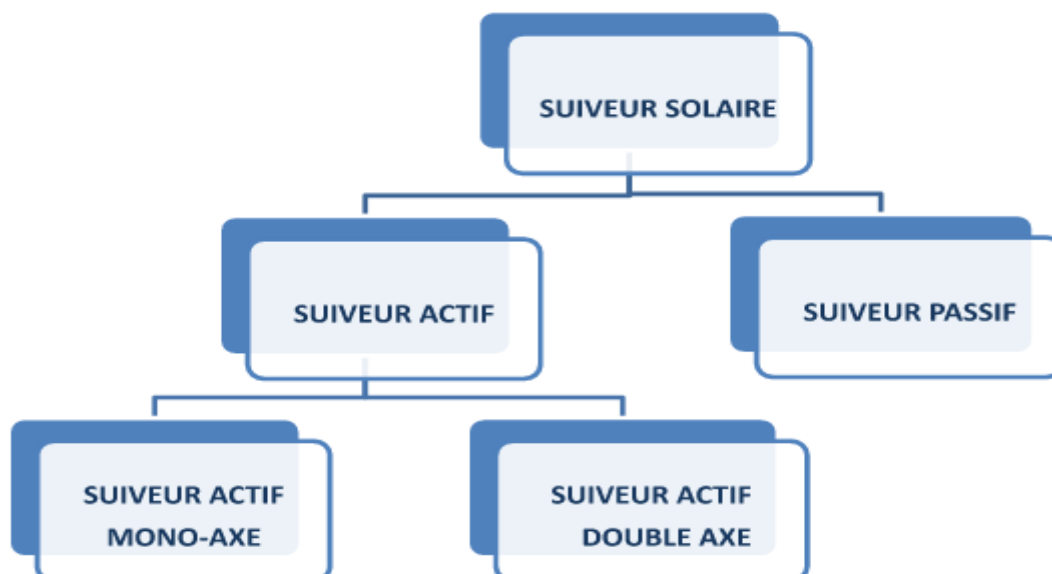


Figure II.5 : Types de suiveurs solaires.

II.3.3.1 Suiveurs solaires passifs

Un suiveur solaire passif repose sur un mécanisme simple basé sur la dilatation de fluides. Il se compose généralement de deux tubes en cuivre placés de part et d'autre du panneau solaire, orientés vers l'Est et l'Ouest (voir figure II.6). Ces tubes contiennent un fluide chimique qui se vaporise à basse température. Lorsque l'un des côtés du panneau reçoit plus de rayonnement solaire, la température augmente, entraînant la vaporisation du fluide dans le tube concerné. Cette vapeur occupe un volume plus important, déplaçant la partie liquide vers la zone moins exposée, ce qui provoque un déséquilibre et oriente automatiquement le panneau vers le soleil.

Ce déplacement entraîne un basculement du capteur vers la direction la plus ensoleillée, rétablissant ainsi son équilibre. L'un des grands avantages de ce type de suiveur est qu'il n'exige aucune alimentation électrique externe pour orienter le panneau, car le mécanisme fonctionne uniquement grâce à l'énergie thermique du rayonnement solaire.

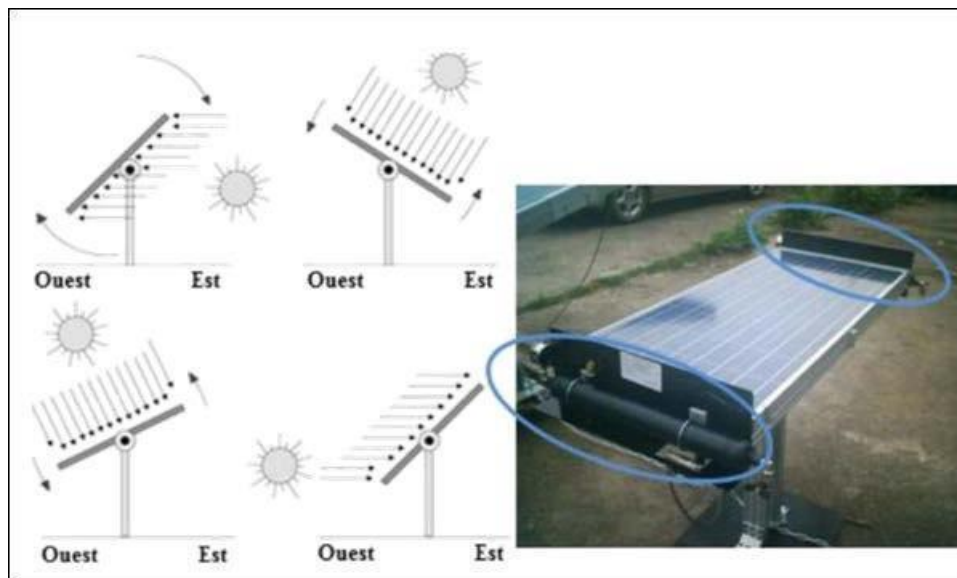


Figure II.6 : Suiveur solaire passif.

II.3.3.2 Suiveur solaire actif

Les suiveurs actifs s'appuient sur des capteurs de lumière pour détecter la position du soleil et ajustent en continu l'orientation du panneau afin de maximiser l'exposition au rayonnement solaire. Cette catégorie inclut deux principales variantes : les suiveurs à un axe et à deux axes. Comparés aux modèles passifs, ils offrent une plus grande précision de suivi et fonctionnent de manière entièrement automatisée, sans besoin d'intervention humaine.

II.3.3.3 Suiveur solaire mono-axe

Ce type de dispositif effectue une rotation autour d'un seul axe, généralement orienté selon l'azimut, c'est-à-dire d'Est en Ouest au cours de la journée. L'inclinaison du panneau reste fixe et est calculée selon un angle optimal basé sur la latitude du site d'installation, afin de capter le maximum d'ensoleillement annuel. La position azimutale du panneau change tout au long de la

journée, alors que son inclinaison reste inchangée. Ce système de suivi simple est le plus répandu dans les installations photovoltaïques.

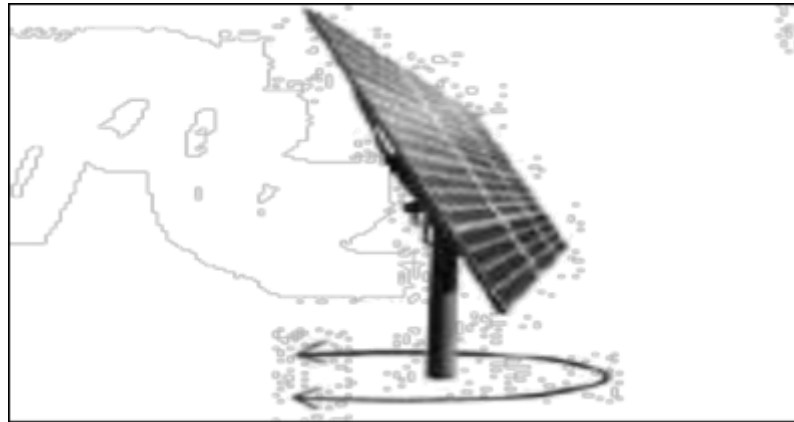


Figure II.7 : Panneaux solaires avec système de poursuite mono-axiale.

II.3.3.4 Suiveur solaire à double axe

À la différence du modèle à un seul axe, le suiveur à double axe permet un ajustement simultané en azimuth et en inclinaison, assurant ainsi une orientation optimale du capteur vers le soleil tout au long de la journée. Bien que plus encombrant, ce type de système offre un rendement supérieur grâce à son suivi plus précis du trajet solaire.



Figure II.8 : Panneau solaire avec système de poursuite bi-axiale.

II.3.4 Méthodes et techniques de suivi solaire

Les technologies utilisées dans les systèmes de poursuite varient selon les concepteurs. On distingue principalement deux approches pour simuler le suivi du soleil.

II.3.4.1 Méthode basée sur des capteurs lumineux

Cette approche repose sur l'utilisation de capteurs de lumière ou de photorésistances afin de localiser la position du soleil à tout moment. Cela permet un ajustement immédiat de

l'orientation du panneau pour une exposition maximale. Ce procédé fonctionne de manière autonome, quelle que soit la localisation géographique du dispositif.

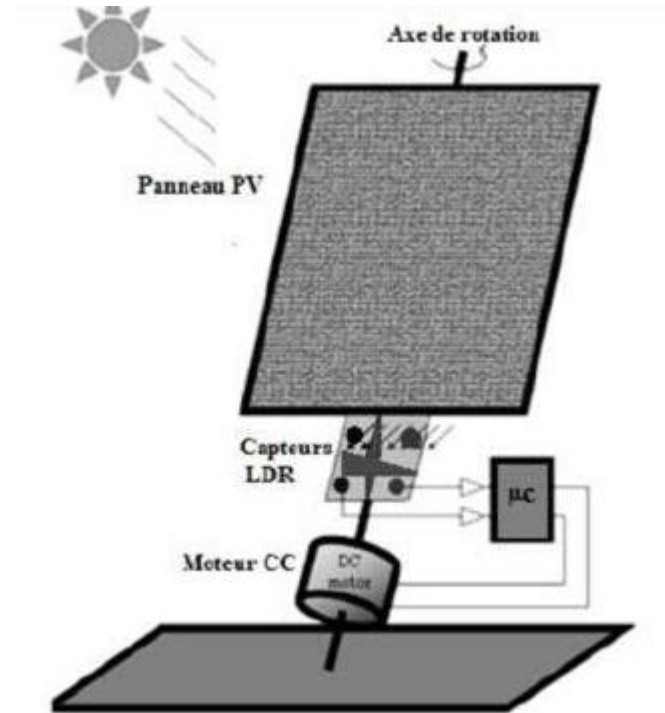


Figure II.9 : Suiveur basé sur des capteurs de lumière.

II.3.4.2 Méthode fondée sur les données astronomiques

Cette technique s'appuie sur des calculs issus de modèles géométriques et astronomiques pour déterminer la position du soleil. Lors de la mise en service du système, il est nécessaire d'entrer des paramètres tels que la latitude, la longitude, la date et l'heure locale

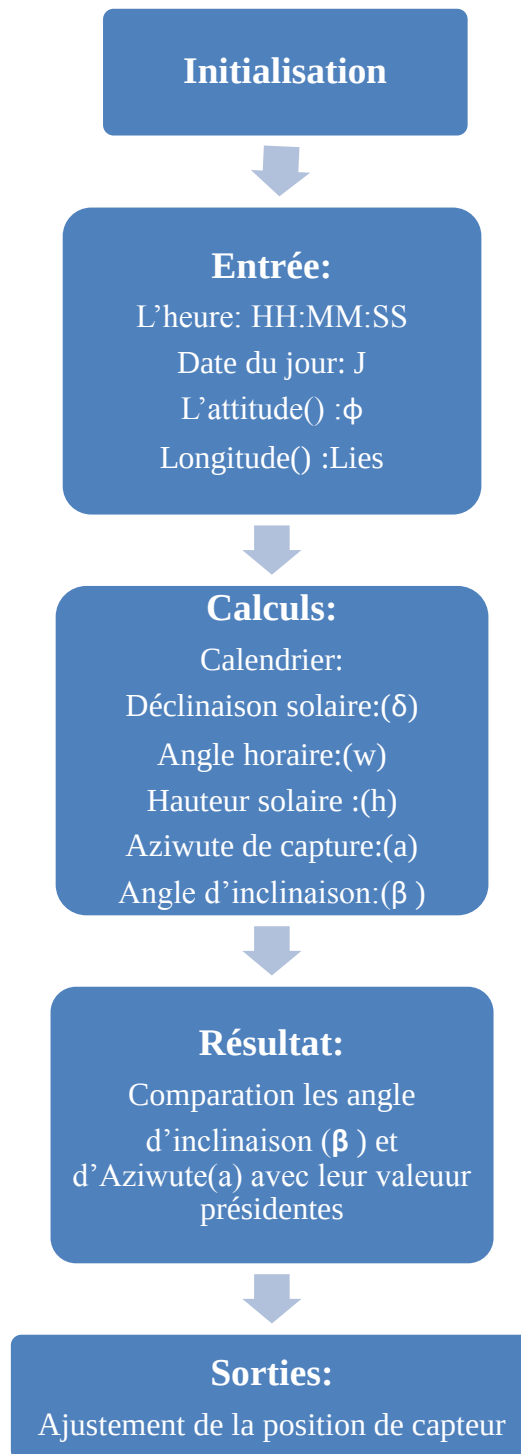


Figure II.10 : Méthode de poursuite astronomique.

II.3.5 Étapes du fonctionnement

Premièrement, il est nécessaire d'entrer les données essentielles telles que l'heure, la date, ainsi que les coordonnées géographiques (latitude et longitude) du site d'installation.

*- Ensuite, le système établit un calendrier solaire comprenant le temps solaire vrai, les horaires du lever et du coucher du soleil, ainsi que le jour de l'année. À partir de ces

informations, il calcule les angles géométriques nécessaires, notamment l'angle d'inclinaison du panneau (mouvement vertical) et l'angle d'orientation horizontale (azimut) par rapport au sud.

*- le dispositif compare les angles nouvellement calculés avec ceux précédemment enregistrés afin d'ajuster la position du panneau en pilotant les moteurs associés aux axes horizontal (azimut) et vertical (inclinaison).

II.3.6 Avantages et inconvénients des suiveurs solaires

II.3.6.1 Avantages

*- Les suiveurs solaires permettent une orientation constante des capteurs vers le soleil, ce qui améliore le rendement global et réduit le nombre de panneaux nécessaires. Dans le domaine photovoltaïque, cela peut entraîner une augmentation de la production d'énergie de 30 à 40 %.

*- De plus, cette technologie permet d'optimiser l'espace utilisé dans un champ solaire, diminue la période d'amortissement de l'investissement (environ 4 ans) et assure un rendement stable, même lors d'une couverture nuageuse ou pendant les périodes moins ensoleillées de la journée.

II.3.6.2 Inconvénients

*- Le principal inconvénient réside dans le coût initial élevé, particulièrement pour les systèmes à double axe.

*- En outre, la maintenance peut s'avérer complexe, les composants mécaniques ayant rarement une durée de vie excédant 20 ans.

Pour des raisons de sécurité, les panneaux solaires doivent être parallèles au sol lors de vents forts.

II.4 Description des composants du système

Un tracker solaire, aussi appelé suiveur solaire, est un système qui permet de maximiser la production d'énergie solaire en suivant la trajectoire du soleil tout au long de la journée. Les principaux composants d'un tracker solaire incluent : les panneaux solaires, le bras mécanique, le capteur, l'anémomètre, les onduleurs, et le système de commande.

II.4.1 Le dispositif programmable Arduino

Arduino est une plateforme de prototypage dédiée à la création d'objets interactifs. Elle se compose d'une carte électronique et d'un environnement de programmation, permettant aux

utilisateurs de concevoir leurs projets à travers l'expérimentation directe, grâce à une multitude de ressources disponibles en ligne.

Il s'agit d'un projet open source, ce qui signifie que ses schémas, plans et codes sont accessibles librement. La vaste communauté de développeurs et d'utilisateurs contribue activement à sa documentation, offrant ainsi un support constant et riche.

Les projets simulés avec Arduino peuvent fonctionner de manière autonome ou être reliés à d'autres logiciels présents sur un ordinateur, tels que Flash, Processing, Max/MSP ou encore MATLAB. Les cartes Arduino reposent sur une interface d'entrées/sorties simple, associée à un environnement de développement inspiré du langage C.

II.4.2 Structure de la carte Arduino UNO

La carte Arduino UNO offre un environnement de développement s'appuyant sur des outils open source pour la programmation. Le programme, une fois compilé sous forme de fichier HEX, est transféré facilement vers la mémoire du microcontrôleur via une connexion USB. Des bibliothèques de fonctions prêtes à l'emploi facilitent la gestion des entrées/sorties.

Cette carte repose sur le microcontrôleur ATmega328, accompagné de divers composants électroniques. Elle intègre 1 Ko de mémoire morte, 14 broches d'entrées/sorties numériques (dont 6 peuvent servir de sorties PWM), 6 entrées analogiques, un oscillateur à quartz de 16 MHz, une interface USB, un bouton de réinitialisation, ainsi qu'une prise d'alimentation externe via jack.

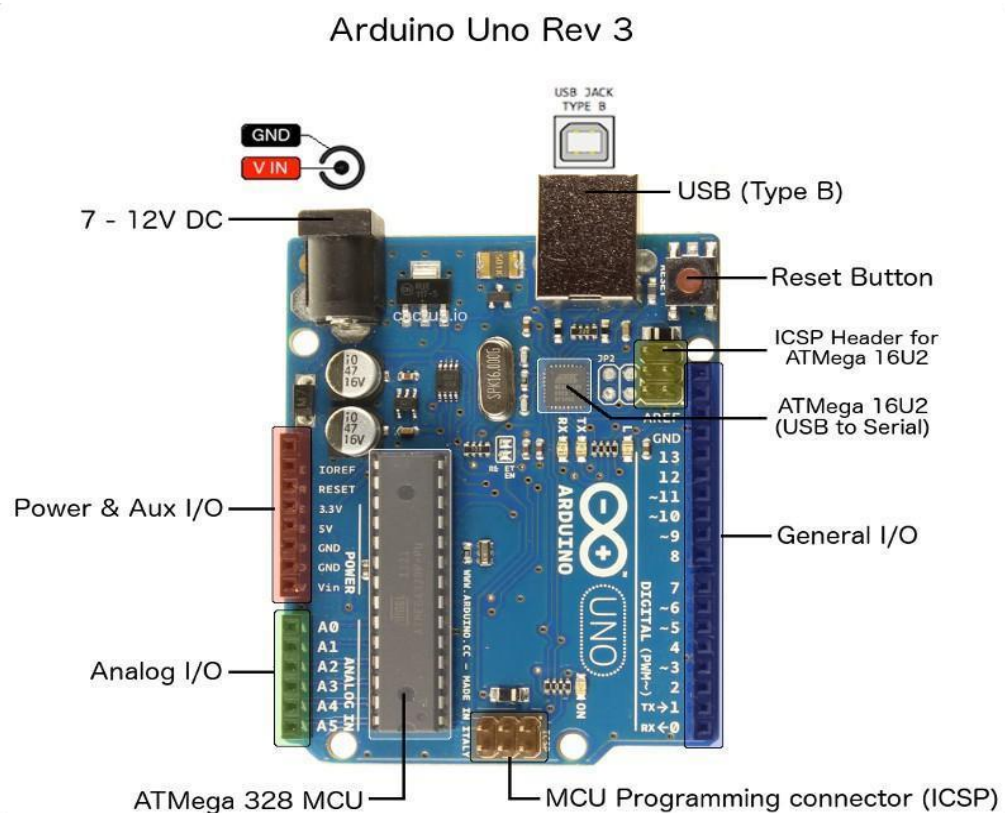


Figure II.11 : Constitution de la carte Arduino UNO.

II.4.3 Pourquoi avoir choisi l'Arduino UNO

De nombreuses cartes électroniques reposant sur des microcontrôleurs existent aujourd'hui pour répondre aux besoins de l'électronique programmable. Ces plateformes permettent d'abstraire les aspects complexes de la programmation, en les présentant de manière simple et accessible.

Dans ce contexte, Arduino se distingue par sa capacité à simplifier l'utilisation des microcontrôleurs tout en offrant plusieurs avantages significatifs aux utilisateurs intéressés, tels que :

- *- **Multi-plateforme** : Le logiciel Arduino, développé en langage JAVA, fonctionne sous différents systèmes d'exploitation, notamment Windows, macOS et Linux. À l'inverse, la plupart des environnements basés sur des microcontrôleurs sont généralement restreints à une utilisation sous Windows.

- *- **Un environnement de développement simple et accessible** : L'interface de l'IDE Arduino est conçue pour être intuitive, ce qui facilite la prise en main par les débutants, tout en offrant suffisamment de fonctionnalités pour répondre aux besoins des utilisateurs expérimentés.

- *- **Logiciel libre et adaptable** : Le langage Arduino ainsi que son environnement de développement sont publiés sous licence open source. Ils peuvent donc être modifiés et enrichis par des développeurs compétents. L'application Arduino, écrite en JAVA et compatible avec plusieurs plateformes, joue le rôle d'éditeur de code, de compilateur et permet le transfert des programmes via différents types de connexions série (USB, Bluetooth, RS232 selon les cartes).

- *- **Matériel libre et modifiable** : Les cartes Arduino utilisent des microcontrôleurs de type ATMEL (ATMEGA8, ATMEGA168, ATMEGA328). Leurs schémas électroniques sont rendus publics sous une licence Creative Commons, ce qui permet aux concepteurs de modifier, d'adapter ou même de créer leurs propres versions améliorées. Même les débutants peuvent assembler une version sur plaque d'essai, à des fins pédagogiques ou pour réduire les coûts.

II.4.4 Caractéristiques techniques de l'Arduino UNO

Microcontrôleur	ATmega 328
Tension de fonctionnement	5 V
Tension d'alimentation (recommandé)	7-12 V
Tension d'alimentation (limite)	6-20 V
Broche E/S numériques	14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM)
Broche d'entrée analogique	6 (utilisable en broches E/S numérique)
Intensité Maxi disponible par broche E/S (5V)	40 mA
Intensité Maxi disponible pour la sortie 3,3V	50 mA
Mémoire programme flash	32 KB (ATmega328) dont 0,5 sont utilisés par le boot loader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	2 KB (ATmega 328)
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	1KB (ATmega 328)
Vitesse d'horloge	16 MHz

Tableau II.1 : Caractéristiques techniques de l'Arduino UNO.

II.4.5 Servomoteur

Les servomoteurs sont des moteurs particuliers capables de pivoter sur un angle d'environ 180° tout en maintenant avec précision la position angulaire souhaitée.

Ils sont fréquemment utilisés dans le domaine du modélisme pour piloter des éléments mécaniques tels que les gouvernes d'avions ou les accélérateurs de moteurs thermiques. En robotique, ils trouvent aussi leur utilité dans la conception de petits robots, comme actionneurs ou dispositifs d'affichage rotatifs.

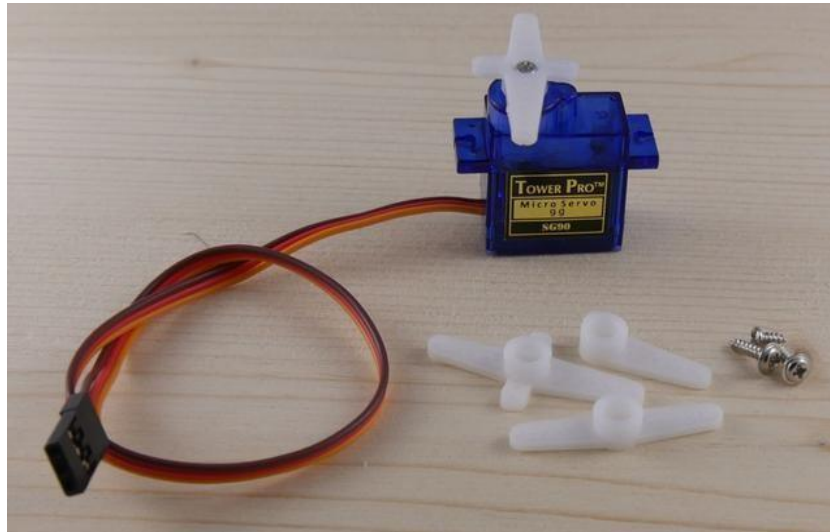


Figure II.12 : Servomoteur chinois "9 grammes".

Il existe plusieurs catégories de servomoteurs, qui varient en taille, en poids et en couple (force de rotation). L'illustration suivante montre un modèle très répandu dans le domaine du modélisme : le Futaba S3003.

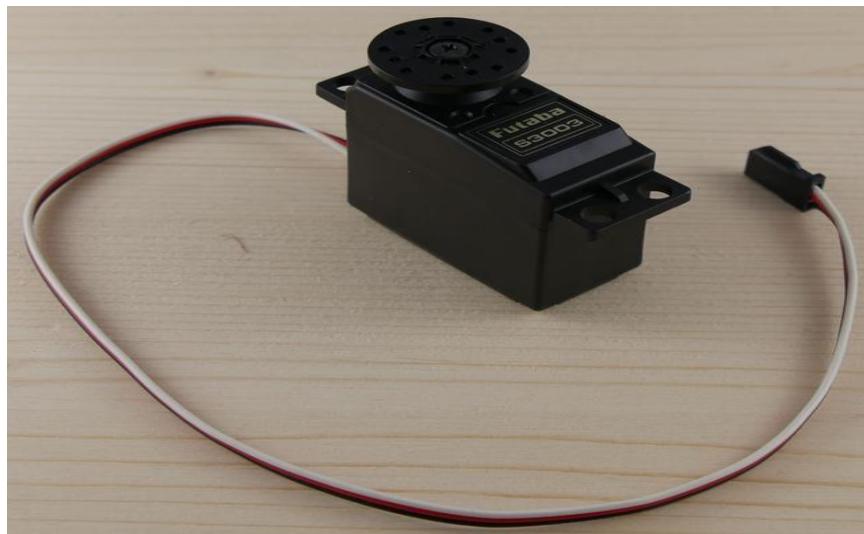


Figure II.13 : Photo représentant un Servomoteur Futaba S3003.

II.4.5.1 Principe de fonctionnement d'un servomoteur

Le servomoteur intègre un petit circuit électronique qui pilote un moteur à courant continu en s'appuyant sur les données d'un potentiomètre interne mesurant la position. La sortie du moteur est connectée à un ensemble d'engrenages qui permet d'amplifier le couple (force de rotation) en diminuant la vitesse de rotation.

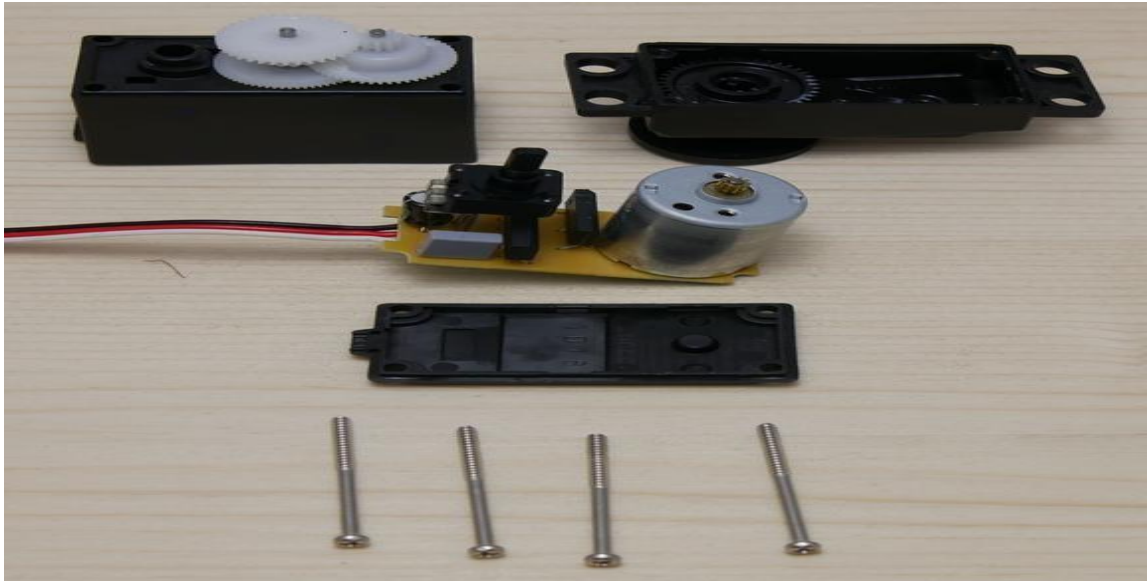


Figure II.14 : Vue éclatée d'un servomoteur.

Lorsque le moteur est en rotation, les engrenages s'activent, mettant en mouvement le bras du servomoteur, qui à son tour entraîne le potentiomètre. Le circuit électronique intégré ajuste en permanence la vitesse du moteur afin de maintenir le potentiomètre et donc le bras à la position souhaitée. Il suffit de donner une commande (par exemple : « rester à 45° »), et le servomoteur s'efforce de conserver cette position avec précision.

Cette commande est transmise sous forme d'un signal numérique, à savoir une impulsion. Pour que le servomoteur reste à une position stable, une impulsion doit être envoyée toutes les 20 millisecondes, soit à une fréquence de 50 Hz. La durée de cette impulsion varie entre 1 et 2 millisecondes :

- Une impulsion de 1 ms correspond à une position de 0° .
- Une impulsion de 2 ms correspond à 180° .
- Une durée intermédiaire permet d'obtenir un angle proportionnel (par exemple, une impulsion de 1,5 ms positionne le bras à 90°).

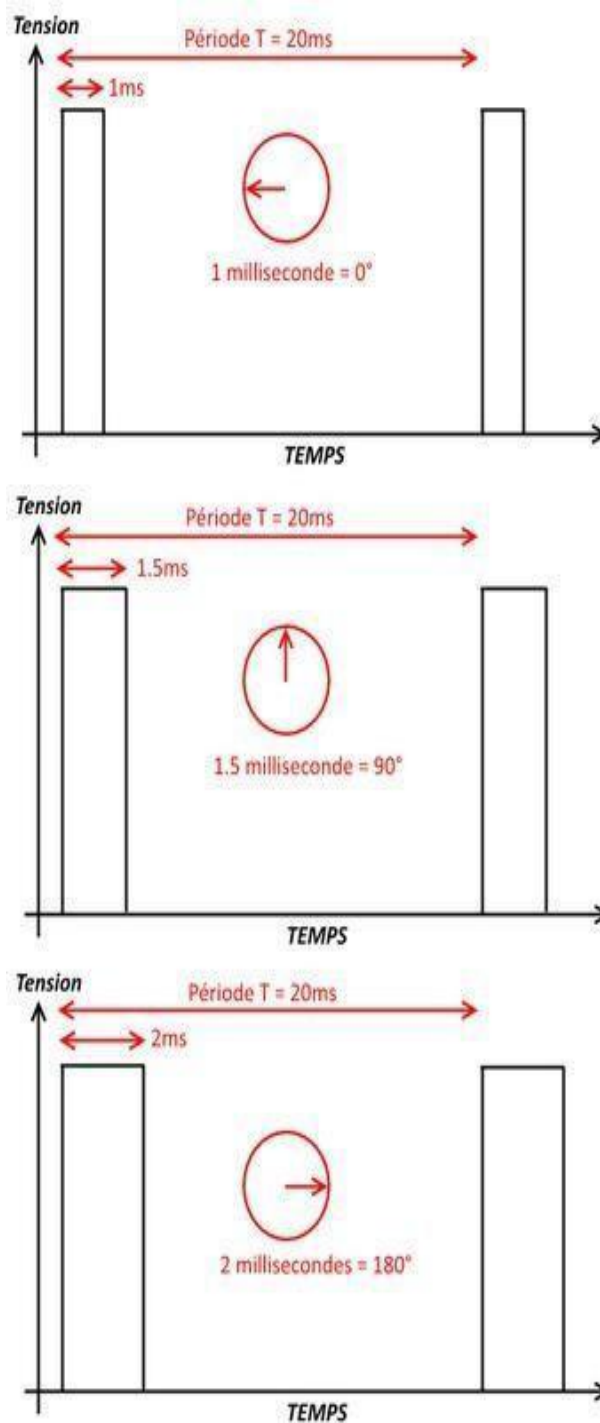


Figure II.15 : Illustration du signal de contrôle.

II.4.6 Capteur LDR

La photo-résistance, ou LDR (Light Dependent Resistor) est un composant électronique dont la résistance électrique varie en fonction de l'intensité lumineuse reçue. Elle est constituée de matériaux semi-conducteurs comme le sulfure ou le sélénure de cadmium. Ce type de capteur est

Couramment utilisé pour détecter la lumière dans divers dispositifs tels que les appareils photo, les compteurs de passage ou les systèmes d'alarme.

Bien qu'elle soit de plus en plus remplacée par la photodiode, la LDR a été choisie dans le cadre de notre projet en raison de son temps de réponse particulièrement rapide.

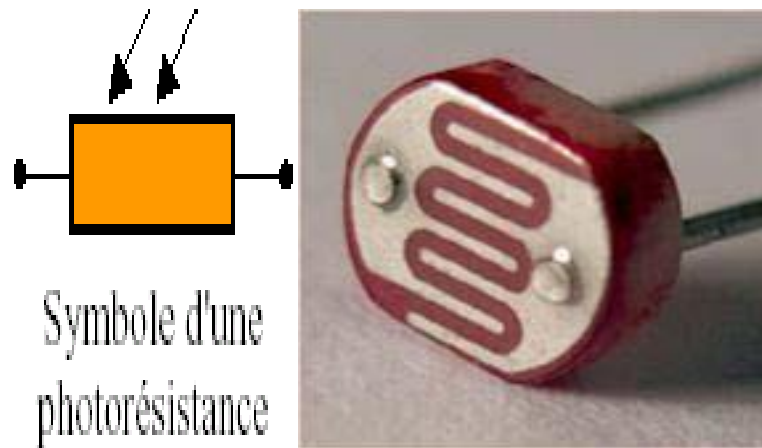


Figure II.16 : Symbole et capteur LDR.

II.4.6.1 Principe de fonctionnement

À basse température, un cristal semi-conducteur contient très peu d'électrons libres, ce qui limite fortement sa conductivité électrique, le rendant proche d'un isolant. Cependant, lorsque la température du cristal augmente, certains électrons liés dans les liaisons covalentes acquièrent suffisamment d'énergie pour se libérer. Ces électrons libres peuvent alors circuler dans le matériau, augmentant ainsi sa conductivité.

À température ambiante, si un cristal semi-conducteur est exposé à une lumière incidente, l'énergie des photons peut suffire à libérer des électrons initialement engagés dans les liaisons covalentes entre les atomes du cristal. Plus l'intensité lumineuse augmente, plus le nombre d'électrons libérés et donc disponibles pour conduire le courant sera important. Par conséquent, la résistance de la LDR diminue lorsque la lumière reçue augmente, établissant ainsi une relation inversement proportionnelle entre l'éclairement et la résistance. La sensibilité de ce comportement dépend toutefois de la fréquence de la lumière.

Pour convertir cette variation lumineuse en une tension exploitable, on utilise un montage en diviseur de tension.

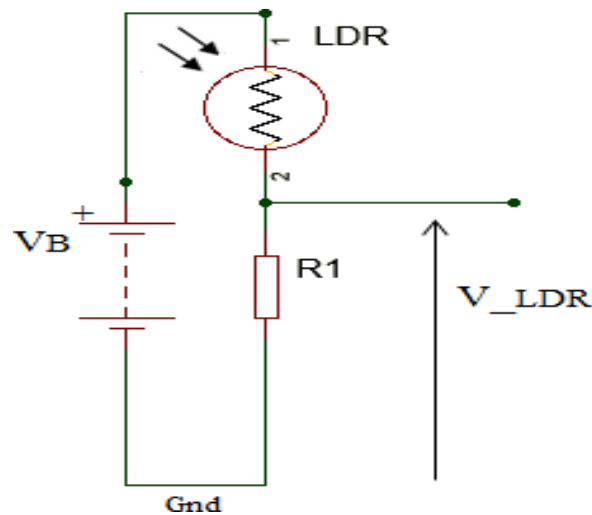


Figure II.17 : Circuit équivalent du capteur LDR utilisé.

Tension délivrée par le capteur est donnée par la relation:

$$V_{LDR} = V_B \times \frac{R_1}{R_1 + R_{LDR}}$$

(II.1)

Où :

VB : Tension batterie (V).

R-LDR : Résistance de la LDR (Ω).

II.4.7 Câble USB

Le câble USB permet à la fois d'alimenter un projet Arduino, de programmer la carte (via Arduino IDE) mais aussi d'utiliser le Moniteur Série.



Figure II.18 : Câble USB type A/B (Arduino UNO).

II.5 Comparaison des systèmes

Le système de suivi solaire constitue une avancée essentielle dans le domaine de la production d'énergie photovoltaïque. Grâce à l'intégration de capteurs LDR, d'un microcontrôleur Arduino et de moteurs de commande, il est possible d'assurer un alignement optimal des panneaux avec les rayons du soleil, améliorant ainsi considérablement le rendement global du système. L'algorithme de commande, qu'il soit basé sur une logique floue, un PID ou un simple seuil de comparaison, joue un rôle crucial dans la précision et la rapidité de la réaction du suiveur. La robustesse mécanique et la consommation énergétique du moteur sont également des facteurs déterminants dans le choix de la solution de poursuite. Des études comparatives entre les modèles à un axe et à deux axes révèlent que le compromis entre coût, complexité et gain énergétique dépend fortement du site d'installation, du climat local et du profil de consommation.

Revue des Méthodes de Contrôle Conventionnelles et Leurs Limitations Les systèmes de suivi solaire traditionnels utilisent principalement des méthodes de contrôle proportionnel-intégral-dérivé (PID) ou des logiques de seuil basées sur des capteurs de lumière. Bien que ces approches soient relativement simples à mettre en œuvre, elles souffrent d'un manque de flexibilité face aux variations rapides des conditions météorologiques et à l'occultation temporaire du soleil. De plus, elles ne prennent pas en compte les données astronomiques, ce qui peut réduire l'efficacité globale du système en cas de ciel partiellement couvert. La rigidité de ces systèmes rend leur adaptation aux environnements dynamiques difficile, d'où la nécessité d'approches plus intelligentes.

En outre, les systèmes PID nécessitent souvent un ajustement minutieux des paramètres pour garantir un bon fonctionnement, ce qui peut s'avérer fastidieux en conditions variables. Leur performance peut se dégrader en présence de bruits de mesure ou de retards dans le système, ce qui compromet la précision du suivi solaire.

II.5.1 Revue des méthodes de contrôle conventionnelles et leurs limitations

Les systèmes de suivi solaire traditionnels utilisent principalement des méthodes de contrôle proportionnel-intégral-dérivé (PID) ou des logiques de seuil basées sur des capteurs de lumière. Bien que ces approches soient relativement simples à mettre en œuvre, elles souffrent d'un manque de flexibilité face aux variations rapides des conditions météorologiques et à l'occultation temporaire du soleil. De plus, elles ne prennent pas en compte les données astronomiques, ce qui peut réduire l'efficacité globale du système en cas de ciel partiellement couvert.

II.5.2 Mise en Œuvre d'Algorithmes de contrôle intelligents

(Logique Floue, Réseaux de Neurones) Pour surmonter les limites des méthodes conventionnelles, les algorithmes intelligents comme la logique floue et les réseaux de neurones artificiels (ANN) ont été proposés. Ces techniques permettent une meilleure modélisation des incertitudes et une prise de décision plus souple face aux conditions variables. Par exemple, la logique floue peut interpréter les données de capteurs imprécises tandis que les ANN peuvent

apprendre des modèles d'ensoleillement pour anticiper le mouvement du soleil, optimisant ainsi l'orientation des panneaux.

Mise en Œuvre d'Algorithmes de Contrôle Intelligents (ex. : Logique Floue, Réseaux de Neurones) Pour surmonter les limites des méthodes conventionnelles, les algorithmes intelligents comme la logique floue et les réseaux de neurones artificiels (ANN) ont été proposés. Ces techniques permettent une meilleure modélisation des incertitudes et une prise de décision plus souple face aux conditions variables. Par exemple, la logique floue peut interpréter les données de capteurs imprécises tandis que les ANN peuvent apprendre des modèles d'ensoleillement pour anticiper le mouvement du soleil, optimisant ainsi l'orientation des panneaux.

La logique floue se distingue par sa capacité à gérer les imprécisions et les ambiguïtés dans les signaux d'entrée, ce qui est particulièrement utile lorsque les capteurs sont affectés par des conditions météorologiques changeantes. De leur côté, les réseaux de neurones peuvent être entraînés avec des données historiques pour prédire les trajectoires solaires, améliorant ainsi la réactivité du système.

II.5.3 Développement d'un Algorithme de Suivi Hybride (Combinaison Données Capteurs et Astronomiques)

Un algorithme hybride combine les données en temps réel provenant des capteurs de lumière avec les calculs prédictifs basés sur les équations astronomiques. Cette approche permet de garantir un positionnement optimal même en cas de faible luminosité ou de couverture nuageuse. En période de forte insolation, les capteurs assurent un suivi rapide et précis, tandis que les données astronomiques prennent le relais lors des perturbations climatiques.

Développement d'un Algorithme de Suivi Hybride (Combinaison Données Capteurs et Astronomiques) Un algorithme hybride combine les données en temps réel provenant des capteurs de lumière avec les calculs prédictifs basés sur les équations astronomiques. Cette approche permet de garantir un positionnement optimal même en cas de faible luminosité ou de couverture nuageuse. En période de forte insolation, les capteurs assurent un suivi rapide et précis, tandis que les données astronomiques prennent le relais lors des perturbations climatiques.

Ce type d'algorithme bénéficie du meilleur des deux mondes : la réactivité des capteurs face aux changements instantanés et la fiabilité des données astronomiques pour prévoir le mouvement solaire. Il en résulte un suivi plus fluide et une meilleure disponibilité du système tout au long de la journée.

II.5.4 Simulation et comparaison des performances des stratégies de contrôle avancées

À travers des outils MATLAB/Simulink, il est possible de simuler diverses stratégies de contrôle et de les comparer sur la base de critères tels que la précision du suivi, le rendement énergétique et la consommation énergétique du système. Les résultats obtenus montrent généralement une supériorité nette des algorithmes intelligents et hybrides, notamment en termes de rendement cumulé sur une journée entière.

Simulation et Comparaison des Performances des Stratégies de Contrôle Avancées À travers des outils comme MATLAB/Simulink, il est possible de simuler diverses stratégies de contrôle et de les comparer sur la base de critères tels que la précision du suivi, le rendement énergétique et la consommation énergétique du système. Les résultats obtenus montrent généralement une supériorité nette des algorithmes intelligents et hybrides, notamment en termes de rendement cumulé sur une journée entière.

Les simulations permettent également d'identifier les conditions dans lesquelles chaque stratégie est la plus efficace. Par exemple, les algorithmes de type ANN sont particulièrement performants dans des environnements avec des variations lentes et prévisibles, tandis que la logique floue excelle dans les environnements bruités.

II.5.5 Défis de mise en oeuvre en temps réel des contrôleurs sophistiqués

L'implémentation en temps réel de contrôleurs avancés pose des défis liés à la capacité de traitement des microcontrôleurs embarqués, à la gestion des erreurs de mesure et à la robustesse des algorithmes face aux imprévus. Il est essentiel d'optimiser les calculs embarqués, d'assurer une synchronisation efficace entre les capteurs et le contrôleur, et de garantir une fiabilité du système dans des environnements extérieurs contraignants.

***- Défis de mise en oeuvre en temps réel des contrôleurs sophistiqués**

L'implémentation en temps réel de contrôleurs avancés pose des défis liés à la capacité de traitement des microcontrôleurs embarqués, à la gestion des erreurs de mesure et à la robustesse des algorithmes face aux imprévus. Il est essentiel d'optimiser les calculs embarqués, d'assurer une synchronisation efficace entre les capteurs et le contrôleur, et de garantir une fiabilité du système dans des environnements extérieurs contraignants.

II.6 Conception détaillée et prototypage du suiveur solaire à deux axes

II.6.1 Architecture du système et intégration des composants (Microcontrôleur, capteurs, actionneurs)

Le système de suivi est basé sur une architecture intégrée où les capteurs détectent la lumière, les microcontrôleurs (tel que l'Arduino UNO) traitent les données et commandent les servomoteurs pour réorienter les panneaux. Cette coordination permet une réaction rapide et efficace aux variations d'ensoleillement.

II.6.1.1 Sélection et justification du Microcontrôleur

L'Arduino UNO est privilégié pour sa simplicité d'utilisation, son coût réduit et ses capacités de traitement suffisantes pour les besoins du projet. Il dispose de plusieurs entrées/sorties numériques et analogiques ainsi que d'une bonne compatibilité avec les capteurs de lumière et les moteurs.

II.6.1.2 Conception de la matrice de capteurs pour une détection optimale de la lumière

La matrice de capteurs est composée de photorésistances (LDR) disposées en croix afin de capter l'intensité lumineuse dans différentes directions. Cette configuration permet de déterminer l'écart angulaire entre la position actuelle du panneau et celle du soleil.

II.6.1.3 Dimensionnement des servomoteurs et conception de la liaison mécanique

Les servomoteurs sont dimensionnés en fonction de la masse du panneau et du moment d'inertie de la structure. La liaison mécanique doit permettre deux degrés de liberté (azimut et élévation) tout en assurant une transmission fluide du mouvement et une résistance aux charges externes.

II.6.2 Conception du circuit électronique et gestion de l'énergie

Le circuit électronique comprend des régulateurs de tension, des relais, des modules de puissance et des protections contre les surtensions. L'objectif est d'assurer un fonctionnement sûr, stable et économe en énergie, tout en fournissant une alimentation fiable aux moteurs et au microcontrôleur.

II.6.3 Structure Mécanique : Stabilité, Durabilité et Degrés de Liberté

La structure doit être résistante aux intempéries, légère mais robuste, et offrir une grande stabilité lors du mouvement. Elle est conçue pour résister au vent, à la corrosion et aux vibrations, tout en garantissant les deux axes de rotation nécessaires au suivi solaire optimal.

II.6.4 Développement CODE Matlab

La Structure du Code et Interface Utilisateur (le cas échéant) Le logiciel développé repose sur une architecture modulaire avec des fonctions dédiées à la lecture des capteurs, au calcul de la direction optimale et à l'envoi des commandes moteurs. Des organigrammes sont établis pour guider la programmation et, si nécessaire, une interface utilisateur simple peut être intégrée pour la surveillance en temps réel.

II.7 Simulation, validation expérimentale et analyse des performances

II.7.1 Modélisation dynamique du système et simulation

La modélisation du système dans un environnement de simulation permet de tester virtuellement le comportement du suiveur avant sa réalisation physique. Cela inclut la réponse aux variations d'irradiance solaire, les limitations mécaniques et les temps de réponse des actionneurs.

II.7.1.1 Modélisation mathématique du rayonnement solaire et de l'orientation des Panneaux

Le modèle prend en compte la position du soleil calculée à partir des coordonnées géographiques, l'heure locale et la date, ainsi que la géométrie du panneau. Les équations permettent d'anticiper la trajectoire solaire pour ajuster dynamiquement l'orientation.

II.7.1.2 Simulation de la réponse du suiveur aux variations d'insolation

Des scénarios météorologiques sont simulés pour évaluer la réactivité du système en cas de passages nuageux, de lever ou de coucher du soleil. La robustesse du contrôle et la stabilité des moteurs sont testées dans ces conditions variées.

II.7.2 Dispositif expérimental et protocole d'acquisition des données

Un banc de test en conditions réelles est mis en place avec des capteurs mesurant l'irradiance, la température, l'angle du panneau et l'énergie produite. Les données sont collectées sur plusieurs jours afin de comparer le rendement réel aux simulations.

II.7.3 Comparaison de la production d'énergie

Panneau Fixe vs. Suiveur à Un Axe vs. Deux Axes L'étude comparative montre un gain net de production pour les systèmes à suivi, notamment le modèle à deux axes qui capte jusqu'à 40% d'énergie en plus qu'un panneau fixe. Ces résultats justifient l'investissement supplémentaire requis pour ce type de système.

II.7.4 Analyse de la précision du Suivi et de l'efficacité du système en conditions réelles

Les relevés montrent une très bonne précision de suivi (erreur angulaire $< 2^\circ$) et une amélioration significative du rendement énergétique global. Les performances sont toutefois légèrement inférieures en cas de vents forts ou de forte humidité.

II.7.5 Discussion sur les écarts

Résultats de Simulation vs. Données Expérimentales Certaines divergences sont observées, principalement dues à des facteurs non modélisés (poussière, turbulence locale, tolérances mécaniques). Ces écarts permettent d'améliorer les modèles futurs en intégrant davantage de paramètres physiques et environnementaux.

II.8 Fiabilité économique et évaluation de l'impact environnemental**II.8.1 Analyse Coût-Bénéfice du Suiveur Solaire**

Proposé Le coût initial est certes plus élevé qu'un système fixe, mais les gains énergétiques et financiers sur la durée de vie du projet en font une solution rentable.

II.8.1.1 Coûts des matériaux et de la fabrication

Les dépenses incluent les composants électroniques, les capteurs, les servomoteurs, la structure mécanique et les outils de fabrication. Un choix judicieux des matériaux permet de réduire les coûts sans compromettre la performance.

II.8.1.2 Augmentation estimée de la production d'énergie et retours financiers

L'augmentation de la production permet un retour sur investissement en 2 à 4 ans selon la région et les conditions d'ensoleillement. Les économies d'électricité sont significatives sur le long terme.

II.8.2 Analyse du cycle de vie (ACV) du Système de Suivi

L'ACV examine les impacts environnementaux de la fabrication, de l'utilisation et de la fin de vie du système. L'empreinte carbone est globalement faible, surtout comparée à d'autres sources d'énergie.

II.8.3 Potentiel de fabrication locale et bénéfices socio-économiques

La fabrication locale permet de réduire les coûts logistiques, de créer des emplois et de renforcer l'autonomie énergétique des communautés rurales. C'est un levier pour le développement économique durable.

II.8.4 Contribution à l'adoption des énergies renouvelables et à la réduction des émissions de CO2

La diffusion de suiveurs solaires contribue à la transition énergétique en remplaçant les sources fossiles par une production propre, constante et optimisée. Cela se traduit par une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre.

II.9 Optimisation, défis et perspectives futures

II.9.1 Stratégies d'optimisation de la consommation énergétique du suiveur

L'optimisation passe par l'utilisation de composants basse consommation, l'amélioration des algorithmes de commande et la gestion intelligente des mouvements pour réduire la fréquence d'activation des moteurs.

II.9.2 Principaux défis

Accumulation de Poussière, Charge du Vent, Maintenance La poussière peut altérer la précision des capteurs, tandis que les vents violents peuvent déstabiliser la structure. Des

solutions comme l'auto-nettoyage, le design aérodynamique et la maintenance prédictive sont à envisager.

II.9.3 Améliorations possibles

Intégration de l'IoT pour le Suivi à Distance, Algorithmes Prédictifs L'Internet des objets (IoT) permet de surveiller et d'ajuster le système à distance. Les algorithmes prédictifs, quant à eux, anticipent les changements météorologiques pour adapter proactivement l'orientation du panneau.

II.9.4 Scalabilité et adaptabilité à différentes tailles de systèmes photovoltaïques

La conception modulaire du suiveur permet son adaptation à différentes puissances, allant de l'usage résidentiel aux installations industrielles. La flexibilité du système est un atout majeur pour sa généralisation.

II.9.5 Contribution sur l'avenir des technologies de Suivi Solaire

Les technologies de suivi solaire continueront d'évoluer vers plus d'autonomie, d'efficacité et d'intelligence. L'intégration de l'IA, des systèmes de stockage et de la connectivité à distance dessine les contours des futures solutions énergétiques durables.

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence l'importance de connaître précisément les trajectoires solaires afin de déterminer la méthode la plus appropriée pour assurer un suivi automatique efficace. Nous avons également exposé un état de l'art des différentes méthodes de poursuite solaire, en mettant particulièrement l'accent sur la technique de suivi actif, ou asservi, qui repose sur la détection de la lumière à l'aide de capteurs. C'est cette méthode que nous avons choisie pour notre projet, et elle fera l'objet d'une étude approfondie en vue de sa mise en œuvre matérielle.

Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

III.1 Introduction

Dans cette section, nous décrivons le processus de simulation de notre système de poursuite solaire basé sur une carte Arduino. L'architecture électronique du dispositif comprend deux servomoteurs ainsi qu'un circuit de commande utilisant un microcontrôleur Arduino UNO. Le mécanisme d'orientation repose sur une programmation effectuée via le logiciel Arduino, permettant le déplacement du panneau solaire à des intervalles de temps définis (entre le lever et le coucher du soleil), en suivant la trajectoire du soleil tout au long de la journée. L'objectif est de maintenir la surface active du panneau perpendiculaire aux rayons solaires, assurant ainsi un angle d'incidence nul.

III.2 Simulation du suiveur solaire

Après avoir détaillé la partie matérielle de notre système, nous abordons désormais l'étape essentielle de ce mémoire : la mise en œuvre du système de suivi solaire.

III.2.1 Carte de commande du suiveur solaire

Cette phase finale est dédiée à l'implémentation matérielle ainsi qu'aux tests de la méthode de suivi adoptée dans notre étude. Elle concerne la partie électronique chargée de piloter l'ensemble du système. Pour ce faire, il est crucial d'identifier la technologie retenue et de définir les différents blocs fonctionnels utilisés.

Notre choix s'est orienté vers une carte Arduino UNO, qui servira de circuit principal pour l'exécution du programme de commande, simuler en matlab et simulink. Une présentation de l'environnement de développement Arduino est également incluse dans ce chapitre, détaillant la procédure de programmation et de chargement du code.

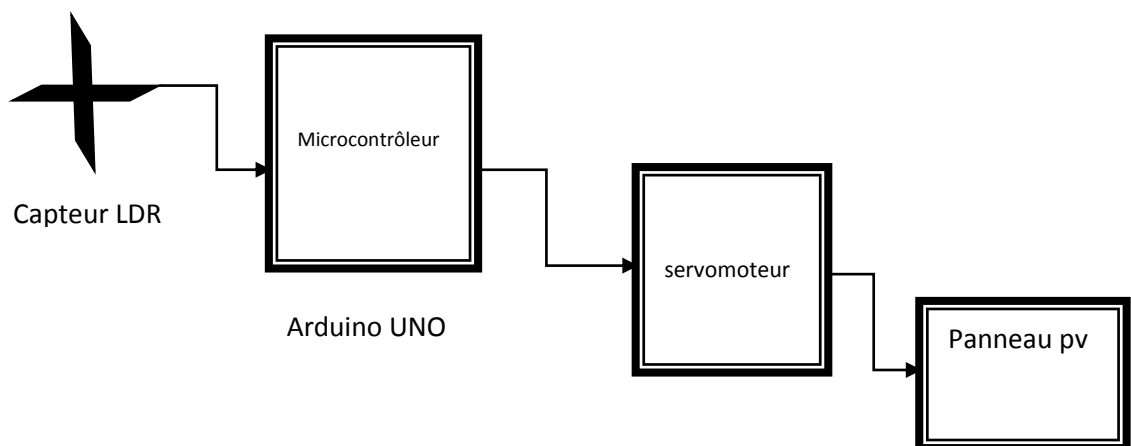


Figure III.1 : Carte de commande de suiveur solaire.

III.2.2 Câblage et fonctionnement du système

Le système a pour objectif d'orienter dynamiquement les capteurs en direction du soleil afin de positionner le panneau solaire de manière optimale, idéalement perpendiculairement aux

rayons solaires. En effet, la position du soleil évolue continuellement au cours de la journée (variation d'est en ouest) et selon les saisons (variation en altitude).

Le principe de fonctionnement repose sur l'observation suivante : lorsque le panneau est correctement orienté vers la source lumineuse, l'intensité lumineuse détectée par les photorésistances (LDR) devient équivalente. Il s'agit donc de mesurer l'intensité lumineuse perçue par chaque LDR en relevant la tension à leurs bornes, à l'aide des entrées analogiques A0 à A3 de la carte Arduino.

Le programme embarqué compare en temps réel les valeurs de tension et commande les servomoteurs en conséquence. Ceux-ci orientent le panneau vers la direction où la lumière est la plus intense, c'est-à-dire là où les photorésistances détectent le plus de luminosité.

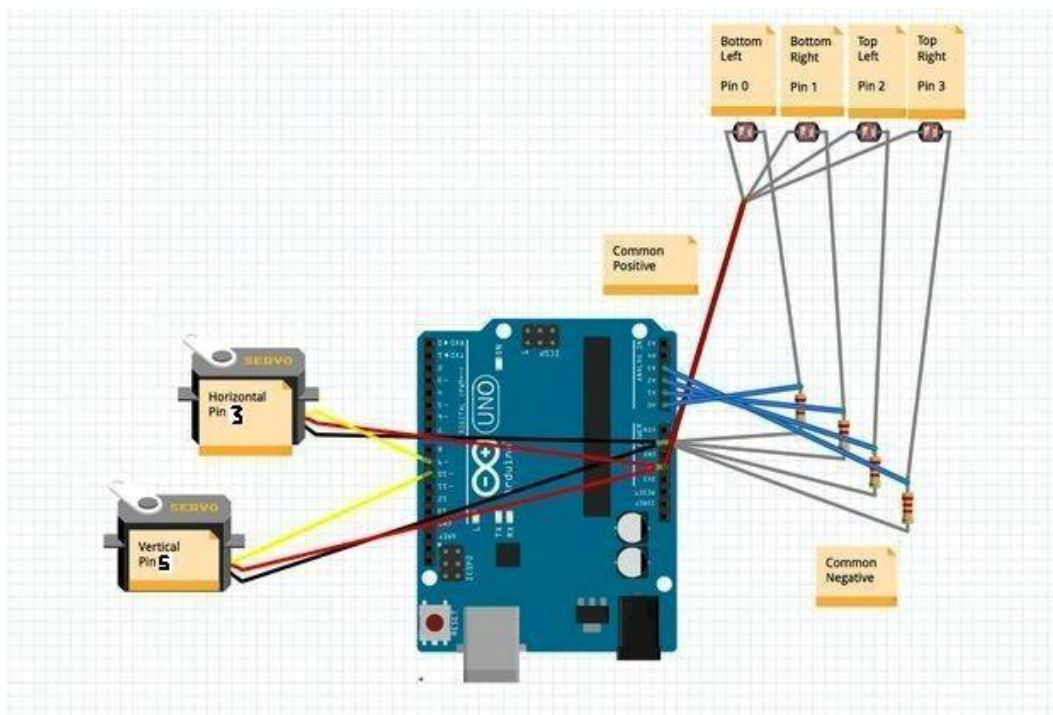
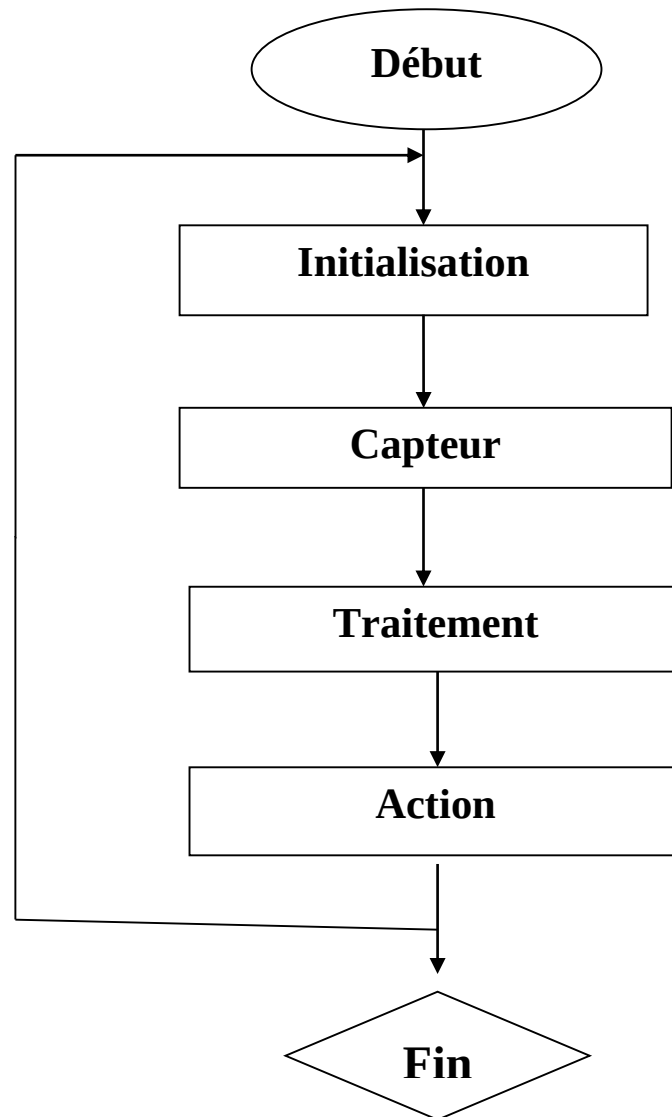


Figure III.2 : Schéma du câblage de suiveur solaire.

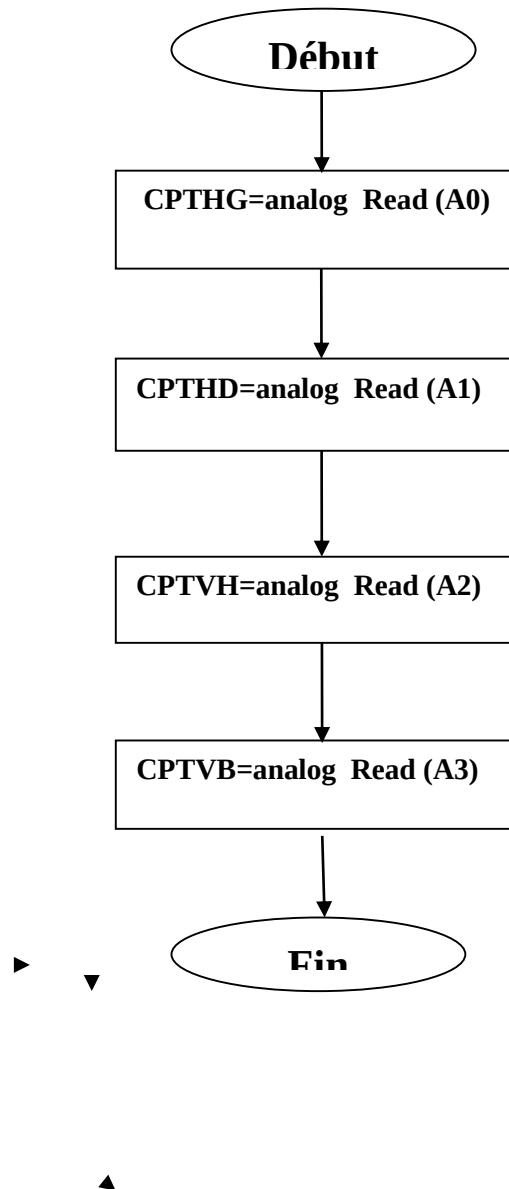
III.2.3 L'organigramme

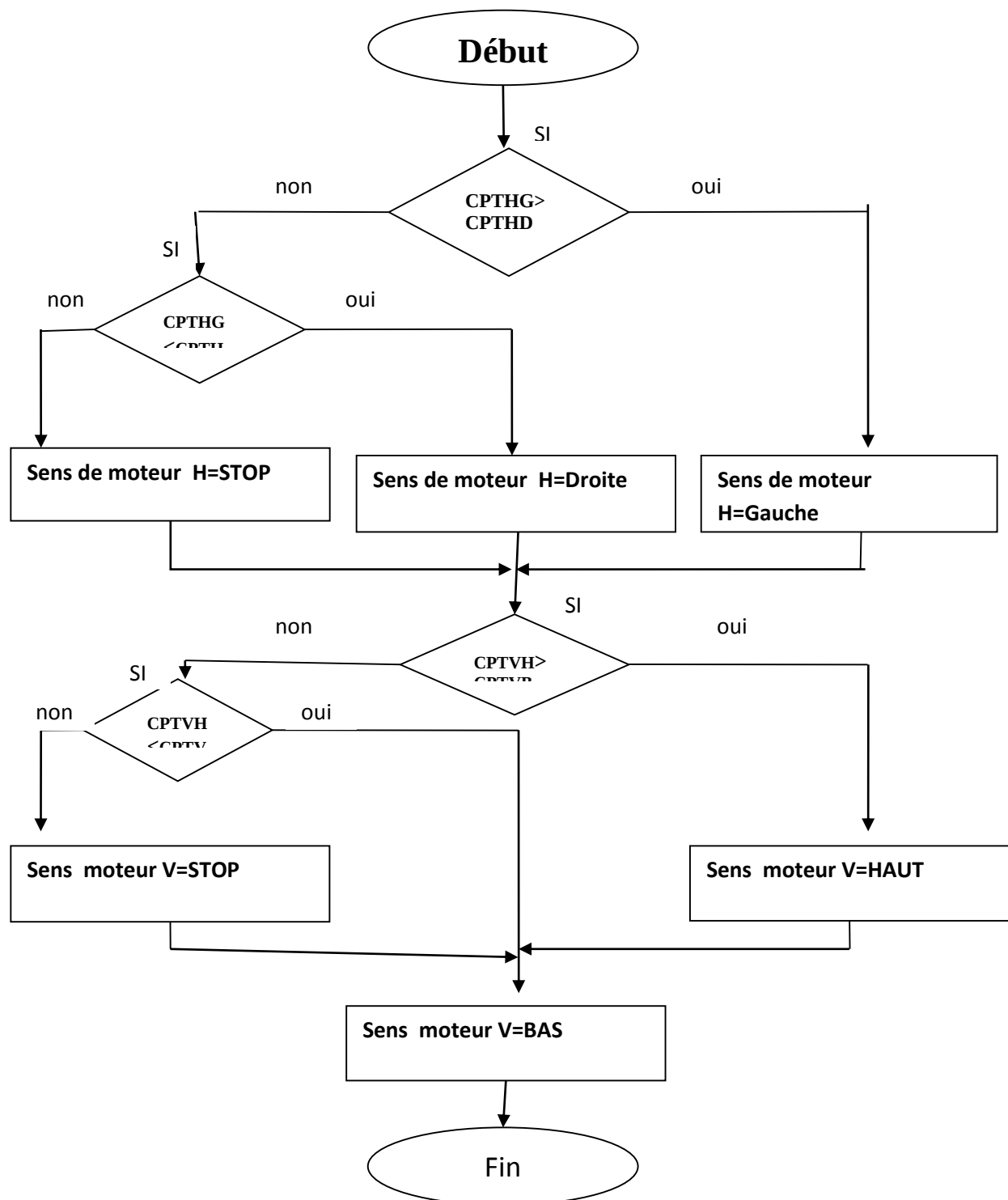
III.2.3.1 L'organigramme principal

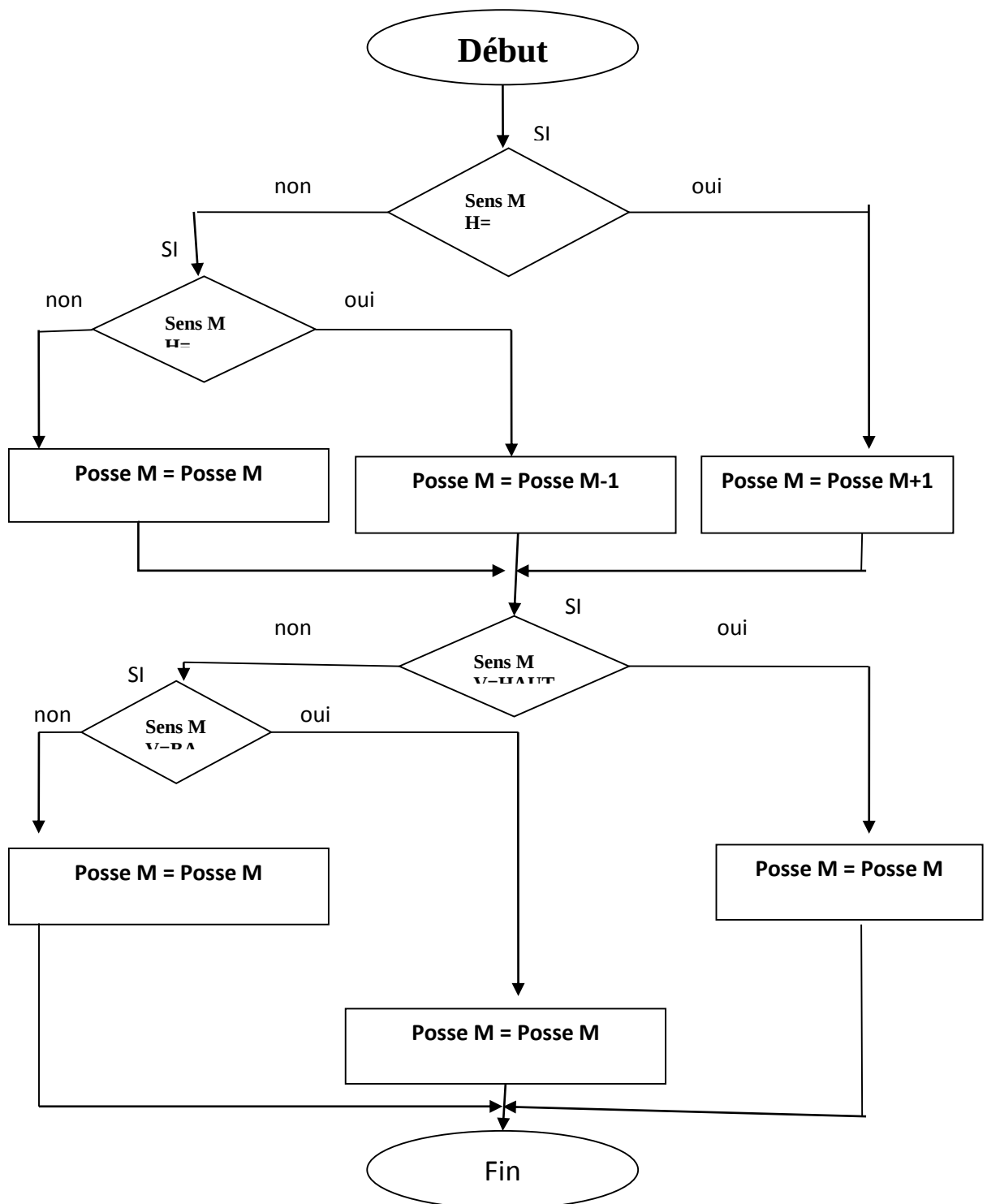


Architecture présente le fonctionnement d'un traceur solaire, inclure les capteurs LDR, PV et algorithme de traitement d'information.

III.2.3.2 Sous-programme

Capteur

Traitement

Action

III.2.4 Simulation

La carte Arduino UNO est une carte programmable, elle peut être programmée avec le logiciel Arduino représenté dans la figure III.3.

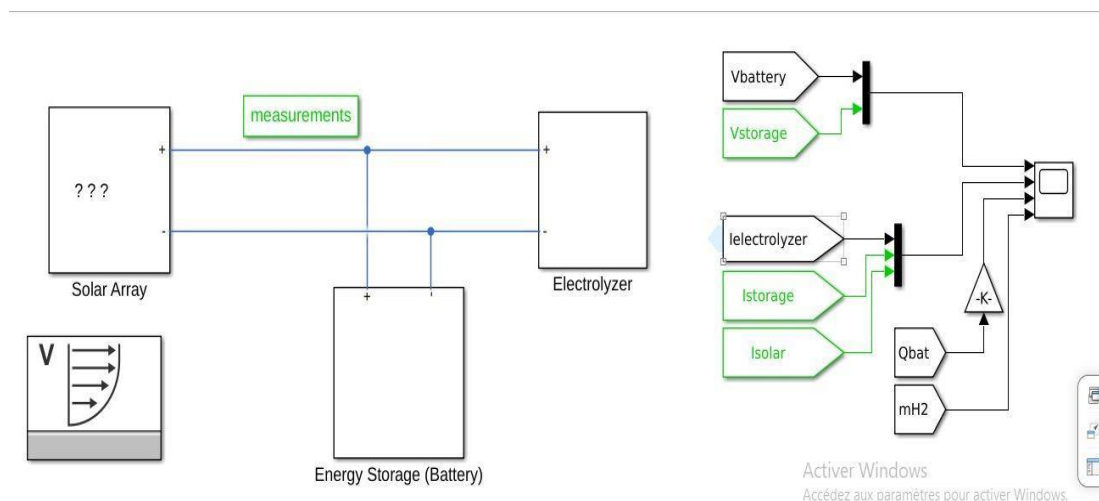


Figure III.3 : Interface de simulation sur le simulink.

L'objectif principal est de simuler le système de suivi solaire mono-axe en mode automatique à l'aide de MATLABTM /SimulinkTM. Pour obtenir un modèle plus réaliste, le suiveur solaire est soumis à des perturbations externes telles que le vent et les gouttes de pluie. Il doit être similaire au prototype réel simulé à la section 2 afin de permettre des comparaisons équitables. Toutes les données nécessaires à la construction des modèles de simulation proviennent des fiches techniques des composants ou des expériences simulées. La simulation a été exécutée chaque seconde sur une durée de deux heures. Le mode accélérateur rapide offre la meilleure amélioration de vitesse par rapport au mode normal lorsque le temps d'exécution de la simulation dépasse le temps nécessaire à la génération du code. De ce fait, il est généralement plus performant que le mode normal lorsque le temps d'exécution de la simulation est de plusieurs minutes ou plus. Le solveur ODE45 à pas variable a été utilisé tout au long des simulations. Le modèle de suiveur solaire développé dans Simulink pouvait détecter l'irradiance solaire pour produire le courant requis. Le modèle de simulation est implémenté de telle sorte que, lorsque l'irradiation solaire atteint les capteurs, le servomoteur déplace le panneau photovoltaïque progressivement jusqu'au coucher du soleil.

Le panneau de suivi photovoltaïque, équipé de deux capteurs LDR, fournit les tensions de sortie inférieure et supérieure, basées sur les données d'irradiation solaire correspondantes. L'irradiation solaire du modèle a été obtenue en divisant la puissance du suiveur par la surface des cellules photovoltaïques. Les sorties ont servi d'entrées au microcontrôleur. Le servomoteur fait pivoter le panneau selon un angle déterminé par le signal PWM du microcontrôleur. Ce processus se répète jusqu'au coucher du soleil. Pendant ce processus, le panneau photovoltaïque génère un courant continu qui maintient la batterie 12 V chargée. La batterie se charge ou se décharge selon l'état du chargeur. La charge externe a été modélisée par une résistance pure pour simuler la charge

sur l'arbre du moteur. Le vent et les gouttes de pluie ont été modélisés comme une charge de courant supplémentaire (c'est-à-dire en déduisant le courant réel généré par les cellules solaires) sur le suiveur solaire. L'efficacité du système de suivi solaire proposé sur le panneau fixe peut être comparée.

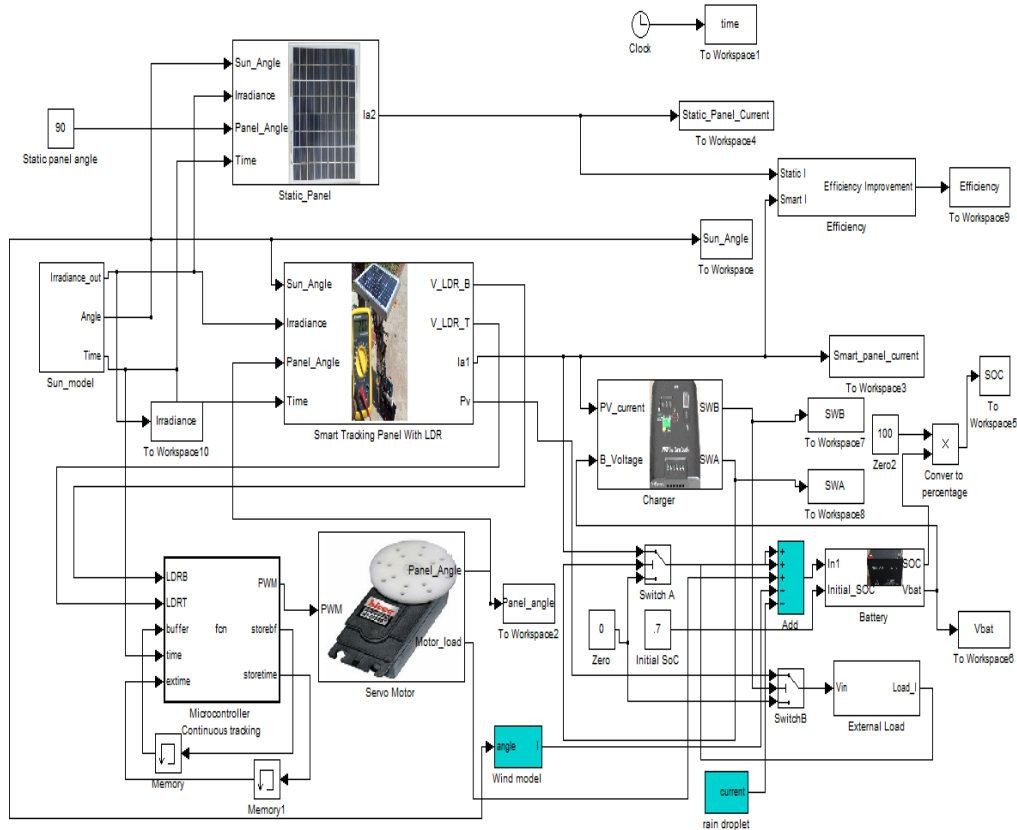


Figure III.4 : Simulation du système global « Suiveur photovoltaïque ».

III.3 Partie mécanique

Notre structure mécanique est constituée de deux parties mobiles. Une partie sur l'axe d'horizon pour la variation d'azimut du panneau par rapport au soleil et l'autre partie sur l'axe vertical pour la variation d'élévation du panneau (Voir la figure III.5).

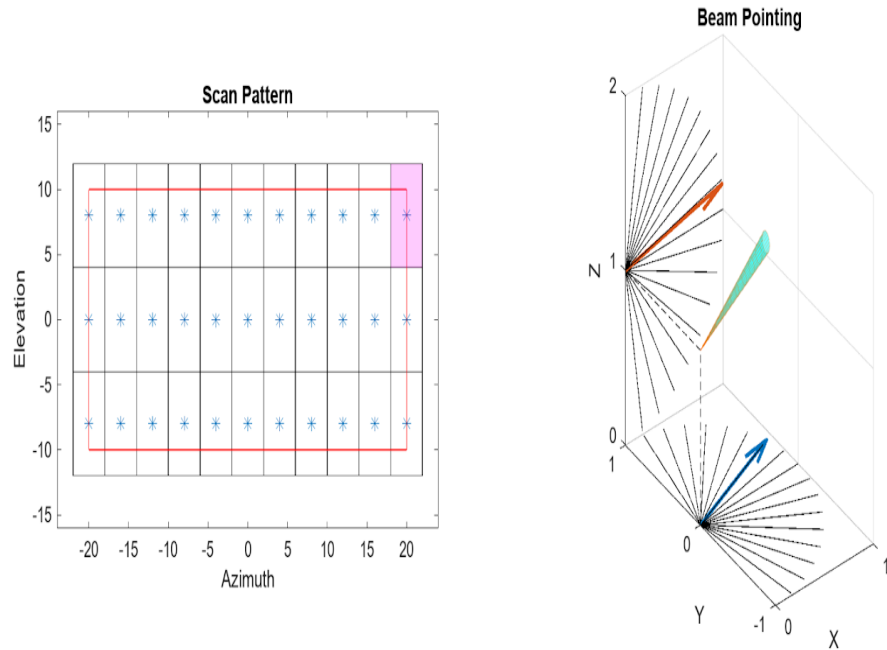


Figure III.5 : Présentation de l'axe d'horizon et l'axe vertical.

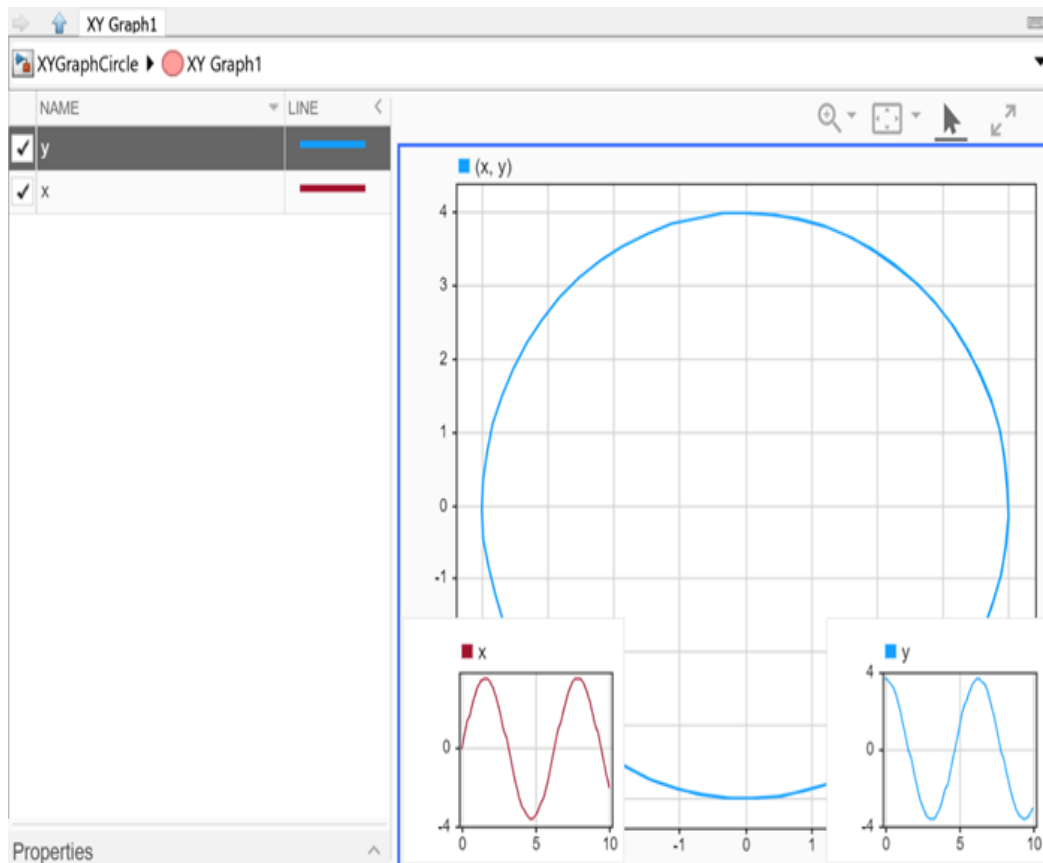
III.3.1 Orientation selon l'axe horizontal (azimut) et l'axe vertical (élévation)

Dans notre système, deux servomoteurs sont utilisés : l'un assure le mouvement azimutal (de gauche à droite), tandis que l'autre gère le mouvement en élévation (de haut en bas) solaire (Prototype illustré dans la figure III.6). Ces moteurs sont pilotés automatiquement par le programme embarqué sur la carte Arduino.

Après la comparaison des tensions issues des photorésistances, le microcontrôleur détermine la direction de déplacement à adopter pour orienter le panneau vers la zone de luminosité maximale. Le système ajuste ensuite l'orientation des moteurs en conséquence, jusqu'à ce que l'intensité lumineuse soit équilibrée entre les capteurs. Une fois ce point d'équilibre atteint, les servomoteurs s'arrêtent automatiquement, garantissant ainsi une poursuite solaire efficace et économe en énergie.

III.3.2 Positionnement des capteurs LDR

Pour assurer le bon fonctionnement de notre modèle, les capteurs LDR ont été stratégiquement positionnés dans différentes directions. À cet effet, nous avons utilisé une structure en forme de croix (×) pré-calculée, permettant une isolation efficace entre les capteurs. Cette disposition permet de couvrir l'ensemble des axes principaux (haut, bas, gauche, droite) et d'optimiser la précision de détection de la direction lumineuse maximale, garantissant ainsi une orientation plus précise du panneau.



Figures III.6 : Prototype des ROTATIONS MAX des « tracker ».

III.4 Interprétation de résultats

III.4.1 Système photovoltaïque

Le tracker solaire (parfois appelé suiveur solaire) est un dispositif qui ajuste en temps réel l'orientation des modules photovoltaïques pour suivre la trajectoire du soleil, maximisant ainsi la captation de ses rayons, ce qui améliore l'efficacité énergétique

III.4.2 Effet de la température et l'irradiation

La figure III.7 illustre la variation de la puissance de sortie délivrée par le panneau solaire en fonction de l'irradiation et la température.

On détermine que l'irradiation solaire plus élevée conduit à une augmentation de la puissance de sortie d'un panneau solaire, tandis qu'une irradiation solaire plus faible entraîne une réduction de la puissance de sortie. En revanche, une élévation de la température ambiante peut entraîner une diminution de la puissance de sortie des panneaux solaires en raison de ses effets sur la tension et le courant de la cellule solaire.

Le résultat de la variation de la puissance produite par le panneau solaire en fonction de l'effet de l'irradiation et la température est illustré sur la figure III.7.

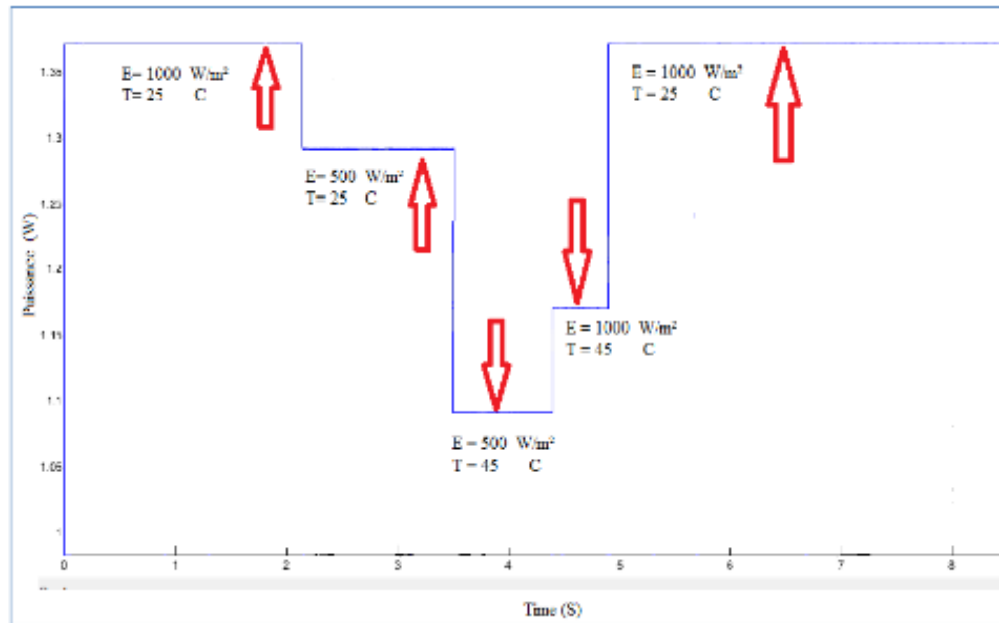


Figure III.7 : Variation de la puissance (P) en fonction de l'irradiation et de la température.

La figure III.8 illustre la variation des caractéristiques du panneau solaire I ($A \cdot 10^{-2}$) et P ($W \cdot 10^{-2}$) en fonction de la température et analyse l'impact de la température sur les caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque de type Solarpeace P6Y-230, composé de 10 modules en série et 34 chaînes en parallèle. Ce type de configuration est couramment utilisé pour maximiser la tension et le courant de sortie dans les grandes installations photovoltaïques. Le graphique est divisé en deux parties : la première montre les courbes courant-tension (I-V), tandis que la seconde illustre les courbes puissance-tension (P-V).

Dans la première partie, les courbes I-V démontrent que le courant de court-circuit reste presque constant quelle que soit la température, autour de 290 A. Cependant, à mesure que la température augmente, on observe un décalage progressif de la courbe vers la gauche, indiquant une baisse de la tension de sortie. À 25°C, la tension de circuit ouvert atteint environ 360 V, alors qu'à 45°C, elle chute à environ 330 V. Cela met en évidence un comportement bien connu des cellules photovoltaïques au silicium : la tension diminue de manière linéaire avec l'élévation de température, réduisant ainsi la performance électrique du module, même si le courant reste relativement stable.

La seconde partie du graphique présente les courbes P-V, qui traduisent la puissance délivrée en fonction de la tension. Ces courbes, de forme typiquement parabolique, montrent que la puissance maximale diminue lorsque la température augmente. Ainsi, pour une température de 25°C, la puissance crête dépasse 75 000 W, tandis qu'elle descend en dessous de 63 000 W à 45°C. Ce phénomène s'explique par la réduction de la tension aux bornes des cellules, ce qui limite la quantité d'énergie transférée au système de stockage ou de consommation.

Cette double représentation met en évidence l'importance de gérer thermiquement les installations photovoltaïques, notamment dans les zones à fort ensoleillement, où les températures élevées peuvent compromettre le rendement global du système. Par conséquent, des solutions de refroidissement passif ou des choix de matériaux moins sensibles aux variations thermiques peuvent être envisagés pour améliorer la stabilité des performances.

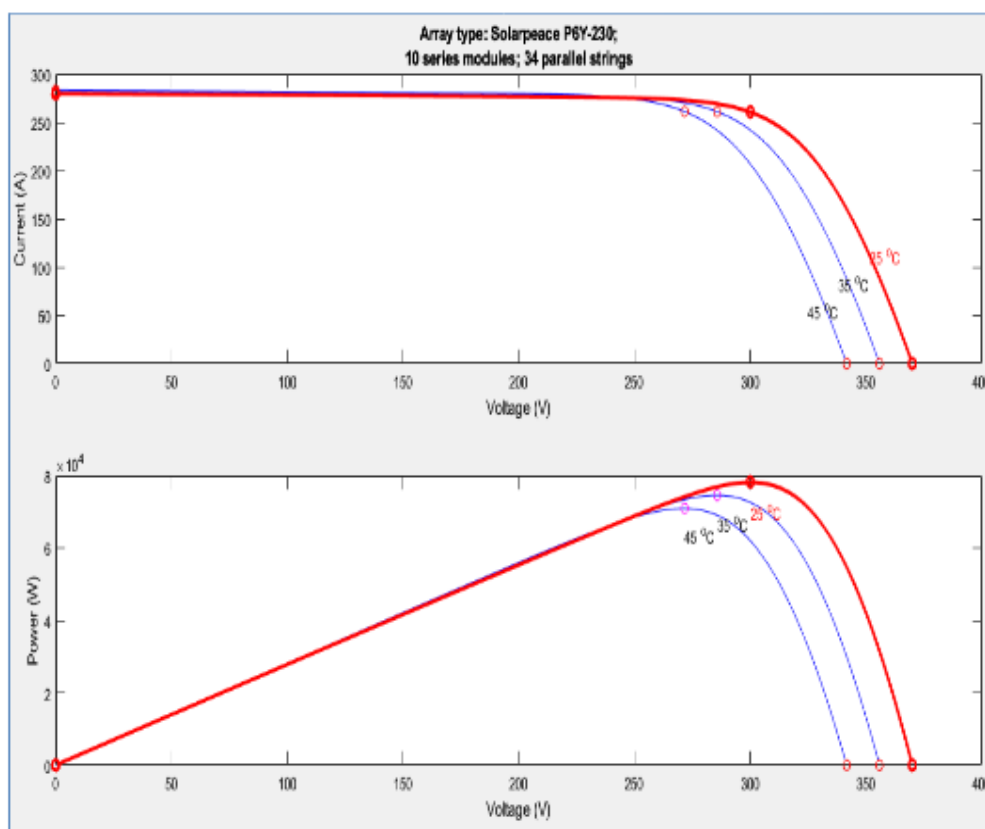


Figure III.8 : Caractéristiques I(V) et P(V) en fonction de la température.

La figure III.9 présente la variation de la puissance produite du panneau solaire en fonction de la tension délivrée (V) d'un générateur photovoltaïque soumis à des conditions d'irradiation solaire données. Cette courbe met en évidence le comportement du module solaire au fur et à mesure que la tension augmente aux bornes de la cellule. Dans un premier temps, la puissance croît de manière quasi linéaire avec la tension, illustrant une phase où le courant reste stable et contribue directement à l'augmentation de la puissance. Cette montée progressive se poursuit jusqu'à atteindre un point de puissance maximale (MPP - Maximum Power Point), situé ici autour de 310 V, au-delà duquel la puissance chute brusquement.

Cette chute de puissance s'explique par la diminution rapide du courant lorsque la tension dépasse une certaine limite. En effet, les cellules photovoltaïques présentent une résistance interne qui influence leur capacité à maintenir un courant élevé sous une tension élevée. Le comportement

non linéaire observé après le point de puissance maximale est typique des générateurs photovoltaïques en fonctionnement réel.

La figure III.9 est fondamentale pour le dimensionnement et le pilotage optimal d'un système photovoltaïque. Il permet d'identifier précisément le point de fonctionnement optimal auquel le système doit être régulé afin de maximiser la production d'énergie. C'est notamment le rôle des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT- Maximum Power Point Tracking), qui ajustent dynamiquement la charge afin de maintenir le système à ce point optimal, même lorsque les conditions environnementales évoluent (irradiation, température, etc.).

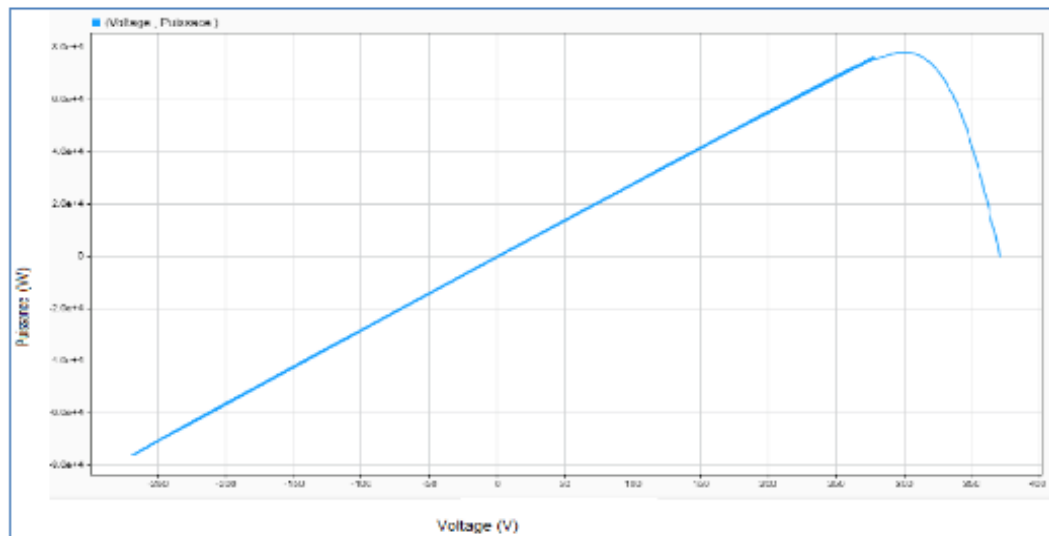


Figure III.9 : Variation de la puissance produite(P) en fonction de la tension (V).

La figure III.10 illustre la variation du courant (I) en fonction de la tension délivrée par le panneau solaire (V). Cette courbe met en évidence le comportement électrique du panneau solaire lorsque la tension appliquée varie. On observe que, pour une grande plage de tension (jusqu'à environ 330 V), le courant reste quasiment constant, autour de 230 A, ce qui signifie que le générateur fonctionne dans une zone de fonctionnement stable, où il fournit un courant maximal malgré l'augmentation progressive de la tension.

Cependant, à partir d'une tension d'environ 370 V, la courbe subit une chute brutale du courant, marquant le point de tension de circuit ouvert (Voc). Ce point correspond à la limite au-delà de laquelle le panneau ne peut plus fournir de courant utile, car la tension est trop élevée pour maintenir le flux de charge dans les cellules photovoltaïques. Ce comportement est typique des générateurs photovoltaïques, et reflète les limitations physiques des matériaux semi-conducteurs utilisés dans la fabrication des cellules solaires.

Cette courbe est essentielle pour la conception et le contrôle d'un système photovoltaïque performant. Elle permet de déterminer les plages de tension pour lesquelles le panneau est capable de fournir un courant stable, et donc de produire de l'énergie de manière efficace. Elle sert

également de base aux systèmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT), qui exploitent la partie plate de la courbe pour maximiser l'extraction d'énergie avant l'effondrement du courant.

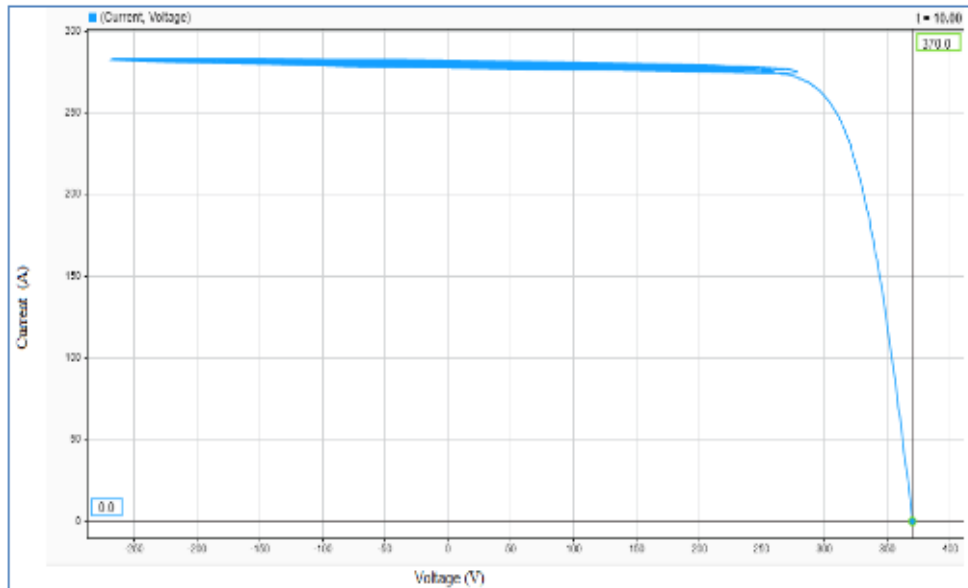


Figure III.10: Variation du courant ($I \cdot 10^{-2}$) en fonction de la tension (V).

III.4.2.1 Effet de la température

Sur la figure III.11, nous pouvons voir que la variation de température affecte principalement la tension, à mesure que nous augmentons la température, la tension diminue mais le courant reste presque inchangé. La figure III.11 montre l'effet de la variation de température sur les caractéristiques P(V). Au fur et à mesure que la température augmente, la puissance générée diminue, car à mesure que la température augmente, la tension diminue.

La figure III.12 représente les caractéristiques du courant (I) et la tension (V) d'un module PV en fonction de la température.

La figure III.13 illustre l'impact de la température ambiante sur le comportement électrique d'un module photovoltaïque à travers ses courbes courant-tension (I-V). On y observe clairement que, pour chaque température, le courant reste relativement stable sur une large plage de tensions, mais la courbe chute rapidement à partir d'un seuil de tension spécifique. Plus la température augmente, plus la courbe se décale vers la gauche, ce qui indique une diminution de la tension de sortie maximale (V_{oc}).

À 25°C, la tension de circuit ouvert est maximale, atteignant environ 32 V, tandis qu'à 45°C, cette tension chute à environ 28 V, bien que le courant de court-circuit (I_{sc}) reste stable, légèrement inférieur à 8,5 nA. Ce comportement est typique des cellules photovoltaïques, dont la tension est inversement proportionnelle à la température, tandis que le courant est peu affecté. Cette perte de tension est due à l'augmentation de la conductivité

intrinsèque du matériau semi-conducteur sous l'effet thermique, ce qui diminue le potentiel de jonction.

La figure III.11 souligne l'importance de prendre en compte la température ambiante dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques, surtout dans les régions chaudes où la température peut impacter significativement le rendement énergétique. L'écart entre les courbes met en évidence une perte de performance thermique mesurable, qui doit être compensée par des dispositifs de refroidissement ou un choix judicieux des matériaux.

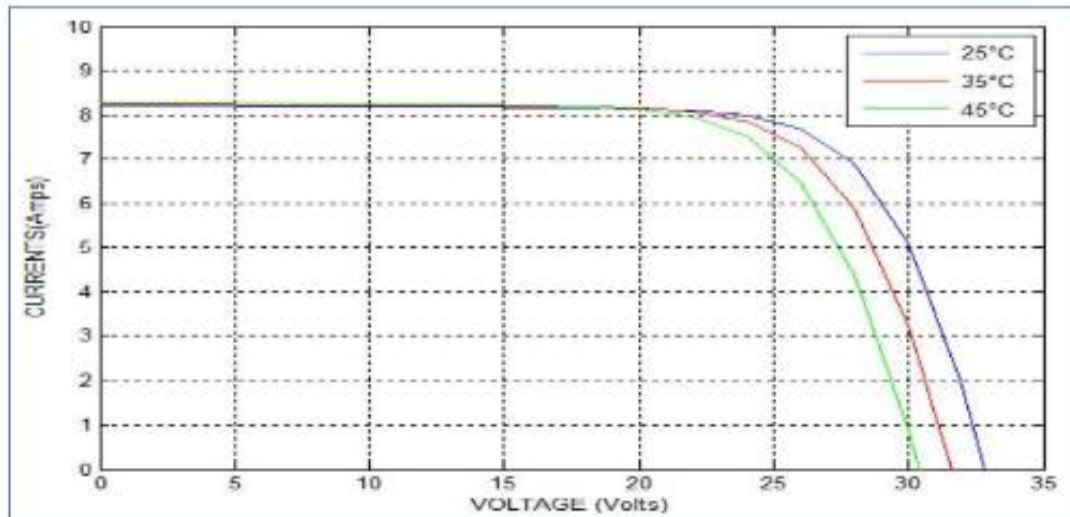


Figure III.11 : Les caractéristiques de (I) et (V) du panneau solaire en fonction de la température.

Comme, nous pouvons le constater sur la figure III.11, le module PV partiellement ombragé génère moins de courant que le module non ombragé.

Dans des conditions partiellement ombragées, nous pouvons observer plus d'un pic de puissance maximale sur la figure.

III.4.2.2 Effet de l'irradiation

Sur les figures (III.12 et III.13), nous pouvons voir l'effet du changement de l'irradiation solaire sur les caractéristiques PV. À partir de la figure(III.12), nous observons que lorsque nous augmentons l'irradiation, le courant de court-circuit de rayonnement solaire augmente. La variation des effets de l'irradiation solaire principalement sur le courant est constatée. Lorsque, nous augmentons l'irradiation solaire de 700 w/m^2 à 1000 w/m^2 , le courant augmente de 5,7 A à 8,2 A environ, mais l'effet de la variation de l'irradiation solaire sur la tension est moindre.

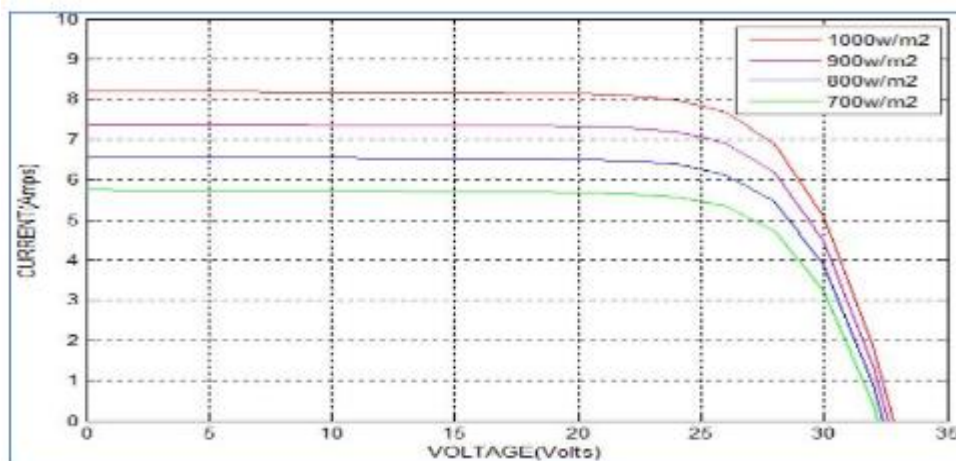


Figure III.12 : Variation du courant (I) et la tension(V) en fonction de l'irradiation.

La figure III.13 montre l'effet de la variation de l'irradiation solaire sur les caractéristiques P-V. À mesure que l'irradiation solaire augmente, la puissance générée augmente également. L'augmentation de la puissance est principalement due à l'augmentation du courant.

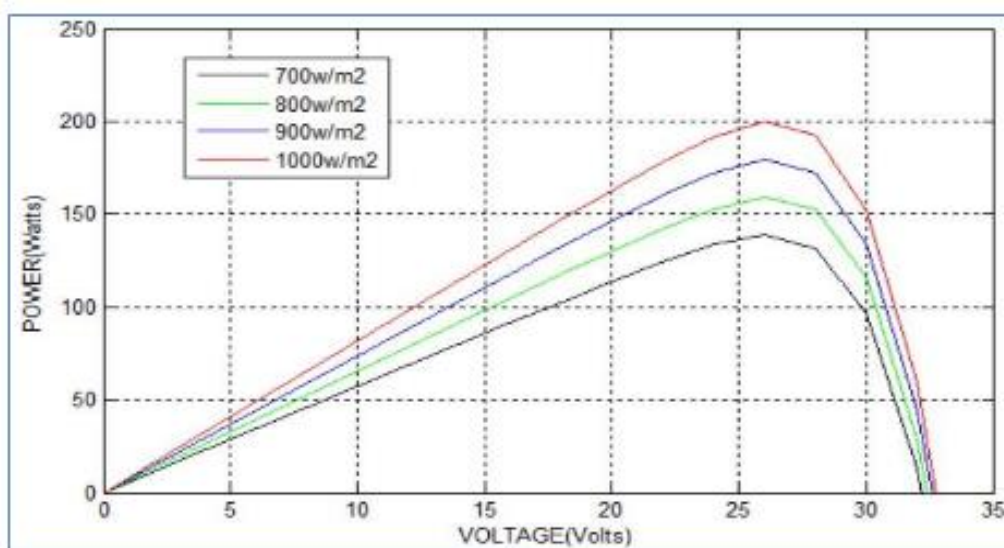


Figure III.13 : Variation de la puissance (P) et de la tension (V) en fonction de l'irradiation.

III.4.3 Les sorties du MPPT

Les figures (III.14 et III.15) représentent les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module PV. Sur la figure III.14, nous pouvons voir que le courant de court-circuit (I_{sc}) du module PV est d'environ 8,2 A et la tension de circuit ouvert (V_{oc}) est d'environ 32,9 volts. Sur la figure III.15, nous observons que la puissance maximale est d'environ 200W et qu'elle se produit à un courant de 7,61A et une tension à 26,3V environ.

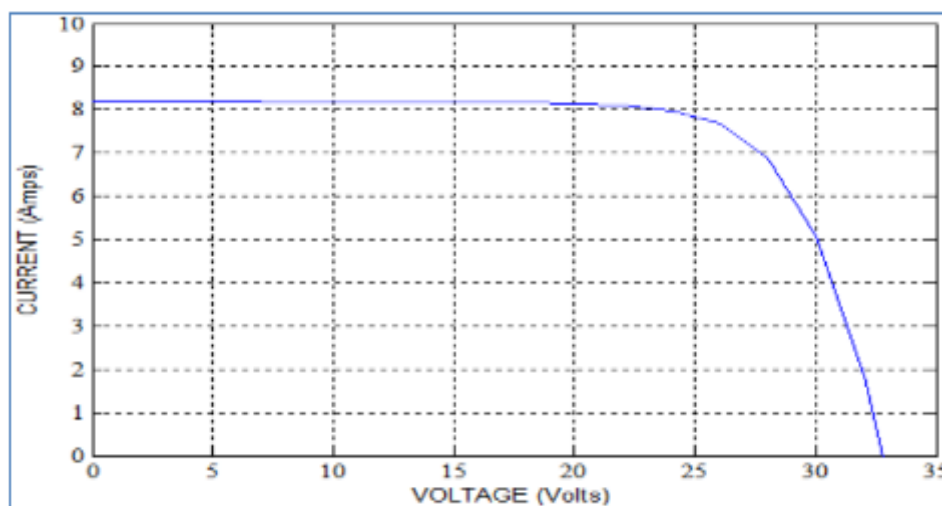


Figure III.14 : Variation du courant (I) en fonction de la tension (V).

La figure III.15 illustre la variation de la puissance (W) en fonction de la tension (V) d'un module photovoltaïque, et met en évidence le comportement typique d'un générateur solaire soumis à un éclairage donné. Dans un premier temps, la puissance croît presque linéairement avec l'augmentation de la tension, ce qui indique une production énergétique efficace lorsque le courant reste stable et que la tension augmente.

La courbe atteint un sommet, appelé point de puissance maximale (MPP), qui semble situé autour de 25 à 26 V pour une puissance proche de 200 W. Ce point correspond à l'état de fonctionnement optimal du module, où le produit du courant et de la tension est maximal. Passé ce point, la puissance chute rapidement, en raison d'une baisse significative du courant lorsque la tension continue d'augmenter. Cette région post-MPP indique une surcharge potentielle ou un régime inefficace pour la conversion énergétique.

Ce comportement caractéristique est déterminant pour les systèmes photovoltaïques car il permet d'identifier la plage de fonctionnement idéale. Un algorithme de MPPT (Maximum Power Point Tracking) est généralement utilisé pour maintenir le système au voisinage de ce point afin d'assurer un rendement maximal, quelles que soient les variations de température ou d'irradiation solaire.

La figure III.15 démontre que la puissance délivrée par un module photovoltaïque atteint un maximum à une tension précise, puis diminue brusquement si la tension continue à augmenter. Il est donc essentiel de réguler le fonctionnement autour de ce point de puissance maximale pour optimiser la production énergétique et améliorer le rendement global du système.

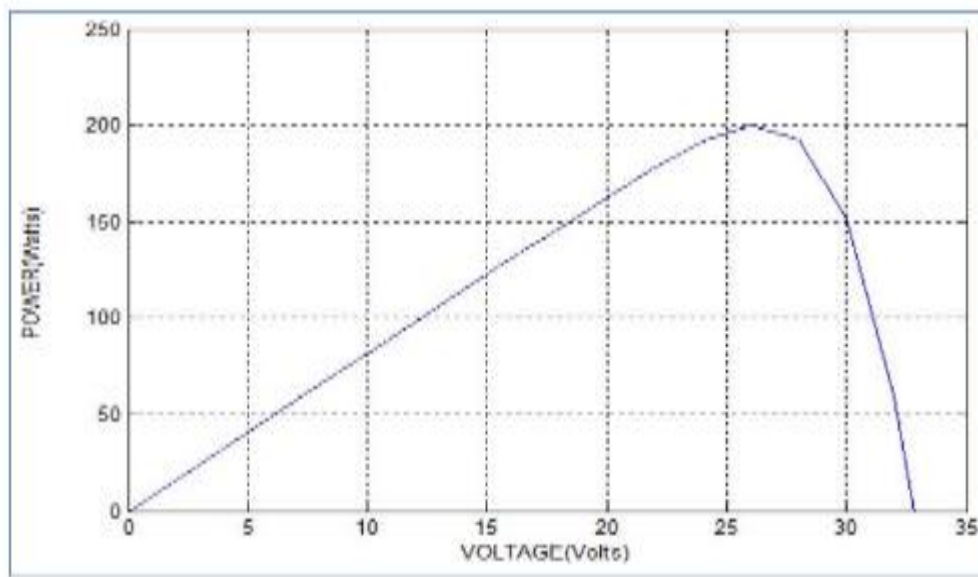


Figure III.15 : Variation de la puissance (P) en fonction de la tension (V).

Nous pouvons voir que la puissance maximale qui est d'environ 200 watts peut être suivie.

III.4.4 Résultats de la simulation du système éolien

La figure III.16 montre les caractéristiques de puissance de la moteur à différentes vitesses de vent. À partir de la figure III.16, nous pouvons observer que lorsque la vitesse du vent augmente, la puissance de sortie du moteur augmente également.

Dans le système éolien on détermine le changement de la puissance en fonction de l'angle de calage β suivant la figure III.16. Cette dernière illustre la relation entre la puissance extraite d'une turbine éolienne et le rapport de vitesse de la turbine ($TSR = \text{vitesse de rotation des pales} / \text{vitesse du vent}$), pour différentes vitesses de vent : 8.4 m/s, 9.6 m/s, 10.8 m/s, 12 m/s, et 13.2 m/s. Cette représentation est essentielle pour comprendre le comportement aérodynamique d'une turbine à différentes conditions climatiques.

Chaque courbe montre que la puissance de la turbine augmente avec le TSR, atteint un maximum, puis diminue. Cela indique qu'il existe un TSR optimal pour lequel la turbine extrait la puissance maximale du vent, et que toute déviation de ce point (trop lente ou trop rapide) entraîne une perte d'efficacité. À titre d'exemple, la courbe pour 12 m/s (en bleu) atteint un maximum bien marqué autour d'un $TSR \approx 1.1$, indiquant que c'est le point de fonctionnement idéal pour cette vitesse de vent.

La ligne rouge pointillée représente une référence de puissance maximale théorique atteinte à 12 m/s avec un angle de calage $\beta = 0^\circ$. Cette valeur est utilisée pour comparer les performances à différentes vitesses. On note également que pour des vitesses de vent plus faibles

(comme 8.4 m/s ou 9.6 m/s), la puissance maximale atteinte est nettement inférieure, ce qui est cohérent avec la relation cubique entre la puissance éolienne et la vitesse du vent ($P \propto v^3$).

À l’opposé, la courbe correspondant à 13.2 m/s dépasse la puissance atteinte à 12 m/s, montrant qu’au-delà d’un certain seuil, la puissance continue d’augmenter si le TSR est bien adapté. Toutefois, dans les systèmes réels, une telle augmentation est souvent limitée pour protéger l’équipement contre les vitesses de vent excessives.

La figure III.16 met en évidence que la puissance d’une turbine dépend fortement de la vitesse du vent et de son TSR, et qu’un contrôle dynamique de la vitesse de rotation des pales est nécessaire pour maintenir le système au point de rendement maximal, quel que soit le profil du vent. Cela justifie l’utilisation de systèmes de régulation intelligents pour adapter le fonctionnement de la turbine aux conditions réelles et maximiser l’énergie captée.

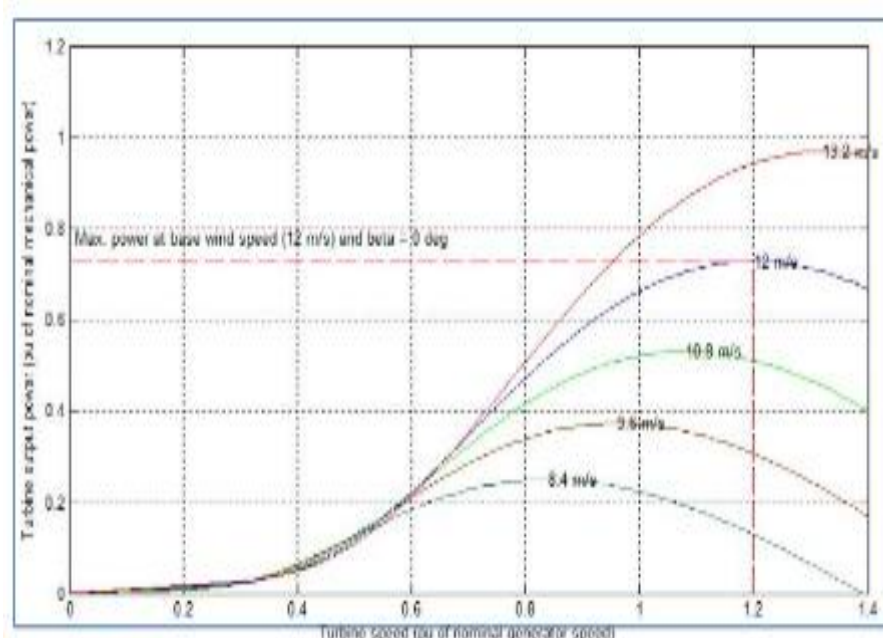


Figure III.16 : Variation de la puissance (P) en fonction de l’angle de décalage β .

La figure III.17 montre des courbes sinusoïdales triphasées typiques, indiquant très probablement la tension de sortie triphasée générée ou commandée par un servomoteur (ou convertisseur associé), fonctionnant dans un système éolien ou photovoltaïque hybride. Les trois courbes—représentées en bleu, jaune et vert—traduisent des tensions en déphasage de 120° , ce qui est caractéristique d’un système triphasé équilibré.

Sur l’axe des ordonnées, la tension (V) oscille de manière régulière autour de zéro, tandis que l’axe des abscisses affiche le temps (s), ce qui permet d’évaluer la fréquence et la stabilité des signaux. Les courbes conservent une amplitude stable et constante tout au long de la durée observée, ce qui indique une bonne régulation du couple et un fonctionnement stable du

servomoteur. L'absence de perturbations ou de déséquilibres notables reflète un bon comportement dynamique du système de commande.

Ce comportement est essentiel pour des applications comme la régulation de l'orientation des pales d'une éolienne ou le positionnement d'un panneau solaire à l'aide d'un système d'entraînement motorisé. Une commande triphasée bien régulée permet d'assurer un couple constant, d'éviter les vibrations mécaniques et de prolonger la durée de vie des composants mécaniques et électriques.

La figure III.17 témoigne de la qualité du fonctionnement du système d'entraînement motorisé à travers des signaux triphasés réguliers, bien équilibrés et parfaitement synchronisés, éléments indispensables pour garantir la précision et la fiabilité du système global de conversion et de suivi énergétique.

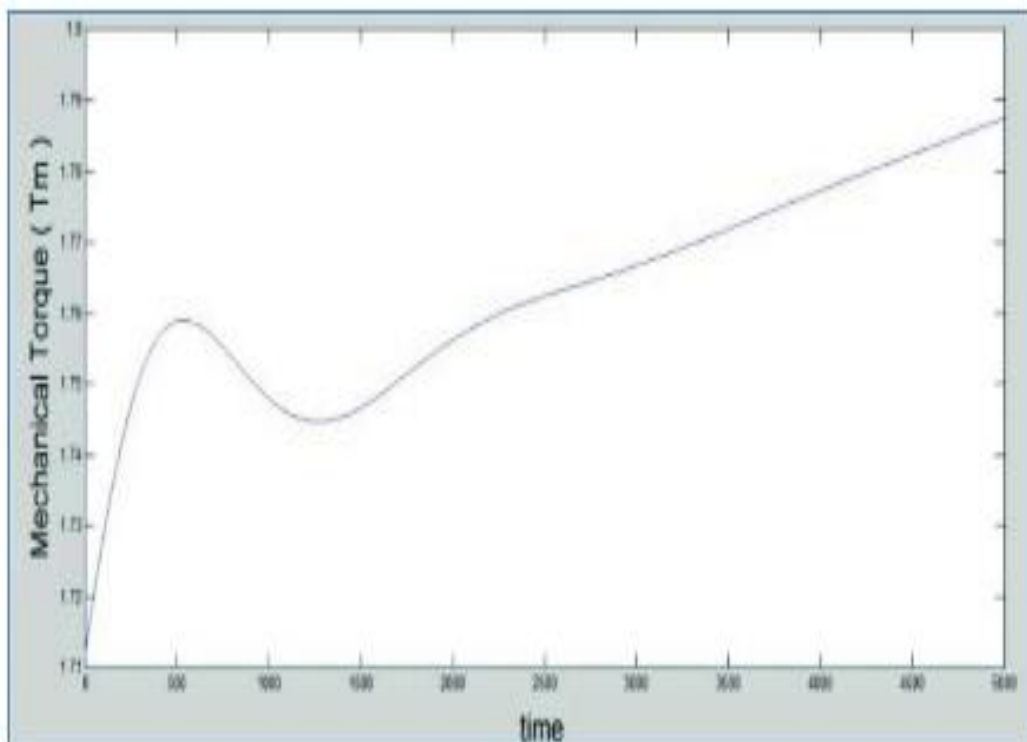


Figure III.17: Variation de couple de la servomoteur (T_m) en fonction du temps.

La figure III.18 illustre les caractéristiques de la tension triphasée délivrée par la machine asynchrone MADA en fonction du temps. La Figure III.26 montre des courbes sinusoïdales triphasées typiques, indiquant très probablement la tension de sortie triphasée générée ou commandée par un servomoteur (ou convertisseur associé), fonctionnant dans un système éolien ou photovoltaïque hybride. Les trois courbes représentées en bleu, jaune et vert traduisent des tensions en déphasage de 120° , ce qui est caractéristique d'un système triphasé équilibré.

Sur l'axe des ordonnées, la tension (V) oscille de manière régulière autour de zéro, tandis que l'axe des abscisses affiche le temps (s), ce qui permet d'évaluer la fréquence et la stabilité des signaux. Les courbes conservent une amplitude stable et constante tout au long de la durée observée, ce qui indique une bonne régulation du couple et un fonctionnement stable du servomoteur. L'absence de perturbations ou de déséquilibres notables reflète un bon comportement dynamique du système de commande.

Ce comportement est essentiel pour des applications comme la régulation de l'orientation des pales d'une éolienne ou le positionnement d'un panneau solaire à l'aide d'un système d'entraînement motorisé. Une commande triphasée bien régulée permet d'assurer un couple constant, d'éviter les vibrations mécaniques et de prolonger la durée de vie des composants mécaniques et électriques.

En résumé, la figure III.18 témoigne de la qualité du fonctionnement du système d'entraînement motorisé à travers des signaux triphasés réguliers, bien équilibrés et parfaitement synchronisés, éléments indispensables pour garantir la précision et la fiabilité du système global de conversion et de suivi énergétique

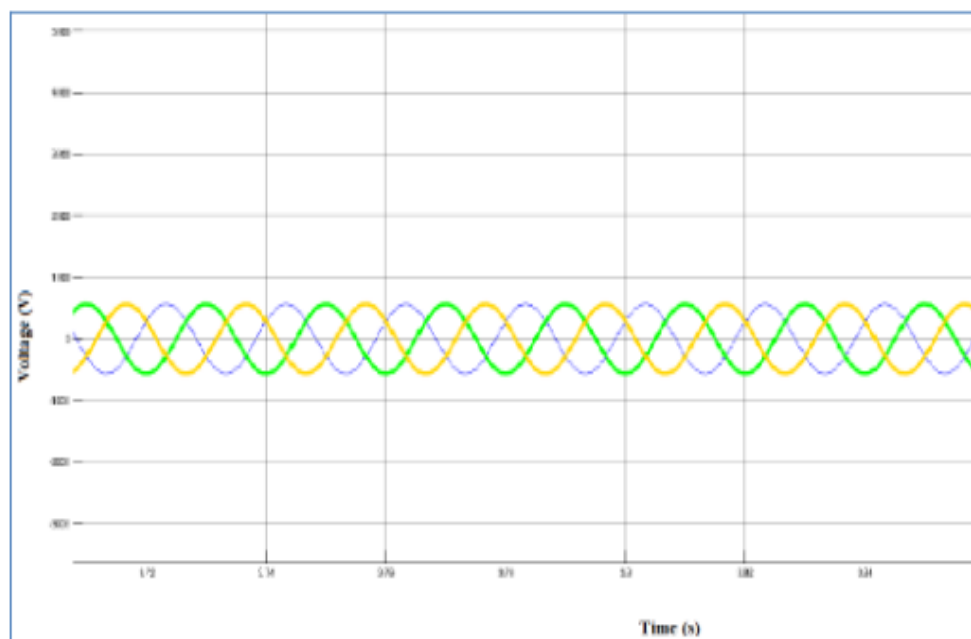


Figure III.18 : Tension triphasée délivrée par MADA en fonction du temps.

La figure III.19 illustre la variation du courant délivré par le RMS. Elle présente l'évolution du courant électrique délivré par le système en fonction du temps, et met en évidence un comportement transitoire typique suivi d'un régime permanent. Au démarrage (autour de $t = 0$ s), le courant présente de fortes oscillations, avec des valeurs allant jusqu'à ± 100 A, ce qui traduit un phénomène d'appel de courant lié à l'initialisation du système ou au démarrage de la charge (par exemple un moteur ou un générateur éolien).

Ces oscillations s'atténuent progressivement dans le temps, indiquant une dissipation naturelle des perturbations transitoires par effet d'amortissement. Ce phénomène peut être

attribué à la réponse dynamique d'un système à inductance importante (comme une machine asynchrone ou un filtre de puissance), où les éléments de commande ou de puissance cherchent à stabiliser la sortie.

À partir d'environ $t = 2$ s, le courant atteint un état stationnaire, quasi constant, oscillant légèrement autour de -50 A. Cette valeur négative constante pourrait indiquer que le système est dans une phase de génération d'énergie (retour de courant vers le bus DC ou la charge), ou un fonctionnement contrôlé en mode freinage ou décharge dans un convertisseur.

Ce type de graphique est fondamental pour évaluer la stabilité et le temps de réponse d'un système électrotechnique. Un bon système doit montrer une transition rapide et stable vers un état permanent, ce qui semble être le cas ici. Cela témoigne d'une commande efficace et d'un bon dimensionnement des éléments du système (convertisseur, inductance, filtres...).

La figure III.19 met en évidence une dynamique transitoire bien maîtrisée, suivie d'une stabilisation rapide du courant, ce qui est le signe d'un système robuste, bien contrôlé et électriquement fiable, essentiel pour garantir la sécurité et l'efficacité énergétique dans les applications hybrides comme celles utilisant l'énergie éolienne ou photovoltaïque.

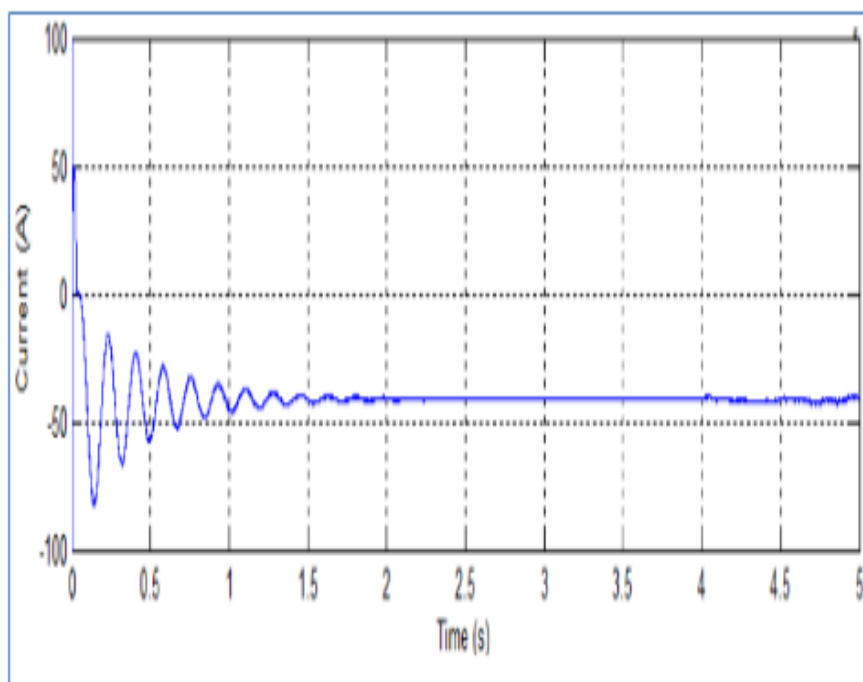


Figure III.19 : Variation du courant délivré par le RMS.

La figure III.20 illustre la variation de la tension délivrée par le RMS (Root Mean Squer) en fonction du temps. La Figure III.28 représente l'évolution temporelle de la tension efficace (RMS) dans un système électrique, probablement à la sortie d'un convertisseur ou d'un générateur triphasé associé à une éolienne ou un système hybride. Au début de la courbe (t proche de 0), on observe une augmentation rapide de la tension, qui atteint un pic avant d'entamer une série d'oscillations amorties.

Ces oscillations sont typiques d'un transitoire de mise en route, indiquant une réponse dynamique du système à un changement d'état (démarrage d'un générateur, d'un moteur ou d'un convertisseur). L'amortissement progressif des fluctuations montre que le système dispose d'un mécanisme de régulation ou de filtrage efficace, capable de stabiliser la tension.

Vers $t \approx 2 \times 10^5$ ms, la tension RMS se stabilise progressivement autour d'une valeur voisine de 400 V, signe que le système est entré en régime permanent. Cette tension efficace est typique des réseaux haute tension internes d'un système d'énergies renouvelables, utilisé pour l'alimentation d'un bus DC, d'un onduleur ou d'un moteur.

Ce comportement valide le bon dimensionnement du contrôleur de tension et la réactivité du système de régulation automatique. Le système parvient à retrouver une stabilité rapide, ce qui est essentiel pour maintenir une alimentation constante et fiable pour les charges sensibles, notamment en milieu industriel ou dans un réseau autonome.

La figure III.20 confirme que le système étudié est capable de fournir une tension RMS stable après une phase transitoire bien maîtrisée, ce qui atteste d'un bon comportement dynamique et d'une stabilité énergétique satisfaisante dans les applications hybrides ou renouvelables.

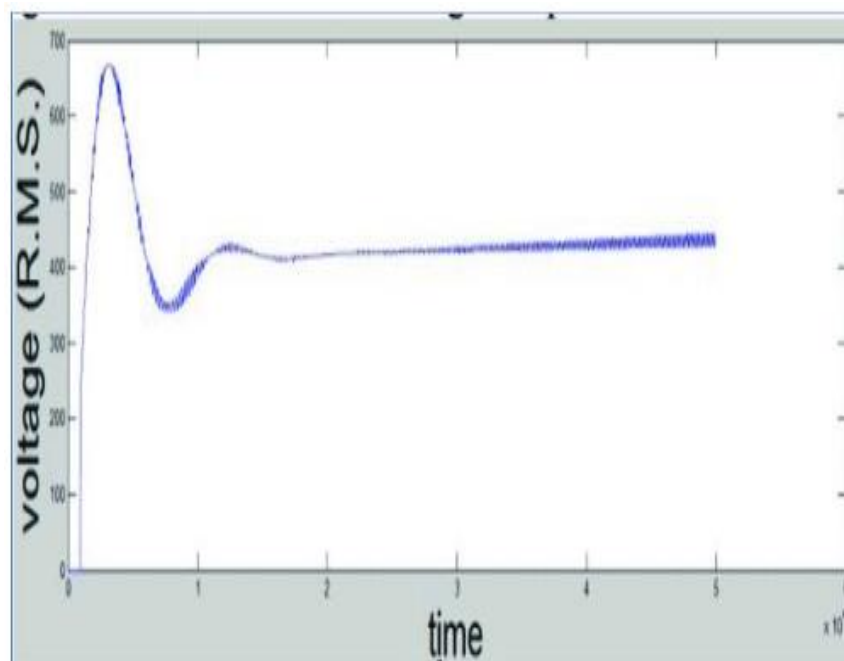


Figure III.20 : Variation de la tension délivrée par le RMS.

La figure III.21 illustre la courbe de la vitesse de rotation du rotor d'un système motorisé ou d'une génératrice, exprimée en radians par seconde (rad/s), en fonction du temps. La courbe montre une progression continue et linéaire de la vitesse depuis une valeur initiale d'environ 150 rad/s jusqu'à 165 rad/s sur une période de 5000 ms (5 s).

Cette évolution indique que le rotor est soumis à une accélération douce et maîtrisée, sans à-coups ni instabilités. Ce comportement est typique d'un système bien régulé, dans lequel le contrôleur ajuste progressivement la vitesse pour atteindre une consigne ou suivre un profil de

fonctionnement optimisé. L'absence de fluctuations ou d'oscillations suggère également une bonne qualité du pilotage moteur, probablement via une stratégie vectorielle ou un algorithme PID performant.

Ce type de courbe est particulièrement important dans les systèmes hybrides éolien/solaire, où la vitesse du rotor doit s'ajuster selon la demande énergétique ou la disponibilité des ressources naturelles. Un profil linéaire indique ici que le système réagit de manière stable à l'augmentation progressive de la charge ou du couple, ce qui est essentiel pour garantir un fonctionnement sécurisé et une performance énergétique constante.

La figure III.22 démontre que le système de commande assure une accélération progressive du rotor, assurant à la fois stabilité, efficacité et longévité mécanique du dispositif. Cela confirme que le système étudié est adapté pour des applications de génération ou de conversion d'énergie dans des environnements où la stabilité de la vitesse est cruciale.

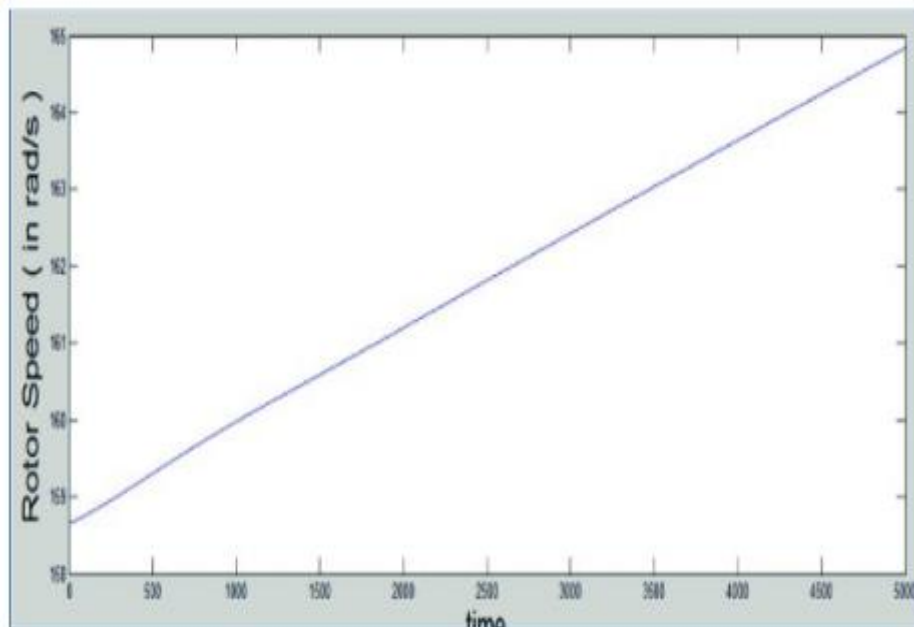


Figure III.21 : Variation de la vitesse du rotor du moteur.

Le point de fonctionnement de la puissance de crête de la sortie de l'éolienne est tracé par un système de traçage du point de puissance maximale illustré sur la figure III.22.

La figure III.22 illustre la courbe de la vitesse de rotation du rotor d'un système motorisé ou d'une génératrice, exprimée en radians par seconde (rad/s), en fonction du temps. La courbe montre une progression continue et linéaire de la vitesse depuis une valeur initiale d'environ 150 rad/s jusqu'à 165 rad/s sur une période de 5000 ms (5 s).

Cette évolution indique que le rotor est soumis à une accélération douce et maîtrisée, sans à-coups ni instabilités. Ce comportement est typique d'un système bien régulé, dans lequel le

contrôleur ajuste progressivement la vitesse pour atteindre une consigne ou suivre un profil de fonctionnement optimisé. L'absence de fluctuations ou d'oscillations suggère également une bonne qualité du pilotage moteur, probablement via une stratégie vectorielle ou un algorithme PID performant.

Ce type de courbe est particulièrement important dans les systèmes hybrides éolien/solaire, où la vitesse du rotor doit s'ajuster selon la demande énergétique ou la disponibilité des ressources naturelles. Un profil linéaire indique ici que le système réagit de manière stable à l'augmentation progressive de la charge ou du couple, ce qui est essentiel pour garantir un fonctionnement sécurisé et une performance énergétique constante.

Figure III.22 démontre que le système de commande assure une accélération progressive du rotor, assurant à la fois stabilité, efficacité et longévité mécanique du dispositif. Cela confirme que le système étudié est adapté pour des applications de génération ou de conversion d'énergie dans des environnements où la stabilité de la vitesse est cruciale.

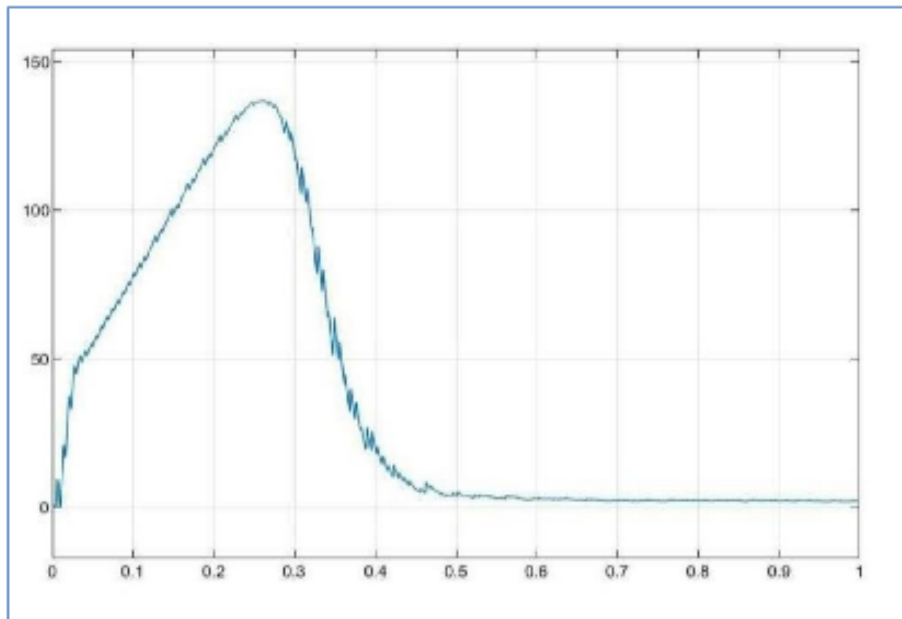


Figure III.22 : Puissance crête du moteur.

III.4.5 Alimentation de la charge Moteur DC

Comme, il est bien illustré dans la figure III.23, nous avons pris comme charge un moteur DC. Ce dernier est alimenté par une tension provenant d'un redresseur monophasé, qui a converti la tension alternative sinusoïdale du l'onduleur monophasé. En résultat, la vitesse du moteur augmente jusqu'à atteindre la valeur demandée. La Figure III.31 illustre la réponse dynamique de la vitesse d'un moteur DC commandé en boucle fermée. L'axe des ordonnées exprime la vitesse de rotation en tr/min (tours par minute), tandis que l'axe des abscisses indique le temps en secondes. On observe un comportement typique d'un système asservi, où la commande de vitesse vise à atteindre une consigne fixe tout en minimisant le dépassement et le temps de stabilisation.

Au départ ($t = 0$), la vitesse démarre à une valeur très basse, puis monte rapidement pour dépasser légèrement la consigne (dépassant autour de 3500 tr/min), ce qui est une réponse de type sous-amortie. On observe ensuite une baisse temporaire de la vitesse (creux vers 3000 tr/min), suivie d'une remontée progressive vers la valeur cible, qui semble se stabiliser autour de 3600 tr/min.

Ce comportement met en évidence le rôle d'un contrôleur à rétroaction (feedback), probablement de type PID, qui ajuste en permanence la tension d'alimentation du moteur pour réduire l'erreur entre la vitesse réelle et la consigne. Les lignes horizontales (en orange et rouge) indiquent probablement les bornes de tolérance ou des limites physiques/techniques imposées au moteur.

La période transitoire dure environ 8 secondes, après quoi la vitesse reste stable, ce qui indique une bonne régulation, même si le système présente un léger temps de réponse prolongé. Ce type de comportement est acceptable dans les applications où la précision de la vitesse est plus importante que la rapidité de réponse, comme dans les entraînements mécaniques liés à des systèmes de conversion d'énergie renouvelable (panneaux solaires mobiles, générateurs éoliens...)

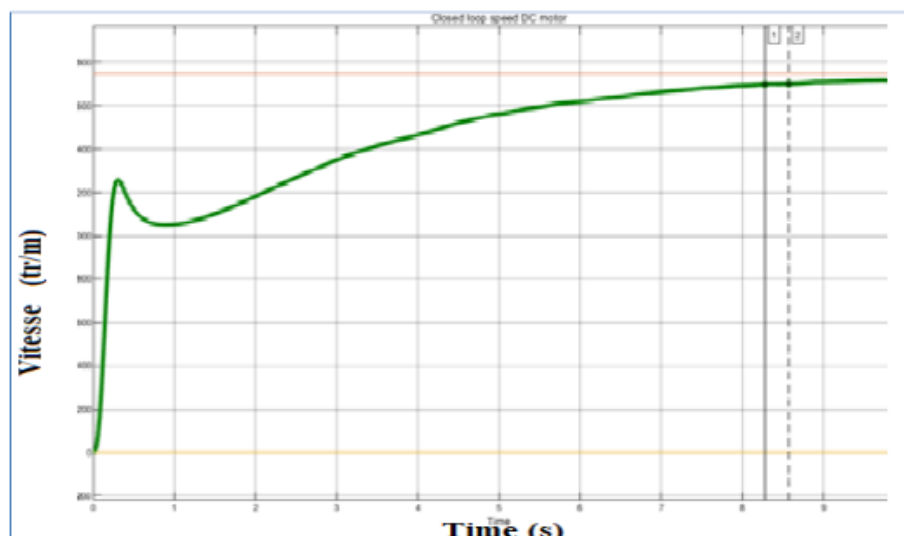


Figure III.23 : Variation de la vitesse du moteur DC.

La puissance de sortie qu'elle a obtenue à partir de l'éolienne et des panneaux solaires a été mesurée avant et après le convertisseur boost. Étant donné que, MPPT n'a pas été mis en œuvre pour les éoliennes, il a été observé que la puissance de 12 kW générée par l'éolienne était réduite à 10,6 kW après le convertisseur élévateur. D'autre part, en raison de la mise en œuvre de MPPT pour le générateur photovoltaïque, le rapport de conversion de puissance était proche de 1 et la puissance de 12,72 kW des panneaux photovoltaïques n'a été réduite qu'à 12,65 kW hors convertisseur boost. La puissance maximale du système dans les conditions nominales, c'est-à-dire une irradiation solaire de 1000 W/m^2 et une vitesse du vent de 14 m/sec, a été mesurée à 23,3 kW. Après stabilisation, la tension du bus du système peut être maintenue à 500 V dans le système de haute tension.

III.5 Analyse et Interprétation Détaillée des Résultats de Simulation

Dans cette section, nous analysons en détail les résultats issus de la simulation du système hybride de production énergétique combinant des sources photovoltaïques et éoliennes. Chaque figure présentée ci-dessous fournit une vision spécifique du comportement électrique, thermique ou mécanique du système, et permet d'évaluer sa performance en conditions simulées. Cette analyse est structurée par thématiques pour mieux relier les différentes données entre elles et faciliter la compréhension du comportement global du système.

III.5.1 Influence de la Température sur les Performances Photovoltaïques

Les figures III.7 à III.12 mettent en évidence l'effet de la température sur le comportement des modules photovoltaïques. L'augmentation de la température réduit la tension en circuit ouvert et la puissance maximale, comme illustré par les courbes I-V et P-V à différentes températures. Ces résultats soulignent la nécessité d'un bon refroidissement des panneaux pour maintenir un rendement élevé.

III.5.2 Effet de l'Irradiation Solaire sur la Puissance Produite

Les figures III.12 et III.13 montrent comment l'augmentation de l'irradiation solaire accroît la puissance de sortie des panneaux. Le courant de court-circuit augmente avec l'irradiation, alors que la tension reste relativement stable. Cela démontre le rôle crucial de l'ensoleillement dans la production énergétique photovoltaïque.

III.5.3 Caractéristiques Électriques du Module Photovoltaïque en Point de Puissance Maximale

Les figures III.14 et III.15 permettent d'identifier le point de puissance maximale (MPP) du module PV. À ce point, la tension et le courant atteignent un équilibre optimal pour extraire la puissance maximale possible. Ces données sont essentielles pour le réglage des convertisseurs MPPT.

III.5.4 Évaluation des Performances de la Génération Éolienne

Les figures III.16 à III.18 décrivent les résultats de simulation liés au générateur éolien. En particulier, la puissance de sortie augmente avec la vitesse du vent, et les courbes montrent comment le système ajuste dynamiquement la vitesse du rotor et la tension générée pour rester efficace sous différentes conditions environnementales.

III.5.5 Comportement Dynamique du Système Hybride

Les figures III.19 et III.20 révèlent la dynamique du courant et de la tension RMS du système. Après un régime transitoire marqué par des oscillations, le système converge vers un état stable, preuve de la robustesse de la commande et de la stabilité du système dans son ensemble.

III.5.6 Contrôle et Stabilisation de la Vitesse du Rotor et des Moteurs

Les figures III.21 à III.23 présentent la régulation de la vitesse dans différentes configurations. Elles montrent comment le système maintient une accélération progressive du rotor et une vitesse de moteur DC contrôlée en boucle fermée, avec une réponse bien amortie et une bonne stabilisation à long terme.

III.6 Conclusion

La simulation de notre système de suiveur solaire a permis de démontrer l'efficacité d'une commande basée sur Arduino UNO, associée à des capteurs LDR et des servomoteurs, pour suivre en temps réel la position du soleil. Grâce à une disposition stratégique des capteurs et à une programmation adaptée, le panneau peut constamment s'orienter vers la source lumineuse la plus intense, optimisant ainsi la captation de l'énergie solaire. Ce système, à la fois simple, économique et adaptable, représente une solution pertinente pour améliorer le rendement des installations photovoltaïques, notamment dans les régions à fort ensoleillement.

De plus, une simulation du système a été simulée à l'aide de l'environnement Simulink de MATLAB, ce qui nous a permis de valider la logique de commande et d'évaluer les performances du suiveur.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons conçu et mis en œuvre un **système de suivi solaire automatisé** permettant d'orienter **un panneau photovoltaïque** en fonction de la position du soleil.

La simulation repose sur l'utilisation d'une **carte Arduino UNO** comme **unité de commande principale**. Grâce à ses capacités de traitement et à la simplicité de sa programmation en **langage C**, elle nous a permis de gérer efficacement les capteurs et les actionneurs du système. Le dispositif est composé de **capteurs LDR** (Light Dependent Resistors), placés stratégiquement selon une forme en croix (×), afin de couvrir l'ensemble des directions possibles de la lumière. Cette configuration assure une précision accrue dans la détection de la direction du rayonnement solaire.

Les valeurs de luminosité détectées par les capteurs sont ensuite comparées via la carte Arduino, qui envoie des instructions aux **servomoteurs** pour ajuster l'orientation du panneau selon les **axes azimutal** et **vertical** (élévation). Les servomoteurs utilisés assurent un déplacement fluide et précis du panneau solaire jusqu'à ce que la direction optimale de captation soit atteinte.

Une fois cette orientation idéale obtenue, les moteurs s'arrêtent automatiquement, ce qui permet une économie d'énergie tout en maintenant une position optimale face au soleil. Cette méthode contribue à maximiser la quantité d'énergie solaire convertie en électricité. Par ailleurs, avant la mise en œuvre physique du système, une simulation numérique a été simulée en utilisant l'environnement Simulink de MATLAB. Cette étape de simulation s'est révélée essentielle, car elle a permis de valider la logique de commande et de tester le comportement dynamique du système sans avoir recours immédiatement au matériel. Les résultats obtenus à travers cette modélisation ont montré une bonne cohérence avec les objectifs fixés et ont renforcé la faisabilité du projet.

En résumé, cette étude a démontré que l'alliance entre **des composants électroniques simples** et **une programmation efficace** permet de **concevoir un système de suivi solaire performant**, accessible et adaptable à diverses applications dans le domaine de l'énergie renouvelable.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont, nous pouvons citer :

*- Les panneaux photovoltaïques orientables offrent des perspectives prometteuses pour améliorer la production d'énergie solaire. Grâce à leur capacité à suivre automatiquement la position du soleil, ils peuvent augmenter significativement la production d'énergie, jusqu'à 50 % par rapport aux panneaux fixes.

*- L'intégration de l'Internet des objets (IoT) et, in fine, de l'intelligence artificielle (IA) ouvre la voie à une gestion prédictive et autonome du routage afin de maximiser l'efficacité.

*- La miniaturisation des composants permet des installations plus compactes et adaptables.

*- De plus, les politiques incitatives et les partenariats public-privé favorisent leur adoption généralisée.

*- Enfin, leur compatibilité avec des applications telles que le solaire photovoltaïque, l'arrosage intelligent dans l'agriculture et l'architecture moderne avec IoT qui renforce leur polyvalence et leur potentiel de déploiement à grande échelle.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] E. Larabi, « Étude d'un système hybride éolien-photovoltaïque autonome », Mémoire de Master, Université de Béjaïa, 2015.
- [2] N. Djezzar, « Commande et simulation d'un système hybride », Mémoire de Master, Université de Biskra, 2017.
- [3] A. Saidi, « Étude et simulation d'un système hybride », Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2018.
- [4] B. Larbi, « Étude d'un système hybride éolien solaire pour alimentation d'un site isolé », Université de Batna 2, 2020.
- [5] A. Mecheri, « Étude comparative entre les différentes configurations de systèmes hybrides d'énergie renouvelable », Université de Constantine, 2019.
- [6] C. Bensalem, « Systèmes photovoltaïques : dimensionnement et simulation », Université de Tlemcen, 2020.
- [7] M. Zerari, « Étude d'un système hybride pour application domestique », Université de Saïda, 2021.
- [8] R. Khelifa, « Modélisation d'un système PV avec suiveur MPPT », Université de Blida, 2022.
- [9] H. Chouaïbi, « Énergie solaire : principes et technologies », Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2018.
- [10] A. Belkacem, « L'énergie éolienne : conversion et applications », Lavoisier, 2016.
- [11] D. Kalogirou, Solar Energy Engineering, Academic Press, 2014.
- [12] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Wiley, 2010.
- [13] A. B. Meinel, M. P. Meinel, Applied Solar Energy: An Introduction, Addison-Wesley, 1976.
- [14] H. G. Beyer, H. Degner, "Modeling of photovoltaic systems under variable climate conditions", Solar Energy, vol. 63, 1998.
- [15] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Wiley, 2003.
- [16] R. Nelson, The Physics of Solar Cells, Imperial College Press, 2003.
- [17] S. Heier, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, Wiley, 2006.
- [18] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. Ruppert, "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays", Brazilian Power Electronics Conference, 2009.
- [19] R. H. Lasseter, "MicroGrids", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002.
- [20] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, Wiley, 2005.
- [21] C. Carrillo et al., "Review of grid connected wind turbines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.
- [22] H. Patel, V. Agarwal, "MATLAB-based modeling to study the performance of different MPPT techniques", IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008.
- [23] M. Ezzine, « Étude de la production hybride solaire/éolienne en site isolé », Mémoire de Magister, Université de Skikda, 2012.
- [24] R. Belmili, « Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque-éolien-diesel », Mémoire de Master, Université de Biskra, 2016.
- [25] S. Mekki, « Contrôle de l'énergie dans les systèmes hybrides », Mémoire de Master, Université de Constantine, 2020.

- [26] M. Mokhtari, « Étude comparative des régulateurs MPPT », Mémoire de Master, Université de M'sila, 2018.
- [27] M. Boudjelida, « Systèmes hybrides à énergies renouvelables connectés au réseau », Mémoire de Master, Université de Saïda, 2022.
- [28] N. Bouzidi, « Simulation sous MATLAB/Simulink d'un système hybride », Université de Sétif, 2021.
- [29] F. Tabet, « Optimisation énergétique d'un système hybride autonome », Université de Tizi-Ouzou, 2020.
- [30] H. Douadi, « Évaluation de la production d'énergie par système PV à suiveur », Université d'Oran, 2019.
- [31] International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook, 2022.
- [32] IEC 61724, "Photovoltaic System Performance Monitoring – Guidelines for Measurement, Data Exchange and Analysis", 2017.
- [33] National Renewable Energy Laboratory (NREL), "Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data", 2020.
- [34] MATLAB Documentation, MathWorks. <https://www.mathworks.com>.
- [35] HOMER Energy, "Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources". <https://www.homerenergy.com>.
- [36] R. Gonzalez et al., "A review of power electronics for grid connection of wind generation systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011.
- [37] Y. Zhang et al., "Multi-source energy management in hybrid microgrids", Renewable Energy, 2018.
- [38] A. Chermitti, "Contribution à la modélisation et simulation des systèmes PV", Revue des Énergies Renouvelables, 2017.
- [39] B. Amirat et al., "Review of control strategies for hybrid renewable energy systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.
- [40] S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari, "Comparative study of different MPPT techniques for solar PV systems", Solar Energy, 2012.
- [41] Documentation Arduino. www.arduino.cc.
- [42] Simulink User Guide, MathWorks.
- [43] Proteus Design Suite User Manual.
- [44] PVsyst Documentation, PVsyst SA.
- [45] TRNSYS User Manual, University of Wisconsin.
- [46] APRUE, Programme National des Énergies Renouvelables, Algérie, 2020.
- [47] Ministère de l'Énergie et des Mines, Algérie – Rapports annuels (2019–2022).
- [48] Office National de la Météorologie (ONM) – Données de rayonnement solaire.
- [49] CREG, Réglementation des énergies renouvelables en Algérie", 2021.
- [50] A. Brahmi, "Développement des systèmes hybrides en Algérie : état des lieux", Revue Algérienne de l'Énergie, 2020.