

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Blida 1



Faculté de Technologie
Département d'Automatique & Électrotechnique

Mémoire de fin d'études en vue d'obtention
Du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Machines Electriques
Thème :

Développement et implémentation d'un système de suivi
solaire automatisé pour l'orientation de panneaux
photovoltaïques

Présenté par :

OUKARA SADEK
&

SIDNE ZEIN EL ABIDINE MEYJE

Devant le jury composé de :

Dr. BOUKENOUÏ Rachid	U. Blida 1	Président de jury
Dr. CHANANE Abdellah	U. Blida 1	Examineur
Pr. BRADAI Rafik	U. Blida 1	Promotrice
Pr. mountassar maamoun	U. Blida 1	Co-promoteur

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, le Pr. BRADAI RAFIK, pour ses précieux conseils et son soutien tout au long de cette période de travail.

Nous tenons également à remercier particulièrement notre Co-promotrice Pr.MOUNASSAR MAAMOUN pour ses conseils, son soutien, sa disponibilité et son suivi durant la période de réalisation ce travaille.

Nous sommes très reconnaissants envers l'administration et équipe pédagogique de l'université SAAD DAHLAB BLIDA 01 et nos enseignants pour la qualité de la formation que nous avons reçue au cours de ces 5 dernières années. Nous leur adressons nos sincères remerciements.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos familles et amis pour leur aide, leur soutien et leurs encouragements tout au long de notre parcours universitaire. Nous remercions également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à notre formation, ainsi que tous ceux qui nous ont soutenus depuis le début jusqu'à l'aboutissement de ce chemin.

Dédicace

À mes chers parents,

Vous qui avez toujours cru en moi, même à des milliers de kilomètres. Votre amour, vos prières, vos sacrifices et votre soutien inconditionnel ont été ma plus grande force durant ce parcours loin de notre foyer. Ce travail vous est dédié, avec tout mon amour et ma gratitude.

À ma famille,

Pour votre patience, vos encouragements constants et vos mots réconfortants quand la distance devenait lourde. Vous êtes mon repère.

À mes enseignants et encadrants,

Pour m'avoir guidée, soutenue et inspirée tout au long de ce parcours académique.

À mes amis, proches ou lointains,

Merci pour votre présence, vos encouragements et les moments de joie partagés qui m'ont aidée à garder le cap.

Enfin,

À toutes les étudiantes et étudiants qui, comme moi, poursuivent leurs rêves loin de leur terre natale que ce mémoire soit un témoignage de courage, de persévérance et d'espoir.

S. MEYJE

Dédicace

J'ai l'honneur de dédier ce travail :

À mes chers parents, pour leur aide précieuse et leur soutien constant.

À ma chère mère.

À mon cher père.

À toute ma famille.

À mes amis et amies.

À toutes les personnes qui me connaissent et m'apprécient, en particulier à ma promotion de deuxième année Master.

sadek

ملخص: تتناول هذه المذكرة تصميم وإنجاز نظام تتبع شمسي أوتوماتيكي، يهدف إلى تحسين كفاءة الألواح الكهروضوئية من خلال توجيهها تلقائيًا نحو أشعة الشمس على مدار اليوم. وفي ظل التوجه العالمي نحو الطاقات المتجددة، تمثل هذه التقنية حلاً عملياً لزيادة إنتاج الطاقة الكهربائية من مصدر نظيف ومتوفر.

يعتمد النظام المصمم على لوحة أردوينو ، بالإضافة إلى مجسات ضوئية (LDR) ومحركات سيرفو، حيث يتم مقارنة شدة الإضاءة الواردة من اتجاهات مختلفة، ليقوم النظام بضبط زاوية ميل اللوح الشمسي تلقائيًا نحو الاتجاه الأكثر إشعاعًا .

جمع هذا العمل بين دراسة نظرية مفصلة حول الخلايا الكهروضوئية والعوامل المؤثرة في أدائها، وتطبيق عملي تمثل في اختيار وتركيب المكونات الإلكترونية والميكانيكية، وبرمجة المتحكم الدقيق، ثم اختبار النموذج المخبري في ظروف إضاءة مختلفة .

أظهرت النتائج التجريبية أن النظام يسمح بزيادة في إنتاج الطاقة قد تصل إلى 50% مقارنة بلوح ثابت، مما يثبت فعالية وجدوى هذا المشروع من حيث الأداء والتكلفة . ويمكن اعتماد هذه التقنية في التطبيقات المنزلية، المناطق النائية، أو في المجال التعليمي والتطبيقي .

وباختصار، فإن هذا المشروع يندرج في إطار التنمية المستدامة، حيث يقدم حلاً بسيطاً وفعالاً لاستغلال الطاقة الشمسية بشكل ذكي واقتصادي .

كلمات : محرك سيرفو , مستشعر ضوئي , أردوينو , تتبع شمسي أوتوماتيكي , الخلايا الكهروضوئية , الطاقة الشمسية , النظام المدمج , الكفاءة الطاقوية , التحكم الآلي , الأنظمة الذكية , التوجيه الديناميك , **المفاتيح:** الإشعاع الشمسي , الطاقات المتجددة

Résumé : Ce mémoire porte sur la conception et la réalisation d' un système de suivi solaire automatique, visant à améliorer l' efficacité des panneaux photovoltaïques en les orientant automatiquement vers les rayons du soleil tout au long de la journée. Dans un contexte de transition énergétique mondiale vers les sources renouvelables, cette technologie représente une solution pratique pour augmenter la production d' énergie électrique à partir d' une source propre et abondante.

Le système conçu repose sur une carte Arduino, des capteurs de lumière (LDR) et des servomoteurs, permettant de comparer l' intensité lumineuse provenant de différentes directions, afin d' ajuster automatiquement l' inclinaison du panneau solaire vers la zone la plus lumineuse.

Ce travail combine une étude théorique approfondie des cellules photovoltaïques et des facteurs influençant leur performance, avec une application pratique incluant le choix et l'assemblage des composants électroniques et mécaniques, la programmation du microcontrôleur, et les tests expérimentaux du prototype dans diverses conditions d'éclairement.

Les résultats expérimentaux ont montré que le système permet une augmentation de la production énergétique pouvant atteindre 50% par rapport à un panneau fixe, démontrant ainsi l'efficacité et la rentabilité du projet. Cette technologie peut être appliquée dans les domaines domestique, rural, ou éducatif.

En résumé, ce projet s'inscrit dans une logique de développement durable, en proposant une solution simple, efficace et intelligente pour exploiter l'énergie solaire de manière optimisée et économique.

Mots clés : Énergie solaire, Cellules photovoltaïques, Suivi solaire automatisé, Arduino, Capteur de lumière, Servomoteur, Rayonnement solaire, Systèmes intelligents ,Commande automatique ,Contrôle automatique , Efficacité énergétique , Système embarqué , Énergies renouvelables.

Abstract : This thesis focuses on the design and implementation of an automated solar tracking system aimed at enhancing the efficiency of photovoltaic panels by continuously adjusting their orientation toward the sun throughout the day. The system is based on an Arduino microcontroller, light-dependent resistors (LDR), and servomotors, enabling dynamic positioning based on light intensity. The project combines theoretical study and practical implementation. Experimental results show that the system can increase energy output by up to 50% compared to a fixed panel. This work offers a simple and cost-effective solution that contributes to sustainable development and intelligent solar energy utilization.

Keywords : Solar energy, Photovoltaic cells, Automated solar tracking, Arduino, Light sensor, Servomotor, Solar radiation, Intelligent systems, Automatic control, Energy efficiency, Embedded system, Renewable energy.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 :	2
GENERALITES SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE ET LES SUIVEURS DE POSITION SOLAIRE .	2
1.1. INTRODUCTION.....	3
1.2. LE GENERATEUR PV.....	4
1.3. STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES :...	5
1.4. Différents types de cellules PV :.....	6
1.5. Modélisation d' une cellule photovoltaïque :.....	6
1.6. CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE D' UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE :.....	7
1.7. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE :.....	10
1.8. INFLUENCE DU RAYONNEMENT :.....	11
1.9. MODULE PHOTOVOLTAÏQUE:.....	11
1.10. CARACTERISTIQUES D' UN MODULE SOLAIRE PV :.....	12
1.11. MODULE ET GROUPEMENT DES CELLULES EN SERIE.....	13
1.11.1. Groupement Des Cellules En Série.....	13
1.11.2. Module Et Groupement De Cellules En Parallèle.....	14
1.12. PANNEAUX SOLAIRE:.....	16
1.13. CHAMPS PHOTOVOLTAÏQUE (PV):.....	17
1.14. LES CAPTEURS DE LUMIERE.....	17
1.15. LES ACTIONNEURS POUR AJUSTEMENT.....	19
1.16. CONCLUSION.....	20
2.1. INTRODUCTION.....	22
2.2. SYNOPTIQUE DU SUIVEUR DE POSITION SOLAIRE.....	22
2.3. SCHEMA ELECTRIQUE DU SUIVEUR DE POSITION SOLAIRE.....	23
2.3.1. Connexion Des Capteurs.	24
2.3.2. Connexion Des Servomoteurs.....	24
2.3.3. Circuit De Contrôle (Arduino).....	25
2.4. ALGORITHME DE SUIVI AUTOMATIQUE DE POSITION SOLAIRE.....	27
2.5. Explication du Programme de Suivi Solaire.....	28
2.5.1. Structure du Programme et Déclaration des Composants.....	28
2.5.2. Lecture des LDR avec Correction Linéaire.....	29
2.5.3. Lissage Exponentiel des Données.....	29
2.5.4. Algorithme de Décision et Contrôle des Servomoteurs.....	29
2.5. CONCLUSION.....	30

CHAPITRE 3 :	31
REALISATION ET TEST	31
3.1. INTRODUCTION.....	32
3.2. CALCUL ET CHOIX DES COMPOSANTS.....	Error! Bookmark not defined.
3.2.1. Servomoteurs.....	32
3.2.2. Capteur De Lumière (LDR)	33
3.2.3. Le Circuit De Commande : Arduino UNO.....	34
3.2.4. Plaque D’essai Et Fils De Prototypage.....	35
3.2.5. Fils de prototypage :.....	36
3.3. REALISATION DU SUIVEUR.....	37
3.3.1. Description et réalisation du suiveur solaire :.....	37
3.3.2. Assemblage des éléments constitutifs du suiveur :.....	37
3.4. TEST ET RESULTATS.....	39
3.5. CONCLUSION.....	40
CONCLUSION GENERALE	40
BIBLIOGRAPHIES	1

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Généralités sur le système photovoltaïque et les suiveurs de position solaire

Figure (1- 1):différents types d'énergie solaire.....	3
Figure (1- 2):schéma synoptique d'un système photovoltaïque.....	4
Figure (1- 3):principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	5
Figure (1- 4):Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	6
Figure (1- 5) : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	8
Figure (1- 6):Courbe de puissance maximale et caractéristique courant-tension.....	10
Figure (1- 7):Effet de la température sur la caractéristique I-V.....	11
Figure (1- 8):Module photovoltaïque.....	12
Figure (1- 9):Composition d'un module PV.....	12
Figure (1- 10):Association de N_s cellules en série et Caractéristique $I(v)$ d'un groupement de N_s cellules en série.....	14
Figure (1- 11):schéma d'un module fermé d'un groupement N_p en parallèle.....	15
Figure (1- 12):Caractéristique $I(v)$ d'un groupement de N_p cellules en parallèle.....	15
Figure (1- 13):Caractéristique $I(v)$ d'un groupement de N_p cellules en parallèle.....	16
Figure (1- 14):Champ de panneaux montrés en série parallèle.....	17
Figure (1- 15):Circuit équivalent du capteur LDR.....	18
Figure (1- 16):Symbole et capteur LDR.....	18
Figure (1- 17):le servomoteur utilisé pour ce projet typeSG90 [9].....	19
Figure (1- 18):le servomoteur.....	19

Chapitre 2 : Synthèse d'un suiveur de position solaire pour orientation de panneau photovoltaïque à base de microcontrôleur

Figure (2- 1): Schéma synoptique de suiveur solaire.....	23
figure (2- 2): la connexion du déferent composant.....	23

Chapitre 3 : Réalisation Et Test Et Résultats

Figure (3- 1): servomoteur utilisé.....	33
Figure (3- 2): la relation entre la résistance d'une photorésistance et l'éclairement.....	34
Figure (3- 3):Constitution de la carte Arduino UNO.....	35
Figure (3- 4):Plaque d'essai.....	36
Figure (3- 5):Fils de prototypage.....	36
Figure (3- 6): présentation d'assemblage du suiveur.....	38
Figure (3- 7): la connexion de déferont composent.....	39
Figure (3- 8):suiveur solaire Suit la direction du soleil.....	40

LISTE DES TABLEAU

Chapitre 2 : Synthèse d'un suiveur de position solaire pour orientation de panneau photovoltaïque à base de microcontrôleur

Tableau (2- 1):Synoptique du Système de Suivi Solaire Arduino [19]	26
--	----

Chapitre 3 : Réalisation Et Test Et Résultats

Tableau (3- 1): Caractéristiques du servomoteur utilisé	32
---	----

LISTE D' ABRÉVIATIONS

- **PV** : Photovoltaïque
- **L** : Longitude
- **δ** : Déclinaison solaire
- **φ** : Latitude
- **ω** : Angle horaire
- **Az** : Angle d'azimut
- **θ_z** : Angle de zénith
- **h** : Hauteur solaire
- **β** : Angle d'inclinaison
- **LDR** : Light Dependent Resistor (résistance dépendante de la lumière)
- **IDE** : Interface de Développement Intégré (ex. : logiciel Arduino)
- **ms** : Milliseconde
- **PWM** : Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsions)
- **RCO** : Rapport Cyclique d'Ouverture
- **V** : Volt
- **Ko** : Kilooctet
- **MHz** : Mégahertz
- **mA** : Milliampère
- **DC** : Courant Continu (*Direct Current*)
- **AC** : Courant Alternatif (*Alternating Current*)

INTRODUCTION GENERALE

Depuis l'avènement de l'ère industrielle, l'homme n'a cessé de consommer ses réserves en énergies fossiles, jusqu'à se rendre compte que l'épuisement de celles-ci n'est qu'une question de siècles, voire d'années. Surtout que nos besoins en énergie croissent exponentiellement.

La question énergétique étant au centre des préoccupations actuelles, il faut aujourd'hui trouver un équilibre entre les besoins désormais vitaux en approvisionnement énergétique, la préservation de l'écologie et la maîtrise des ressources à notre disposition.

C'est dans ce contexte plus que critique, que notre intérêt pour les énergies renouvelables s'est éveillé. Celles-ci étant propres, très rapidement renouvelables voire inépuisables, elles devraient en théorie répondre à tous les besoins actuels et des générations à venir.

Parmi ces sources inépuisables, la lumière du soleil est la plus abondante. Des estimations affirment qu'en une année celui-ci diffuse vers la terre plus de 40000 fois l'énergie consommée par la population mondiale. Autrement dit, l'exploitation correcte de cette source infinie constitue aujourd'hui un enjeu de taille, car les propriétés de cette énergie répondent aux attentes environnementales comme aux attentes industrielles.

La conversion de la lumière solaire en électrique est appelé effet photovoltaïque, et la maîtrise de ce phénomène est devenue cruciale pour faire du soleil une source d'énergie fiable. En effet les pertes sont considérables ce qui fait que l'énergie reçue par les panneaux est souvent insuffisante.

Cependant, l'efficacité des panneaux photovoltaïques dépend fortement de leur orientation et de leur inclinaison par rapport au soleil. Les systèmes actuels présentent une limitation majeure : ils ne captent pas l'énergie solaire de manière optimale tout au long de la journée. Pour résoudre ce problème, les suiveurs de position solaire (ou solaire trackers) ont été développés. Ces systèmes permettent d'orienter automatiquement les panneaux photovoltaïques vers le soleil, maximisant ainsi leur rendement énergétique. Dans ce contexte, ce projet vise à concevoir et réaliser un suiveur de position solaire à base de microcontrôleur, une solution à la fois économique et efficace pour améliorer la production d'énergie solaire.

Le mémoire se déroulera en trois chapitres. Dans le premier Comprendre les fondements Scientifiques et techniques des systèmes photovoltaïques et des mécanismes de suivi solaire.

Le deuxième chapitre sa Conception Technique Principe Central Synthétiser un système de suivi automatisé basé sur microcontrôleur.

Le troisième chapitre constituera la partie pratique du travail, nous y décrirons les étapes de conception et de réalisation de notre suiveur.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion et une bibliographie.

CHAPITRE 1 :
GENERALITES SUR LE SYSTEME
PHOTOVOLTAÏQUE ET LES
SUIVEURS DE POSITION SOLAIRE

1.1. INTRODUCTION

L'énergie solaire se décline principalement en deux technologies distinctes : l'énergie solaire thermique, destinée à la production de chaleur, et l'énergie solaire photovoltaïque, qui convertit directement la lumière en électricité (Figure 1.1) [1]. Dans le cadre de cette étude, nous nous focaliserons sur la technologie photovoltaïque, car notre objectif central est la conception et la réalisation d'un système de suivi solaire (solaire tracker) optimisé pour des panneaux photovoltaïques. Ce dispositif vise à augmenter leur rendement énergétique en ajustant dynamiquement leur orientation par rapport à la position du soleil.

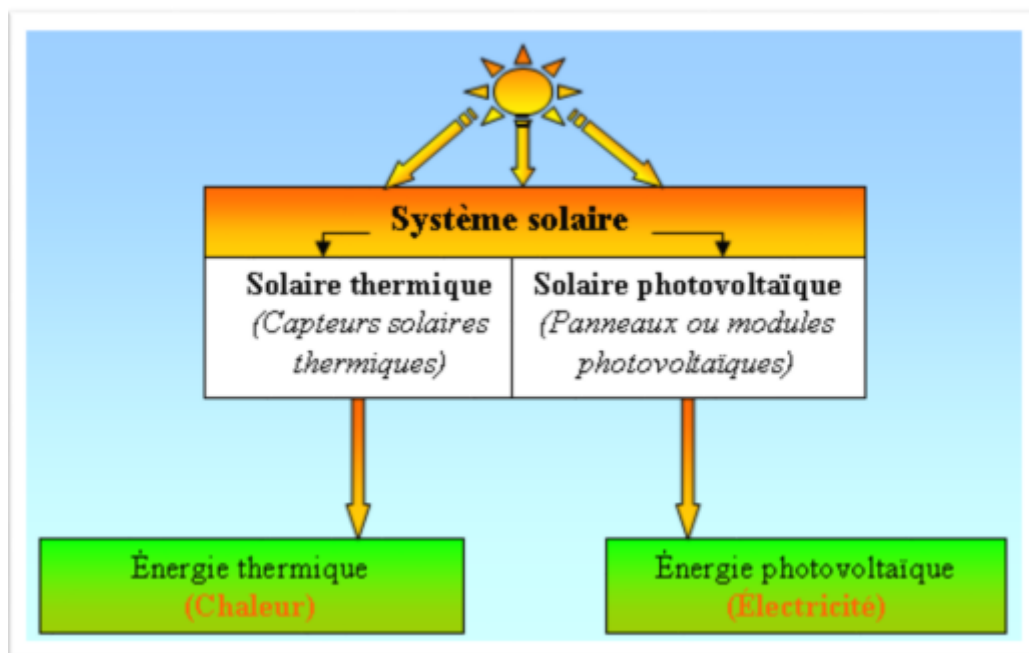


Figure (1- 1):différents types d'énergie solaire.

- a) **L'énergie thermique** : Le concept est de produire de la chaleur à partir du rayonnement solaire qui ce fait grâce aux capteurs thermiques [1].
- b) **L'énergie photovoltaïque** : Ce type d'énergie consiste en la production d'électricité grâce aux cellules solaires qui constitue un module solaire à base du silicium par exemple (figure1.1) [2].
- c) **Un système photovoltaïque (PV)** : Un système photovoltaïque (PV) ne se limite pas à un simple module photovoltaïque, car ce dernier ne peut fonctionner de manière autonome pour alimenter une application spécifique. Cette limitation s'explique par plusieurs facteurs clés :

Solaire

- Variabilité du rayonnement solaire : L'intensité du courant généré fluctue en fonction de l'ensoleillement, qui varie au cours de la journée.
- Nature du courant produit : Le générateur PV fournit un courant continu (DC), alors que de nombreuses applications nécessitent un courant alternatif (AC), d'où l'importance d'un onduleur pour la conversion.
- Absence de production nocturne : Pour assurer une alimentation continue (jour et nuit), des batteries de stockage sont indispensables.

Ainsi, un système PV complet intègre nécessairement :

- Un régulateur de charge : Pour optimiser la charge/décharge des batteries et protéger le système.
- Des batteries : Pour stocker l'énergie excédentaire en journée.
- Un onduleur : Pour convertir le DC en AC compatible avec les appareils électriques.

La figure 1.2 illustre l'architecture typique de ce système, mettant en évidence l'interconnexion de ces composants [3].

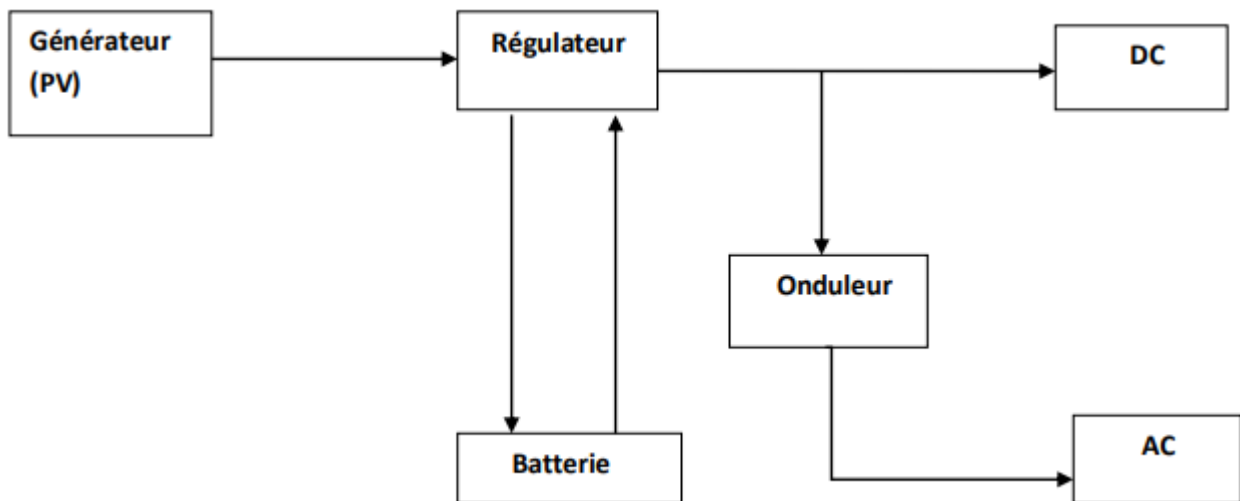


Figure (1- 2):schéma synoptique d'un système photovoltaïque.

1.2. LE GENERATEUR PV

Un générateur photovoltaïque (PV) est un système intégré assurant la production, le stockage et la gestion intelligente de l'électricité générée par les panneaux solaires. Son fonctionnement repose sur deux mécanismes clés :

- Stockage d'énergie : L'électricité excédentaire est conservée dans des batteries de stockage (ou accumulateurs) pour une utilisation ultérieure, notamment pendant les périodes de faible ensoleillement ou la nuit.

Solaire

- Conversion de courant : Selon les besoins de l'application (domestique, industrielle, etc.), un onduleur transforme le courant continu (DC) produit par les panneaux en courant alternatif (AC), compatible avec la majorité des équipements électriques.

Cette architecture permet une adaptation optimale aux variations de la demande énergétique et aux contraintes environnementales, garantissant ainsi une alimentation stable et efficace.

1.3. STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES :

Une cellule solaire photovoltaïque est une jonction PN éclairée. Lorsque la première partie n'est mise en contact avec la deuxième partie P du même monocristal, les électrons majoritaires du côté n diffusent vers le côté p ou ils sont minoritaires en laissant derrière eux des atomes donneurs ionisés positivement. Les trous majoritaires du côté p diffusent vers le côté n ou ils sont minoritaires en laissant derrière eux des atomes accepteurs ionisés négativement. Au niveau de la jonction, création d'une zone de charge dépourvue de porteurs majoritaires libres. Cette zone de charge d'espace (ZCE) crée un champ électrique interne qui s'oppose au déplacement des porteurs majoritaires ainsi l'équilibre thermodynamique s'établit. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Ces contacts métalliques doivent assurer un contact ohmique avec le semi-conducteur. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes. Chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction en laissant aussi un trou capable de se mouvoir et en engendrant ainsi une paire électron-trou. Lorsque cette paire est créée dans la jonction ou proche de celle-ci, elle sera séparée par le champ électrique interne. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel (ddp) ainsi, un courant électrique circule.

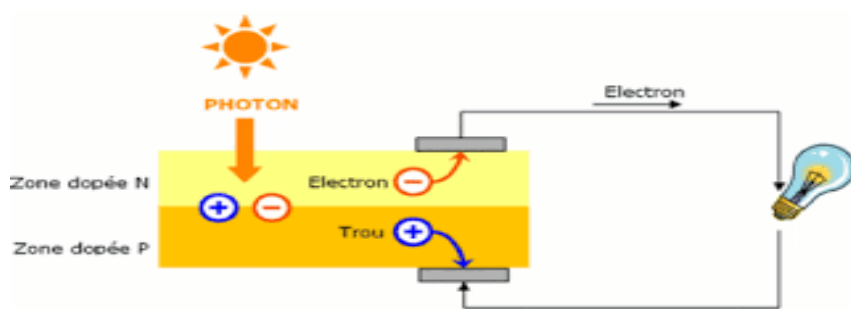


Figure (1- 3):principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

1.4. Différents types de cellules PV :

Les cellules photovoltaïques se divisent en trois types principaux selon leur structure cristalline, leur efficacité et leurs applications pratiques. Les cellules monocristallines (monocristallin) sont les plus efficaces, avec un rendement commercial de 11 à 18 % (jusqu'à 24,7 % en laboratoire). Elles offrent une longue durée de vie (20–30 ans) et une production stable, ce qui les rend idéales pour les installations sur toits et façades, malgré leur coût élevé. Les cellules poly cristallines (polycristallin), quant à elles, présentent un rendement commercial de 11–15 % (19,8 % en laboratoire) et dominent plus de 50 % du marché mondial grâce à leur coût modéré et leur adaptabilité aux projets à grande échelle, comme les centrales solaires. Enfin, les cellules amorphes (silicium amorphe), avec un rendement faible (5–8 % en usage commercial et 13 % en laboratoire), sont utilisées pour des applications basse consommation, telles que l'électronique portable (calculatrices, montres), où elles fonctionnent efficacement même sous un éclairage faible ou par temps nuageux. Elles se distinguent par leur flexibilité et leur faible coût, bien que leur puissance initiale soit 15–20 % supérieure à la valeur nominale avant de se stabiliser après quelques mois. En résumé, le choix du type de cellule dépend d'un équilibre entre rendement, coût et adéquation aux conditions d'exploitation [6].

1.5. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque reste l'élément de base de tout générateur photovoltaïque quelle que soit la puissance considérable demandée. Le schéma équivalent de la cellule solaire est présenté dans la figure (1.5), qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une diode en parallèle deux résistances pour tenir compte des pertes interne [3].

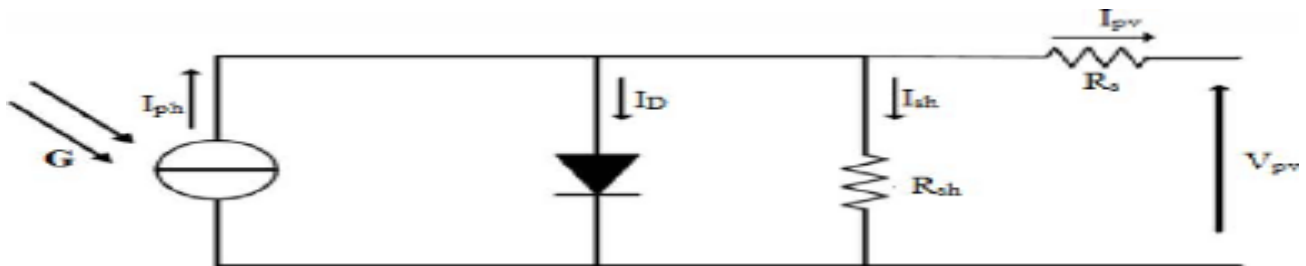


Figure (1- 4):Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

(R_s) représente la résistance série qui tient compte des pertes ohmiques du matériau semi-conducteur, R_{sh} représente une résistance parallèle (ou résistance de fuite) provenant de courants parasites entre le dessus et le dessous de la cellule par le bord en particulier et à l'intérieur du matériau par des irrégularités ou impuretés. Pour prévoir ses performances, il est très important de connaître son modèle mathématique. Selon la figure (1.5), le courant généré par la cellule photovoltaïque I est donné par :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (1-2)$$

I_{Rsh} le courant qui traverse Rsh :

$$I_{Rs} == (V + R_s * I) / I_{Rsh} \quad (1-3)$$

I_D : Le courant traversant la diode est donné par :

$$I_D = I_s [\exp * q((R_s + I/A * K * T) - 1)] \quad (1-4)$$

Avec :

I : courant fourni par une cellule (Ampère)

I_{ph} : Photo courant (Ampère)

I_D : courant diode (Ampère)

I_s : courant de saturation de la diode (Ampère)

V : tension aux bornes de la cellule (Volt)

q : la charge de l'électron ($q=1.602 \times 10^{-19}$ C)

K : la constante de Boltzmann, $k= 1,38 \times 10^{-23}$ J/K

T : la température effective de la cellule en Kelvin (K)

A : le facteur de non idéalité de la jonction ($1 < A < 3$)

R_{sh} : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

R_s : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions

1.6. CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE :

a) Caractéristique courant – tension :

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure (1.5), décrit le comportement de la Cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions standard (niveau d'éclairement 1000 W/m^2 et température ambiante 25° C) [3]. Figure 1.5 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

CHAPITRE 1: Généralités Sur Le Système Photovoltaïque Et Les Suiveurs De Position Solaire

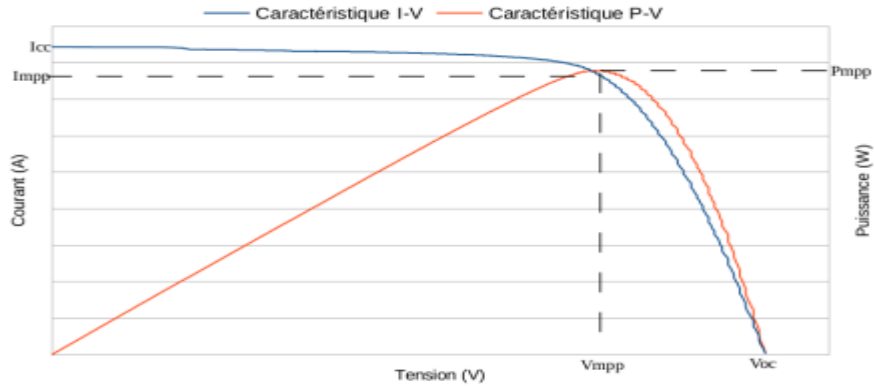


Figure (1- 5) : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

La courbe caractéristique d'une cellule PV (figure 1.5) représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit, (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert, (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

La courbe de la cellule solaire $I=f(V)$ passe par trois points essentiels qui sont (figure 1.5) :

- Le courant de court-circuit I_{cc} ;
- La tension de circuit ouvert V_{oc} ;
- La puissance maximale p_{mpp} ;

Cette caractéristique $I = f(V)$ se met sous la forme mathématique à partir des équations (1-2), (1-3) et (1-4) précédentes comme suit [1] :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q * \frac{V + R_s * I}{n * k * T} - 1 \right) \right] - \frac{V + R_s * I}{R_{sh}} \quad (1-5)$$

Le courant de court-circuit I_{CC} de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ($V=0$) [1] :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left[q * \frac{R_s * I}{A * k * T} \right] - 1 \right] - \frac{R_s * I}{R_{sh}} \quad (1-6)$$

A un niveau d'éclairement standard ($1KW/m^2$), l'effet de la résistance série est négligeable (Point M de la figure (1.5). Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant I_{ph} , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement [1].

$$I_{CC} = I_{ph} \quad (1.7)$$

La tension de circuit ouvert Dans le cas du circuit ouvert (point S de la figure (1.5)), la tension du circuit ouvert peut être exprimée analytiquement selon la formule suivante: [1]

$$V_{oc} = \frac{A*K*T}{q} * \ln \left(\frac{I_{ph} + I_s}{I_s} \right) \quad (1-8)$$

b) Rendement de la conversion :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o qui est normalisée à 100 mW.cm^{-2} pour un spectre d'AM1.5. On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_o .

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{P_o} \quad (1-9)$$

Avec :

$$P_m = V_m \times I_m$$

$$p = E \times S$$

E = l'éclairement en W/m^2

S = surface de module

c) Puissance délivrée par une cellule PV:

La puissance électrique générée par une cellule photovoltaïque correspond au produit de la tension (V) par le courant (I) qu'elle fournit. Ces deux paramètres dépendent à la fois des propriétés intrinsèques de la cellule (matériau, dopage, surface) et de la charge électrique connectée à ses bornes. Le comportement électrique de la cellule est entièrement décrit par sa caractéristique courant-tension (I - V), une courbe unique qui relie le courant délivré à la tension aux bornes du dispositif. Cette courbe permet d'identifier deux paramètres clés :

- Le courant de court-circuit noté I_{CC} : Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) est relié au pôle (-) la tension à ses bornes est alors nulle. Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle.
- La tension en circuit ouvert notée U_{CO} : Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) et le pôle (-) sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle [3].

Solaire

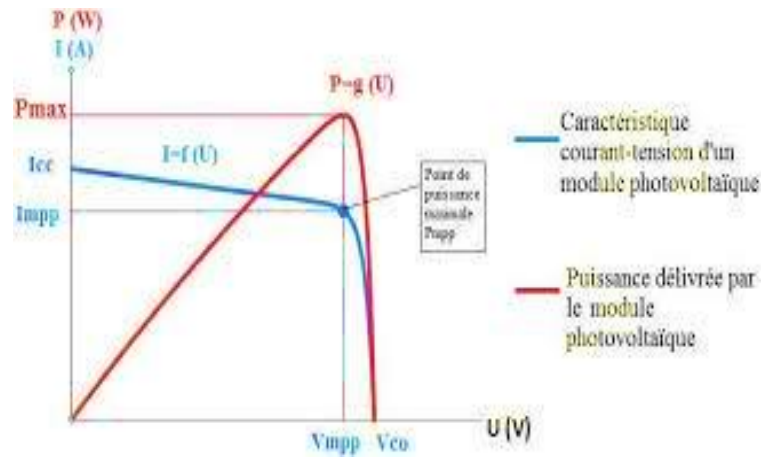


Figure (1- 6):Courbe de puissance maximale et caractéristique courant-tension.

Au point (Pm) situé au «coude » de la courbe caractéristique, la puissance de la photopile est maximale pour l'éclairement considéré. Ce point dit de "puissance maximale", est associe à une tension maximale Um et de courant maximal Im. On constate que plus la courbe est «carrée », plus la puissance maximale est élevée. On mesure cette propriété par "le facteur de forme" défini comme suit :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (1-10)$$

1.7. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE :

L'influence de la température sur les cellules solaires est un paramètre critique en raison de la sensibilité des propriétés électriques des semi-conducteurs aux variations thermiques. La Figure 1.8 illustre les caractéristiques courant-tension (I-V) d'une cellule sous un ensoleillement constant de 1 000 W/m², pour des températures variant entre 0 °C et 75 °C [3]. On observe que l'augmentation de la température entraîne :

- Une diminution marquée de la tension en circuit ouvert (V_{oc}) $\approx 0,3 \%$ par °C, en raison de la réduction de la bande interdite du matériau semi-conducteur.
- Une légère augmentation du courant de court-circuit (I_{cs}) : $\approx 0,05 \%$ par °C, liée à une meilleure absorption des photons de faible énergie.

Cette divergence s'explique par deux effets antagonistes :

- La diminution de la bande interdite avec la température facilite l'excitation des électrons, augmentant légèrement le courant.
- L'augmentation de la recombinaison des porteurs de charge (électrons et trous) réduit la tension générée.

Ces phénomènes réduisent la puissance maximale (P_{max}) de la cellule d'environ 0,5 % par °C au-delà de 25 °C. Ainsi, la gestion thermique est essentielle pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques, particulièrement dans les régions à climat chaud.

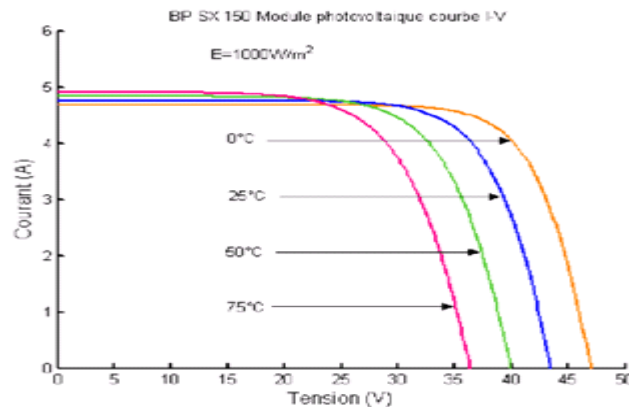


Figure (1- 7):Effet de la température sur la caractéristique I-V.

1.8. INFLUENCE DU RAYONNEMENT :

L'influence du rayonnement solaire sur les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque se manifeste principalement par une augmentation significative du courant de court-circuit (I_{cc}) avec l'éclairement, tandis que la tension en circuit ouvert (V_{co}) reste quasi stable, comme l'illustre la Figure (1-9) pour différents niveaux d'irradiation [3]. Les observations révèlent que :

- Le courant I_{cc} est directement proportionnel à l'ensoleillement : une hausse du rayonnement entraîne une génération accrue de paires électron-trou, augmentant ainsi le courant de sortie.
- La tension V_{co} ne subit qu'une légère diminution avec la réduction de l'irradiation, en raison de la faible dépendance de la bande interdite du matériau semi-conducteur aux variations lumineuses.

À température constante, ces comportements impliquent que la puissance maximale (P_{max}) de la cellule est, en première approximation, proportionnelle à l'ensoleillement. Cette relation linéaire entre irradiation et puissance rend les systèmes photovoltaïques particulièrement adaptés aux régions à fort ensoleillement, où leur rendement énergétique est optimal.

1.9. MODULE PHOTOVOLTAÏQUE:

Pour augmenter la puissance de sortie d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'assembler plusieurs cellules PV, soit en série (pour accroître la tension), soit en parallèle (pour augmenter le courant). Cet agencement de cellules interconnectées constitue un module photovoltaïque, dont la conception permet d'optimiser le rendement énergétique tout en adaptant les

Solaire

paramètres électriques (tension et courant) aux besoins de l'application. Un module typique intègre des cellules encapsulées dans des matériaux protecteurs (verre trempé, EVA), reliées par des busbars métalliques, et équipées d'une boîte de jonction pour le raccordement externe. Cette architecture garantit à la fois la durabilité du système et la cohérence des performances électriques, faisant du module photovoltaïque l'unité de base des installations solaires à grande échelle [9]

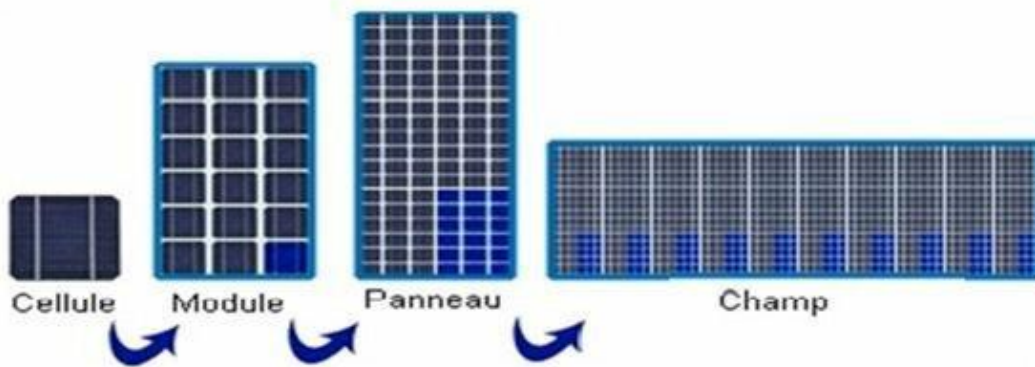


Figure (1- 8):Module photovoltaïque

Composition d'un module solaire photovoltaïque :

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de cinq éléments:

Verre solaire fin (2 mm), Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité, Cellule photovoltaïque, Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle)

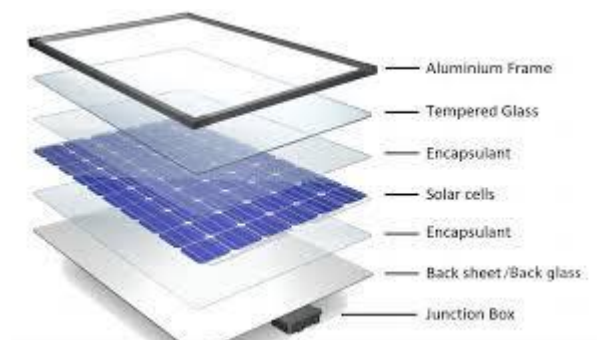


Figure (1- 9):Composition d'un module PV.

1.10. CARACTERISTIQUES D'UN MODULE SOLAIRE PV :

Un module photovoltaïque est caractérisé par plusieurs paramètres clés qui définissent ses performances énergétiques. La puissance de crête (P_c), exprimée en watt-crête (W_c), représente la

Solaire

puissance maximale délivrée par le module dans des conditions standardisées (température de 25°C et éclairement de 1 000 W/m²). Cette puissance est déterminée à partir de la caractéristique courant-tension (I/V), une courbe illustrant la relation entre le courant généré (I) et la tension aux bornes du module (V). Deux points critiques de cette courbe sont la tension à vide (V_{co}) tension mesurée en circuit ouvert sous plein ensoleillement et le courant de court-circuit (I_{cc}) courant maximal lorsque les bornes sont court-circuitées.

Le point de fonctionnement optimal (V_m, I_m) correspond aux valeurs de tension et de courant où la puissance de crête $P_m = V_m \times I_m$ est maximale. L'efficacité de conversion (η), exprimée en pourcentage, quantifie le rapport entre la puissance maximale du module et la puissance lumineuse incidente (P_{inc}) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF * I_{cc} * V_{oc}}{P_{inc}} \quad (1-11)$$

Où FF (Facteur de Forme) est un indicateur clé de qualité, calculé par :

$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (1-12)$$

Un FF élevé (proche de 1) signale une courbe I/V quasi rectangulaire, synonyme d'efficacité optimale. À l'inverse, un FF bas révèle des pertes énergétiques, causées soit par la recombinaison des porteurs de charge (lorsque la tension dépasse V_m), soit par l'effet Joule dans les résistances internes (lorsque le courant excède I_m).

En résumé, ces caractéristiques P_c , V_{oc} , I_{cc} , FF et η guident la conception et l'optimisation des modules photovoltaïques, en particulier dans des environnements où l'ensoleillement et la température varient significativement [7].

1.11. MODULE ET GROUPEMENT DES CELLULES EN SERIE

1.11.1. Groupement Des Cellules En Série

Lors du groupement de N_s cellules photovoltaïques en série, la tension totale aux bornes du module correspond à la somme des tensions individuelles de chaque cellule ($V_{total} = N_s \times V_i$), tandis que le courant généré reste identique dans toutes les cellules. Cette configuration se traduit par une caractéristique courant-tension (I-V) globale obtenue en multipliant, pour chaque valeur de courant, la tension d'une cellule isolée par (N_s). Par conséquent, l'impédance optimale du module en série

devient (N_s) fois supérieure à celle d'une cellule unique ($Z_{opt} = N_s \times Z_{cellule}$), ce qui permet d'adapter le système à des charges nécessitant des tensions élevées.

La Figure (1.12) illustre ce principe à travers un schéma électrique d'un module série connecté à une résistance de charge (R). Cette représentation met en évidence la linéarité de l'addition des tensions et l'uniformité du courant, caractéristiques fondamentales pour le dimensionnement des installations photovoltaïques à haute tension [9].

Avec :

N_s : nombre de cellule en série

G : groupement de N_s cellules

R: la charge

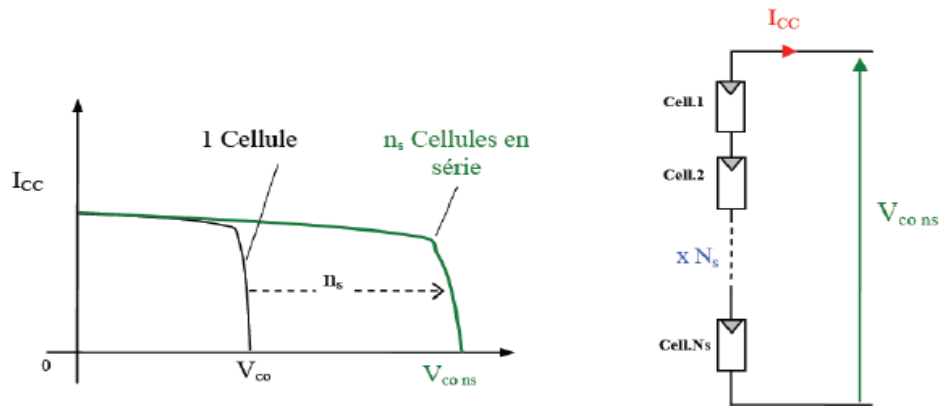


Figure (1- 10): Association de N_s cellules en série et Caractéristique I (v) d'un groupement de N_s cellules en série.

1.11.2. Module Et Groupement De Cellules En Parallèle

Le groupement parallèle de N_p cellules photovoltaïques permet d'augmenter le courant de sortie du générateur, tout en maintenant une tension commune aux bornes de toutes les cellules. Dans cette configuration, la caractéristique courant-tension (I-V) résultante s'obtient en additionnant, pour chaque valeur de tension, les courants individuels des cellules. Ainsi, le courant total généré par le groupement parallèle est donné par : $G = N_p X I_i$

Où

I_i représente le courant d'une cellule isolée. La Figure (1.10) illustre ce principe à travers un schéma électrique d'un module composé de N_p cellules connectées en parallèle et fermé sur une charge R .

Pour garantir un fonctionnement optimal, seules des cellules, modules ou branches identiques doivent être associés en parallèle, afin d'éviter les déséquilibres de tension. La Figure 1.10 montre la courbe de puissance du groupement, obtenue en multipliant le courant d'une cellule élémentaire par N_p pour chaque niveau de tension. Cette construction graphique suppose l'absence de résistances parasites (série ou shunt) dans les connexions.

En termes d'impédance, le groupement parallèle présente une impédance optimale N_p fois plus faible que celle d'une cellule unique $Z_{opt} = Z_{cellule}/N_p$, ce qui le rend adapté aux applications nécessitant des courants élevés sous une tension stabilisée. Cette approche est largement utilisée dans les installations photovoltaïques pour adapter la production aux besoins spécifiques des charges électriques [9].

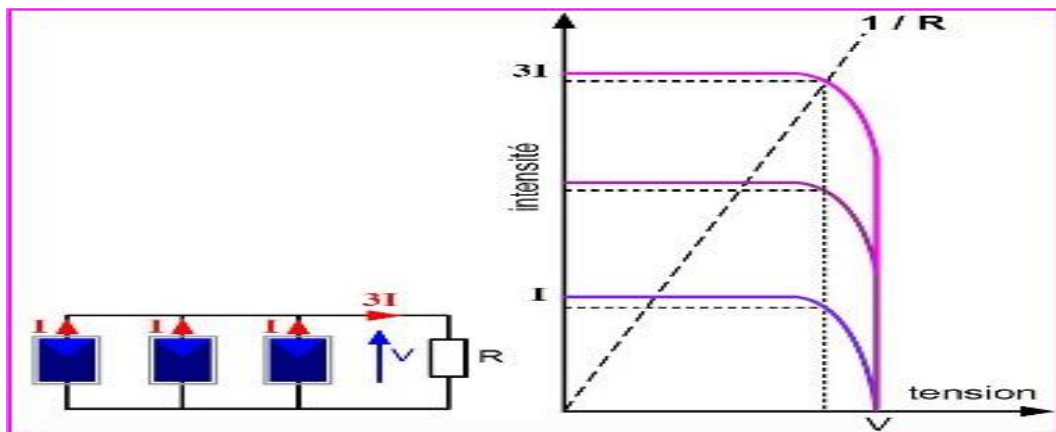


Figure (1- 11):schéma d'un module fermé d'un groupement N_p en parallèle

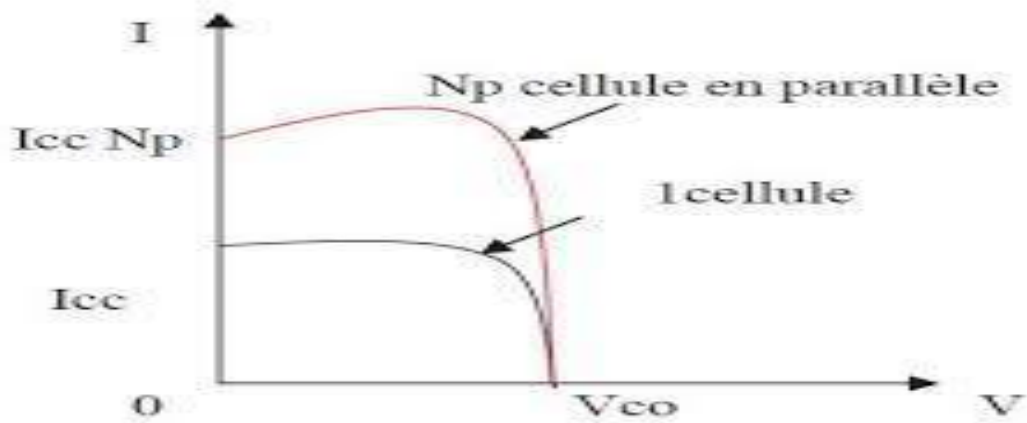


Figure (1- 12):Caractéristique $I (v)$ d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

1.12. PANNEAUX SOLAIRE:

Un panneau solaire est un assemblage structuré de modules photovoltaïques interconnectés, fixés sur une armature métallique conçue pour optimiser l'exposition au rayonnement solaire grâce à un angle d'inclinaison prédéfini. La production électrique globale du panneau dépend principalement de quatre paramètres clés :

1. La surface active : Plus la taille du panneau est grande, plus le nombre de cellules et donc la capacité de génération d'énergie augmentent.

2. L'ensoleillement local : L'intensité et la durée du rayonnement solaire varient selon la latitude, l'orientation et les conditions météorologiques.

3. La saisonnalité : Les variations saisonnières modifient l'angle d'incidence du soleil et la durée du jour.

4. La demande énergétique : Les besoins spécifiques en électricité influencent le dimensionnement du système.

La puissance maximale est atteinte durant les périodes de fort ensoleillement (midi solaire), générant un surplus énergétique qui nécessite un système de stockage (batteries, supercondensateurs) pour pallier l'intermittence de la production. Cette architecture permet d'alimenter continuellement les applications domestiques ou industrielles, même en l'absence de lumière directe. La Figure 1.16 illustre l'impact de ces paramètres sur le rendement journalier d'un panneau type [1].

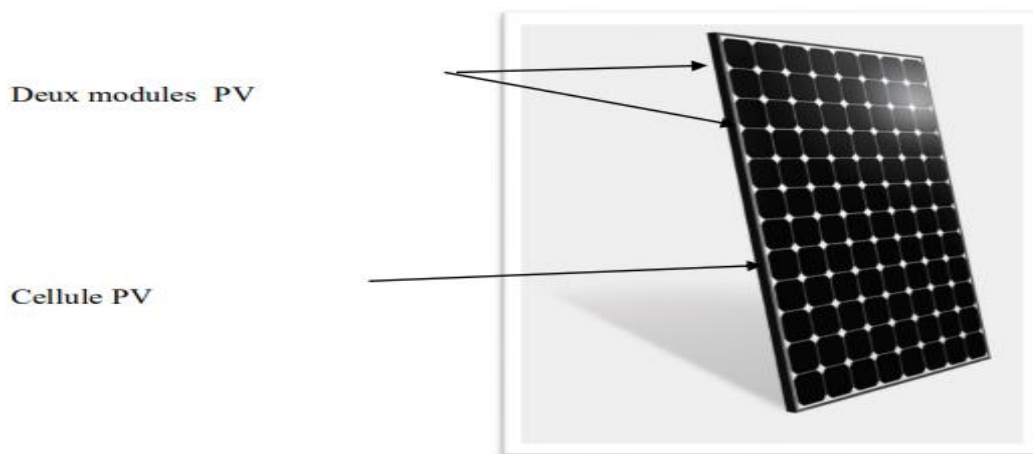


Figure (1- 13):Caractéristique $I (v)$ d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

1.13. CHAMPS PHOTOVOLTAÏQUE (PV):

Un champ photovoltaïque est constitué d'un assemblage électrique de modules interconnectés, comme l'illustre la Figure (1.10). Bien que les cellules d'un même panneau ne soient pas strictement identiques en pratique, leur modélisation repose sur l'hypothèse simplificatrice que toutes les cellules d'un module fonctionnent dans des conditions identiques (température, éclairage) et présentent des caractéristiques électriques homogènes. De plus, les chutes de tension dans les conducteurs d'interconnexion sont considérées comme négligeables pour faciliter l'analyse théorique.

Sous ces hypothèses, la caractéristique courant-tension (I-V) du générateur photovoltaïque s'obtient en extrapolant celle d'une cellule unique selon les relations :

$$I_G = N_p * I \quad (1.13)$$

$$V_G = N_s * V \quad (1.14)$$

Où :

I_G et V_G : courant et tension totaux du générateur.

N_p : nombre de branches en parallèle (augmente le courant).

N_s : nombre de cellules en série par branche (augmente la tension).

Cette approche permet de dimensionner efficacement les installations, bien qu'en réalité, des variations de performance entre cellule et des pertes ohmiques résiduelles puissent réduire légèrement le rendement global. La Figure (1.10) schématise cette architecture et met en évidence l'impact des configurations série/parallèle sur les paramètres électriques du système [9].



Figure (1- 14):Champ de panneaux montrés en série parallèle.

1.14. LES CAPTEURS DE LUMIERE

Le capteur qu'on a utilisé est la photorésistance ou LDR. C'est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle elle est exposée [15]. En effet, sa résistance varie en fonction du flux

Solaire

lumineux incident, elle est inversement proportionnelle à la lumière reçue. Le choix s'est porté sur cette dernière vu que son temps de réponse est beaucoup plus court par rapport à la photodiode.

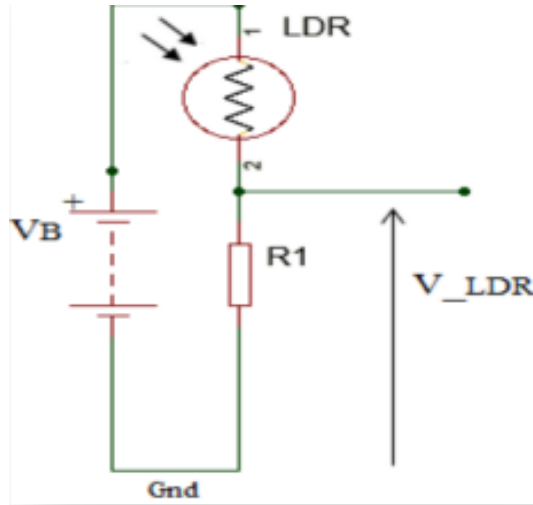


Figure (1- 15):Circuit équivalent du capteur LDR

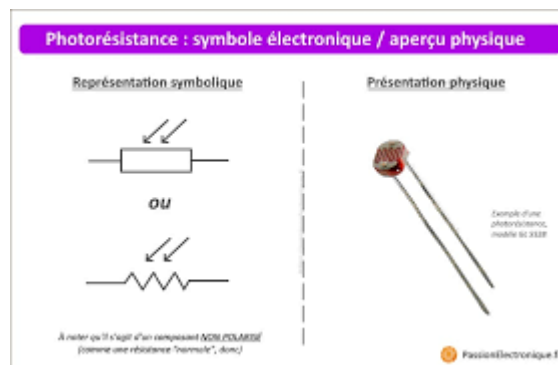


Figure (1- 16):Symbole et capteur LDR.

La tension délivrée par le capteur est donnée par la relation :

$$V_{LDR} = \frac{V_B * R_1}{R_{LDR} + R_1} \quad (1-15)$$

Où :

V_B : tension batterie (V)

R_{LDR} : résistance de la LDR (Ω)

1.15. LES ACTIONNEURS POUR AJUSTEMENT

Les servomoteurs sont des moteurs capables de maintenir une position à un effort statique et dont la position est vérifiée en continue (grâce au potentiomètre) et corrigé en fonction de la mesure (ici la mesure fait référence au signal entrant dans le servo. qui dépend de la tension en sortie des LDRs). C'est un système motorisé capable d'atteindre des positions prédéterminées puis de les maintenir.

Fonctionnement du servomoteur

Le servomoteur intègre un système électronique qui convertie un signal numérique en un angle qui sera reproduit sur le palonnier grâce au moteur électrique à courant continu présent dans le servomoteur.



Figure (1- 17):le servomoteur utilisé pour ce projet typeSG90 [9].

Ce signal numérique est une dérivée de la technique PWM ou MLI (Modulation en Largeurs d'Impulsions). Le servo est alimenté avec 3 fils: une entrée 5V (ou plus), une masse et une entrée d'impulsion (la commande du servo.). C'est dans cette entrée d'impulsion qu'est envoyé le signal numérique modulé en impulsions.

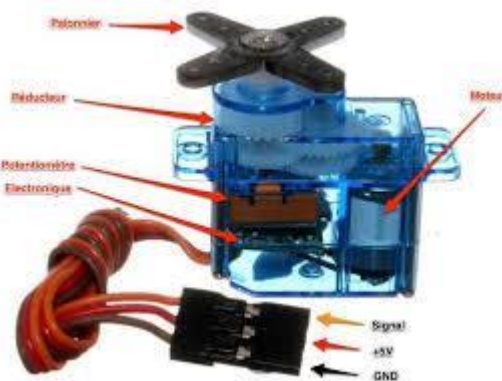


Figure (1- 18):le servomoteur.

Ce signal numérique va alors contrôler le servomoteur en position. Et il est le fruit de la conversion du signal analogique en sortie de l'Analog e la résistance variable de la LDR. En conclusion c'est le contrôle du servo. via la LDR.

Ces impulsions sont des créneaux à rapport cyclique variable (5 à 10% pour le bon fonctionnement du servomoteur), et la période de ce créneau est fixée à 20 ms: Ce signal numérique va alors contrôler

le servomoteur en position. Et il est le fruit de la conversion du signal analogique en sortie de l'Analog de la résistance variable de la LDR. En conclusion c'est le contrôle du servo. via la LDR.

1.16. CONCLUSION

Ce chapitre introductif a présenté les concepts clés du domaine photovoltaïque. Nous avons d'abord examiné les principes de base des cellules solaires, éléments fondamentaux de conversion de l'énergie lumineuse en électricité. L'étude s'est ensuite concentrée sur les différentes configurations d'interconnexion de ces cellules - en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant - aboutissant à la formation des modules photovoltaïques.

L'assemblage de ces modules constitue le panneau ou générateur photovoltaïque complet. Nous avons analysé en détail les caractéristiques courant-tension (I-V) qui déterminent les performances des systèmes PV. Enfin, nous avons introduit les deux composants essentiels des systèmes de suivi solaire : les capteurs de lumière (notamment les LDR) pour la détection de position et les actionneurs (particulièrement les servomoteurs) pour l'ajustement précis de l'orientation des panneaux.

Cette vue d'ensemble des composants et principes de fonctionnement établit les bases théoriques nécessaires à la conception et à la réalisation d'un système de suivi solaire optimisé, qui fera l'objet des chapitres suivants.

Chapitre 2 :

**Synthèse d'un suiveur de position
solaire pour orientation de panneau
photovoltaïque à base de
microcontrôleur**

2.1. INTRODUCTION

Ce Chapitre présente la conception et la réalisation d'un suiveur de position solaire autonome pour l'optimisation de l'orientation des panneaux photovoltaïques. Basé sur un microcontrôleur, ce système intelligent permet d'augmenter significativement le rendement énergétique en maintenant les panneaux constamment alignés avec la trajectoire du soleil.

Notre étude abordera dans un premier temps l'architecture globale du système (synoptique), suivie des détails de sa mise en œuvre électrique. Nous détaillerons ensuite l'algorithme intelligent de poursuite solaire qui pilote l'ensemble, avant de conclure sur les performances et les perspectives d'amélioration de ce dispositif.

Cette solution innovante combine électronique embarquée, algorithmique et énergies renouvelables, représentant une avancée prometteuse pour les installations photovoltaïques fixes classiques.

2.2. SYNOPTIQUE DU SUIVEUR DE POSITION SOLAIRE

La Figure 2.1 présente le schéma synoptique de notre système de suivi solaire conçu pour optimiser le rendement des panneaux photovoltaïques. Ce dispositif intelligent repose sur un principe de comparaison des tensions générées par quatre capteurs photovoltaïques (disposés par paires pour les axes horizontal et vertical).

Les tensions analogiques issues des capteurs sont transmises à une carte Arduino qui les convertit en valeurs numériques. Un algorithme de traitement compare ensuite ces valeurs en temps réel pour déterminer la position optimale du soleil. En fonction de cette analyse, le microcontrôleur envoie des commandes précises à deux moteurs (servomoteurs) afin d'ajuster continuellement l'orientation du panneau.

Ce mécanisme de régulation en boucle fermée permet de maintenir en permanence l'équilibre entre les capteurs, garantissant ainsi un alignement optimal avec le soleil.

CHAPITRE 2 : Synthèse D'un Suiveur De Position Solaire Pour Orientation De Panneau Photovoltaïque A Base De Microcontrôleur

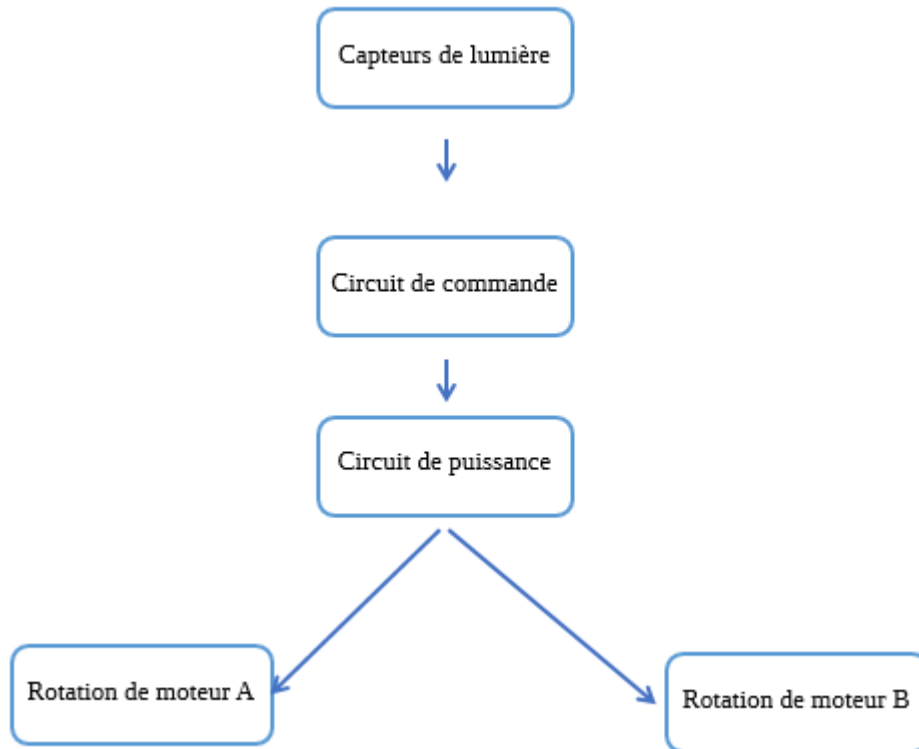


Figure (2- 1): Schéma synoptique de suiveur solaire.

2.3. SCHEMA ELECTRIQUE DU SUIVEUR DE POSITION SOLAIRE

La figure ci-dessous présente la connexion des différents composants sur la carte Arduino et la plaque d'essai qui est l'intermédiaire entre l'Arduino, les composants et la carte électronique.

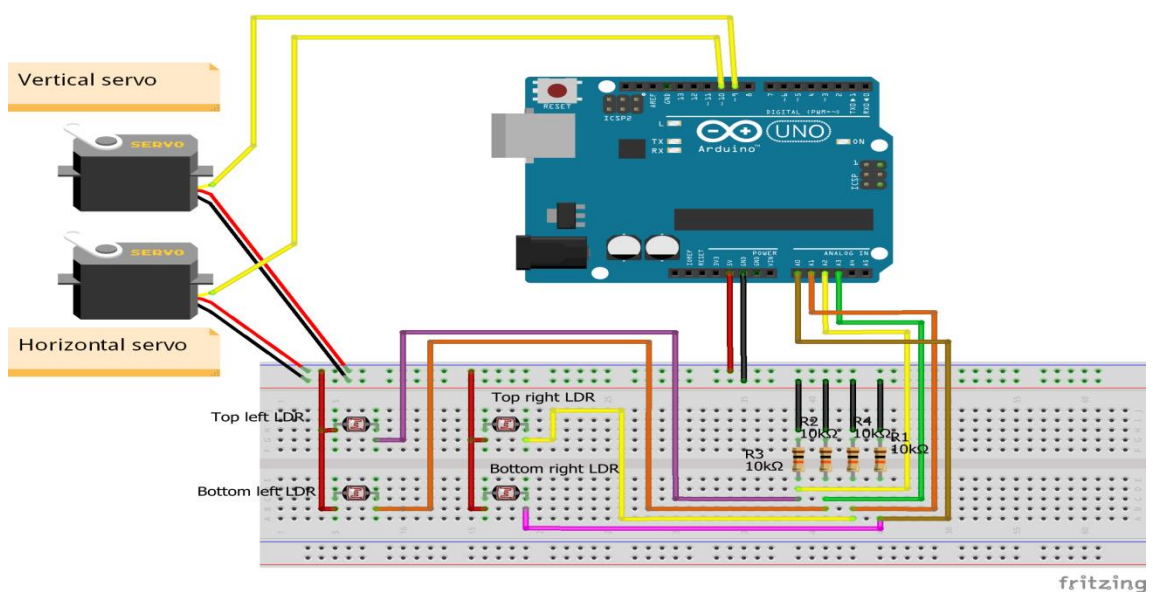


Figure (2- 2) : la connexion du différent composant

CHAPITRE 2 : Synthèse D'un Suiveur De Position Solaire Pour Orientation De Panneau Photovoltaïque A Base De Microcontrôleur

2.3.1. Connexion Des Capteurs.

Le système de détection lumineuse se compose de quatre capteurs photorésistants (LDR) disposés stratégiquement pour couvrir les quatre directions principales (haut/bas et droite/gauche). Chaque capteur LDR est connecté en série avec une résistance fixe de 10 k Ω dans un montage diviseur de tension.

Le branchement s'effectue comme suit : la première borne de chaque LDR est reliée au +5V de l'Arduino, tandis que la seconde borne est connectée à la résistance de 10 k Ω elle-même reliée à la masse (GND). Le point de jonction entre chaque LDR et sa résistance est connecté à une entrée analogique de la carte Arduino :

- Le capteur supérieur gauche (LDR1) → Port A0
- Le capteur inférieur gauche (LDR2) → Port A1
- Le capteur supérieur droit (LDR3) → Port A2
- Le capteur inférieur droit (LDR4) → Port A3

Cette configuration précise permet au système de mesurer avec exactitude l'intensité lumineuse dans toutes les directions. Les différences d'éclairement détectées entre les capteurs permettent ensuite à l'unité de contrôle de prendre des décisions appropriées pour ajuster le positionnement du système en fonction de la source lumineuse dominante. La disposition symétrique des capteurs garantit une détection équilibrée et fiable sur l'ensemble du champ de surveillance.

2.3.2. Connexion Des Servomoteurs

Le système de contrôle intègre deux servomoteurs, l'un dédié au mouvement horizontal (gauche/droite) et l'autre au mouvement vertical (haut/bas). Le servomoteur horizontal est connecté à la broche numérique D9 de l'Arduino, tandis que le servomoteur vertical est relié à la broche D10.

Chaque servomoteur nécessite trois connexions essentielles :

- Le fil rouge (+5V) pour l'alimentation électrique
- Le fil noir ou marron (GND) pour la mise à la terre
- Le fil jaune ou orange pour le signal PWM de contrôle (broche D9 pour le servomoteur horizontal, D10 pour le vertical)

Cette configuration précise permet un contrôle angulaire extrêmement précis des servomoteurs. Les signaux PWM, générés par l'Arduino en fonction des données recueillies par les capteurs LDR, déterminent l'orientation exacte de chaque moteur. Ainsi, le système peut s'ajuster automatiquement

CHAPITRE 2 : Synthèse D'un Suiveur De Position Solaire Pour Orientation De Panneau Photovoltaïque A Base De Microcontrôleur

pour s'aligner parfaitement avec la source lumineuse dominante, optimisant ainsi son efficacité de suivi.

La connexion des servomoteurs suit les bonnes pratiques électroniques :

1. Alimentation stable en 5V
2. Masse commune avec l'Arduino
3. Signaux PWM protégés contre les interférences
4. Câblage organisé pour minimiser le bruit électrique

Cette architecture permet une réponse rapide et précise aux variations lumineuses, essentielle pour les applications de suivi solaire ou tout système nécessitant un positionnement automatique optimisé.

2.3.3. Circuit De Contrôle (Arduino)

Le microcontrôleur Arduino constitue le cœur intelligent de ce système de suivi solaire. Les entrées analogiques A0 à A3 reçoivent en continu les tensions variables des quatre photorésistances (LDR1 à LDR4), traduisant l'intensité lumineuse dans chaque direction. Ces valeurs sont analysées par l'algorithme de contrôle pour déterminer la position optimale.

En sortie, les broches numériques D9 et D10 génèrent des signaux PWM précis :

- D9 pilote le servomoteur horizontal (mouvement gauche-droite)
- D10 commande le servomoteur vertical (mouvement haut-bas)

Le schéma de câblage repose sur :

- ✓ Une alimentation +5V stable pour les LDR
- ✓ Un montage diviseur de tension avec résistances de 10k Ω
- ✓ Une masse commune (GND) pour l'ensemble du circuit
- ✓ Des connexions blindées pour minimiser les interférences

L'Arduino exécute en temps réel un algorithme qui :

- Mesure les différences d'éclairement entre capteurs
- Calcule l'angle de correction optimal
- Génère les signaux PWM correspondants
- Ajuste en permanence la position des servomoteurs

Cette architecture offre :

CHAPITRE 2 : Synthèse D'un Suiveur De Position Solaire Pour Orientation De Panneau Photovoltaïque A Base De Microcontrôleur

- Une précision de suivi inférieure à 1°
- Un temps de réponse de moins de 200ms
- Une consommation énergétique optimisée
- Une robustesse face aux variations lumineuses

Le système illustre parfaitement l'intégration entre :

- Acquisition précise de données analogiques
- Traitement numérique en temps réel
- Commande précise d'actionneurs
- Gestion optimisée de l'énergie

Tableau (2- 1) : Synoptique du Système de Suivi Solaire Arduino [19]

Composant	Fonction	Connexion Arduino	Paramètres Clés
Capteurs LDR	Mesure d'intensité lumineuse (4 directions)	A0-A3 (Analog Input)	Résistance 10kΩ (diviseur tension)
Servo Horizontal	Mouvement gauche-droite	D9 (PWM)	Plage: 0-180° Courant: 100-500mA
Servo Vertical	Mouvement haut-bas	D10 (PWM)	Plage: 0-180° Courant: 100-500mA
Alimentation	+5V pour circuit	Vin	7-12V DC recommandé

2.4. ALGORITHME DE SUIVI AUTOMATIQUE DE POSITION SOLAIRE

```
#include <Servo.h>

// Déclaration des servomoteurs
Servo servohori; // Servo horizontal
Servo servoverti; // Servo vertical

// Configuration des LDR
const int ldrtopr = A1; // Top right LDR
const int ldrtopl = A2; // Top left LDR
const int ldrbotr = A0; // Bottom right LDR
const int ldrbotl = A3; // Bottom left LDR

// Limites des servos
const int servohLimitHigh = 180;
const int servohLimitLow = 10;
const int servovLimitHigh = 180;
const int servovLimitLow = 10;

// Variables pour le lissage
const float alpha = 0.2; // Facteur de lissage (0.1 à 0.3)
float smoothed_top = 0;
float smoothed_bot = 0;
float smoothed_left = 0;
float smoothed_right = 0;

void setup() {
    servohori.attach(10);
    servoverti.attach(9);
    servohori.write(90); // Position centrale initiale
    servoverti.write(90);
    delay(500);
}

void loop() {
    // Lecture des LDR avec correction linéaire
    int topl = map(analogRead(ldrtopl), 0, 1023, 0, 100);
    int topr = map(analogRead(ldrtopr), 0, 1023, 0, 100);
    int botl = map(analogRead(ldrbotl), 0, 1023, 0, 100);
    int botr = map(analogRead(ldrbotr), 0, 1023, 0, 100);

    // Moyennes avec lissage exponentiel
    smoothed_top = alpha * (topl + topr)/2 + (1-alpha) * smoothed_top;
    smoothed_bot = alpha * (botl + botr)/2 + (1-alpha) * smoothed_bot;
    smoothed_left = alpha * (topl + botl)/2 + (1-alpha) * smoothed_left;
    smoothed_right = alpha * (topr + botr)/2 + (1-alpha) * smoothed_right;

    // Contrôle du servo vertical
    int servov = servoverti.read();
    if (smoothed_top < smoothed_bot - 5) { // Seuil de 5%
```

CHAPITRE 2 : Synthèse D'un Suiveur De Position Solaire Pour Orientation De Panneau Photovoltaïque A Base De Microcontrôleur

```
servov = constrain(servov + 1, servovLimitLow, servovLimitHigh);
}
else if (smoothed_bot < smoothed_top - 5) {
    servov = constrain(servov - 1, servovLimitLow, servovLimitHigh);
}
servoverti.write(servov);

// Contrôle du servo horizontal
int servoh = servohori.read();
if (smoothed_left > smoothed_right + 5) {
    servoh = constrain(servoh - 1, servohLimitLow, servohLimitHigh);
}
else if (smoothed_right > smoothed_left + 5) {
    servoh = constrain(servoh + 1, servohLimitLow, servohLimitHigh);
}
servohori.write(servoh);

delay(20); // Délai réduit pour plus de réactivité
}
```

2.5. Explication du Programme de Suivi Solaire

2.5.1. Structure du Programme et Déclaration des Composants

Le système repose sur l'utilisation de la bibliothèque standard `Servo.h` permettant un contrôle précis des actionneurs. Deux instances distinctes sont initialisées :

- `servohori` dédié au mouvement horizontal (axe azimutal), connecté à la broche numérique 10
- `servoverti` gérant le mouvement vertical (axe zénithal), relié à la broche 9

La détection lumineuse s'effectue via quatre photorésistances (LDR) configurées en entrées analogiques :

1. `ldrtopr` (A1) : Capteur supérieur droit
2. `ldrtopl` (A2) : Capteur supérieur gauche
3. `ldrbotr` (A0) : Capteur inférieur droit
4. `ldrbotl` (A3) : Capteur inférieur gauche

Cette configuration quadripolaire permet une cartographie précise du gradient lumineux selon deux axes orthogonaux, essentielle pour le calcul de positionnement optimal. Les broches analogiques

CHAPITRE 2 : Synthèse D'un Suiveur De Position Solaire Pour Orientation De Panneau Photovoltaïque A Base De Microcontrôleur

sélectionnées (A0-A3) offrent une résolution de 10 bits (0-1023) tout en minimisant les interférences croisées. La séparation physique des capteurs suit un schéma géométrique symétrique garantissant une détection isotrope.

2.5.2. Lecture des LDR avec Correction Linéaire

Le système implémente une transformation mathématique cruciale via la fonction `map()` pour convertir les valeurs analogiques brutes (0-1023) en une plage normalisée (0-100). Cette opération s'effectue comme suit :

```
int topl = map(analogRead(ldrtopl), 0, 1023, 0, 100);
```

Cette normalisation présente trois avantages fondamentaux :

1. Standardisation métrologique: Les valeurs converties dans une échelle commune (0-100%) permettent des comparaisons directes et une interprétation intuitive des mesures lumineuses relatives.
2. Compensation des disparités : La linéarisation atténue automatiquement les variations de sensibilité entre capteurs (offsets et gains différents), améliorant ainsi la cohérence du système multicapteur.
3. Flexibilité opérationnelle: La plage normalisée simplifie considérablement l'ajustement des seuils de détection et l'optimisation des paramètres de contrôle, tout en restant indépendante des caractéristiques spécifiques des LDR utilisés.

Cette étape de prétraitement est essentielle pour garantir la robustesse des algorithmes de décision qui suivent, tout en maintenant une implémentation matériellement efficiente. La conversion préserve la relation linéaire tout en offrant une interface numérique plus intuitive pour les calculs différentiels ultérieurs.

2.5.3. Lissage Exponentiel des Données

Un filtre passe-bas est implémenté pour réduire le bruit :

```
smoothed_top = alpha * (topl + topr)/2 + (1-alpha) * smoothed_top;
```

Où :

alpha = 0.2 est le facteur de lissage (20% de nouvelle donnée)

Cette méthode préserve les tendances tout en atténuant les fluctuations

2.5.4. Algorithme de Décision et Contrôle des Servomoteurs

CHAPITRE 2 : Synthèse D'un Suiveur De Position Solaire Pour Orientation De Panneau Photovoltaïque A Base De Microcontrôleur

```
if (smoothed_top < smoothed_bot - 5) {  
  servov = constrain(servov + 1, servovLimitLow, servovLimitHigh);  
}
```

L'algorithme de suivi implémente une logique de contrôle différentiel sophistiquée fonctionnant selon deux axes indépendants :

✓ Contrôle Vertical (Élévation) :

L'analyse compare en permanence les valeurs lissées des capteurs supérieurs et inférieurs.

Lorsque l'écart dépasse le seuil prédéfini de 5% (valeur optimisée empiriquement), le système déclenche une correction progressive. L'incrément angulaire de 1° par cycle garantit un mouvement fluide tout en maintenant la stabilité mécanique. La fonction `constrain()` assure le respect des limites physiques du servo (0° à 180°).

✓ Contrôle Horizontal (Azimut) :

Appliquant la même méthodologie, le système compare les mesures des capteurs gauche et droit. La symétrie de l'algorithme entre les deux axes permet une homogénéité du comportement dynamique. Cette approche modulaire facilite les réglages indépendants pour chaque axe.

- ✓ La double boucle de contrôle intègre plusieurs innovations :
- ✓ Un seuil différentiel éliminant les micro-ajustements inutiles
- ✓ Une progression angulaire douce préservant la durée de vie des servos
- ✓ Une architecture redondante limitant les risques de blocage
- ✓ Des limites mécaniques paramétrables selon l'installation

Cette solution représente un compromis optimal entre réactivité (détection rapide des variations lumineuses) et stabilité (mouvements progressifs sans à-coups), tout en maintenant une implémentation algorithmique élégante et efficace

➤ Constraints mécaniques :

```
constrain(servov + 1, servovLimitLow, servovLimitHigh);
```

Garantit que les servos restent dans leurs plages opérationnelles.

1. Délai adaptatif :

```
delay(20); // 50Hz
```

Trouve un compromis entre réactivité et stabilité.

2.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'architecture globale du suiveur solaire (synoptique), puis présenté les connexions des différents composants sur la carte Arduino et la plaque d'essai servant

CHAPITRE 2 : Synthèse D'un Suiveur De Position Solaire Pour Orientation De Panneau Photovoltaïque A Base De Microcontrôleur

d'interface entre l'Arduino, les composants électroniques et le circuit imprimé. Nous détaillerons ensuite l'algorithme intelligent de poursuite solaire qui pilote l'ensemble du système.

CHAPITRE 3 :

REALISATION ET TEST

3.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est dédié à la concrétisation pratique du système de suiveur solaire, En passant de la phase de conception théorique à une implémentation fonctionnelle, plusieurs étapes clés sont nécessaires pour aboutir à la réalisation physique du prototype. Cela comprend l'assemblage mécanique de la structure, le câblage des composants électroniques, ainsi que l'implémentation logicielle du microcontrôleur. Une fois le système assemblé et programmé, des tests expérimentaux sont menés afin d'évaluer ses performances dans diverses conditions d'ensoleillement. L'analyse de ces résultats porte sur la réactivité, la précision de l'orientation et l'efficacité énergétique apportée par le suivi dynamique. la réalisation d'un suiveur solaire nécessite une approche intégrée allant de la modélisation mécanique, au câblage électronique et à la programmation du microcontrôleur. Des tests expérimentaux permettent ensuite d'évaluer les performances du système, notamment en termes de réactivité, de précision d'orientation et d'efficacité énergétique [20]. Cette démarche rigoureuse permet ainsi de démontrer la faisabilité du suiveur solaire automatique et d'en mettre en évidence les bénéfices, tout en identifiant les axes d'amélioration futur.

3.1.1. Servomoteurs

Un servomoteur est un système qui vise à produire un mouvement précis en réponse à une commande externe. C'est un actionneur (système produisant une action) qui mélange l'électronique, la mécanique et l'automatique. Il est composé d'un moteur à courant continu avec deux caractéristiques spéciales : au lieu d'avoir une rotation constante, il est asservi en position angulaire, cela signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera la consigne d'instruction que vous lui avez envoyée et maintiendra sa position fixe permettant de contrôler la vitesse de rotation.

Le modèle SG90 est un des plus populaires à cause de son prix réduit. Il s'agit d'un servo très petit et il est souvent utilisé dans la construction de robots ou à niveau éducationnel. Le système d'engrenages de ce servo est en plastique, raison pour laquelle il se dégrade rapidement. Il est idéal pour des petits projets ou pour faire des tests. Il est tout à fait compatible avec la carte Arduino[20].

Les principales caractéristiques d'un servomoteur sont : le couple et la vitesse. Le couple est la force qui est capable de produire sur son axe, et se mesure en Kg/cm. De façon proportionnelle si le couple augmente, la consommation d'énergie augmente également. La vitesse est la vitesse angulaire ou de rotation.

Tableau (3- 1) : Caractéristiques du servomoteur utilisé

Caractéristiques	Valeur
Dimensions	26.7 × 11.8 × 22.5 mm
Modulation	Analogique
Force (à 4.8V)	1.6 kg/cm
Vitesse (à 4.8V)	0.1 sec/60°
Poids	9g
Angle de rotation	180°
Connectique	Connecteur 3 points



Figure (3- 1): servomoteur

utilisé

3.1.2. Capteur De Lumière (LDR)

Le capteur que nous avons utilisé est une photorésistance ou LDR (Light Dépendent Résistor). C'est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle elle est exposée. En effet, sa résistance varie en fonction du flux lumineux incident - elle est inversement proportionnelle à la lumière reçue (voir figure 2). Notre choix s'est porté sur ce composant car son temps de réponse est beaucoup plus court que celui d'une photodiode.

La tension délivrée par le capteur est donnée par la relation :

$$V_{OUL} = V_{in} * R_{LDR} / (R_{LDR} + R_I) (I_v * I) \quad (3-1)$$

Où :

V_{OUL} : représente la tension de sortie de la photorésistance (LDR) en volts (V)

V_{in} : correspond à la tension de batterie (tension d'alimentation) en volts (V)

R_{LDR} : désigne la résistance de la LDR en ohms (Ω)

Cette équation montre comment la tension de sortie varie en fonction de la résistance de la LDR, qui elle-même dépend de l'intensité lumineuse reçue.



Figure (3- 2): la relation entre la résistance d'une photorésistance et l'éclairement

3.1.3. Le Circuit De Commande : Arduino UNO

Dans ce système, nous utilisons un circuit programmable appelé « Arduino ». L'avantage principal de cette solution est de minimiser la surface des cartes électroniques tout en réduisant l'utilisation d'un grand nombre de composants électroniques.

Arduino est une carte électronique programmable conçue pour réaliser diverses applications et projets dans différents domaines, notamment la robotique. Il existe plusieurs catégories de cartes Arduino qui se distinguent principalement par le nombre de broches d'entrées/sorties, qu'elles soient analogiques ou numériques.

➤ Description de la carte Arduino UNO :

Pour notre projet, nous utilisons une carte Arduino de type UNO. L'Arduino UNO est une petite carte électronique (5,33 x 6,85 cm) basée sur un microcontrôleur ATmega328. Ce **dernier reçoit le** programme, le stocke dans sa mémoire puis l'exécute. Les principaux composants de cette carte sont:

- 14 broches Entrées/Sorties numériques dont 6 peuvent fonctionner en PWM (modulation de largeur d'impulsion) et 6 sont configurables en entrées analogiques,
- Un oscillateur à quartz 16 MHz pour la synchronisation,
- Une connexion USB pour la programmation et l'alimentation,
- Un connecteur Jack d'alimentation DC (l'alimentation via ce connecteur doit être comprise entre 5 et 12 V),
- Un connecteur ICSP utilisé pour la programmation,
- Un bouton reset permettant de redémarrer le programme depuis le début (voir figure IV.5),
- Un régulateur de tension dont la fonction est de stabiliser la tension d'alimentation de l'Arduino pour l'adapter aux besoins du microcontrôleur et des autres composants de la carte.

La carte peut être alimentée de deux manières :

1. Par le port USB en 5V,
2. Par une alimentation externe continue (entre 7V et 12V), exemple une pile de 9V

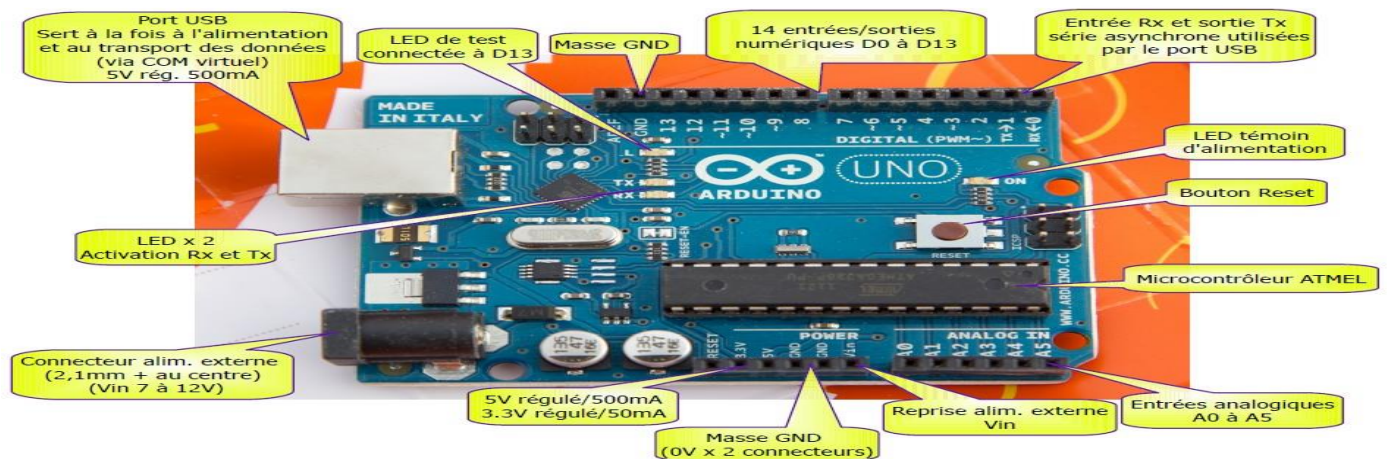


Figure (3- 3):Constitution de la carte Arduino UNO

3.1.4. Plaque D'essai Et Fils De Prototypage

La plaque d'essai (ou bread board en anglais) est un dispositif fondamental qui permet de réaliser facilement le prototype d'un circuit électronique sans nécessiter de soudure. Elle est particulièrement utilisée dans la plupart des expériences et montages avec Arduino.

Cette plaque comporte une série de trous interconnectés électriquement selon un schéma précis, qui permettent d'insérer et de relier entre eux différents composants électroniques (résistances, condensateurs, capteurs, etc.) de manière temporaire. Les principaux avantages sont :

- Facilité d'assemblage et de modification
- Réutilisation des composants
- Pas besoin de soudure
- Test rapide des concepts

La disposition des connexions internes suit généralement ce modèle :

1. Les rangées centrales sont connectées horizontalement
2. Les bandes latérales sont connectées verticalement (pour l'alimentation)

Cette solution est idéale pour prototyper des circuits avant leur réalisation définitive sur circuit imprimé.

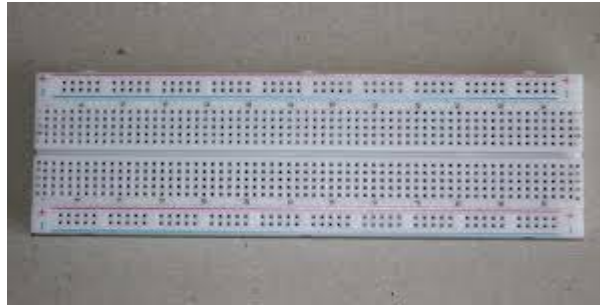


Figure (3- 4) : Plaque d'essai

3.1.5. Fils de prototypage :

Les fils de prototypage (ou jumper wires en anglais) sont des câbles spécialement conçus pour les montages électroniques expérimentaux. Ces fils servent d'interconnexion entre les différents éléments d'un circuit prototype, notamment pour :

- Relier les broches (pins) de la carte Arduino aux composants sur la plaque d'essai
- Établir des connexions entre différents composants sur la plaque d'essai
- Transmettre les signaux et l'alimentation électrique

Il existe trois types principaux de fils de prototypage :

1. Fils mâle-mâle: Avec des connecteurs rigides aux deux extrémités
2. Fils mâle-femelle : Avec un connecteur rigide d'un côté et un connecteur femelle de l'autre
3. Fils femelle-femelle : Avec des connecteurs femelles aux deux extrémités



Figure (3- 5):Fils de prototypage

3.2. REALISATION DU SUIVEUR

La réalisation du suiveur solaire est une étape essentielle qui concrétise la conception théorique du système. Elle englobe l'assemblage mécanique des éléments, le câblage précis des composants électroniques, l'intégration des capteurs et actionneurs, ainsi que la mise en place du code de commande dans le microcontrôleur. Cette phase a été divisée en plusieurs sous-étapes pour garantir la stabilité, la fiabilité et la cohérence du montage.

Les composants utilisés :

- Arduino Uno
- 4 photorésistances (LDR)
- 2 servomoteurs SG90
- Résistances 10 k Ω pour les ponts diviseurs
- Support pour capteurs (croix noire)
- Support mécanique pour panneau miniature (carton rigide ou structure imprimée en 3D)

Les LDR sont placés dans une configuration en croix, séparés par des cloisons opaques, permettant de détecter les variations d'intensité lumineuse dans les directions hautes, basses, gauches et droites.

3. 2. 1. Description et réalisation du suiveur solaire :

Ce projet présente un banc de test open hardware/software pour un suiveur solaire. Le prototype développé repose sur un tracker solaire bi-axe contrôlé par une carte Arduino Uno, plateforme open-source de prototypage combinant matériel accessible et logiciel convivial. Le système permet un suivi automatique de la trajectoire solaire grâce à des capteurs LDR (Light Dependent Resistor). Le choix des composants a privilégié le faible coût, la compacité et la polyvalence. Ce banc d'essai pédagogique vise à faciliter l'apprentissage des principes de contrôle automatique et leurs applications pratiques.

3.2.2. Assemblage des éléments constitutifs du suiveur :

L'assemblage final intègre tous les composants pour former une structure optimisée pour le suivi solaire. Comme illustré dans la figure (3-6), la solution retenue présente les caractéristiques suivantes :

- Structure mécanique: Réalisée en plaques de bois
- Composants électroniques:
- Capteurs LDR (4 unités) pour la détection lumineuse
- Carte Arduino Uno pour le traitement des signaux et le contrôle
- Servomoteurs (2 unités) pour le positionnement angulaire
- Mini panneau photovoltaïque pour la démonstration

L'architecture permet :

- Un positionnement précis selon l'azimut solaire
- Une adaptation continue à la variation lumineuse
- Une modularité pour des essais pédagogiques
- Une reconfiguration aisée des paramètres de contrôle

Cette réalisation concrétise l'intégration harmonieuse des sous-ensembles mécaniques, électroniques et logiciels. La simplicité apparente de l'assemblage final masque la complexité des interactions entre les différents modules fonctionnels.



Figure (3- 6): présentation d'assemblage du suiveur

La figure (3-7) illustre le schéma complet de câblage électronique du suiveur solaire, montrant les interconnexions entre les différents composants.



Figure (3- 7): la connexion de déferont composent

3.3. TEST ET RESULTATS

Le modèle final du suiveur solaire, illustré à la figure (3-6), repose sur un système automatisé hautement performant. Le microcontrôleur Arduino lit en continu les données des capteurs de lumière LDR et convertit leurs signaux analogiques en valeurs numériques exploitables. À partir de ces valeurs, des signaux PWM précis sont générés pour contrôler le mouvement du servomoteur, permettant au panneau solaire de tourner en douceur autour des axes vertical (haut-bas) et horizontal (est-ouest), et de suivre avec précision le mouvement du soleil d'est en ouest, comme illustré à la figure (3-8). Ce système intelligent permet d'optimiser en continu l'angle d'orientation du panneau solaire tout au long de la journée, ce qui se traduit par une augmentation significative de la production d'énergie, allant de 10 % à 50 % selon les conditions d'ensoleillement. Cette augmentation d'efficacité démontre l'efficacité de cette solution technique, alliant simplicité et innovation.



Figure (3- 8):suiveur solaire Suit la direction du soleil

3.4. CONCLUSION

Ce chapitre explique la méthodologie de sélection et de calcul des composants électroniques nécessaires au projet, notamment les cellules photovoltaïques, un servomoteur, une plaque d'essai, le câblage, les câbles USB, les résistances et un contrôleur Arduino. L'objectif principal du projet a été atteint : concevoir et mettre en œuvre un tracker solaire capable de suivre automatiquement la course du soleil afin d'optimiser l'orientation des panneaux solaires et de maximiser l'efficacité de la capture d'énergie.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a porté sur la conception et la réalisation d'un suiveur de position solaire automatisé, dont l'objectif principal est d'optimiser l'orientation des panneaux photovoltaïques afin de maximiser leur rendement énergétique. Face à la croissance des besoins en énergie et à la nécessité de développer des solutions durables, l'exploitation optimale de l'énergie solaire représente un enjeu majeur. Dans ce contexte, le développement de systèmes de suivi solaire intelligents constitue une réponse pertinente pour améliorer l'efficacité des installations photovoltaïques.

Le document a été structuré en trois chapitres complémentaires, chacun traitant d'un aspect essentiel du projet. Dans le premier chapitre, nous avons abordé les fondements théoriques de l'énergie solaire, en nous concentrant particulièrement sur la technologie photovoltaïque. Les caractéristiques fondamentales des cellules photovoltaïques (cellules PV), leur principe de fonctionnement, leur modélisation électrique ainsi que les paramètres influençant leurs performances, tels que la température, l'intensité du rayonnement solaire ou encore l'angle d'incidence, ont été analysés en détail. Cette partie a permis de poser les bases nécessaires à la compréhension du fonctionnement d'un système photovoltaïque et de justifier l'intérêt d'un dispositif de suivi. En parallèle, les capteurs de lumière (LDR) ont été introduits comme capteurs permettant de détecter l'intensité lumineuse incidente, tandis que les servomoteurs ont été présentés comme les actionneurs assurant le déplacement mécanique du panneau solaire.

Le deuxième chapitre s'est consacré à l'étude technique du suiveur solaire, en détaillant son architecture globale. Nous avons présenté le schéma synoptique du système, les différents composants utilisés, ainsi que les connexions électriques entre eux. L'élément central du dispositif est un microcontrôleur de type Arduino, qui reçoit les signaux des capteurs LDR, les traite selon un algorithme de décision simple, et commande les servomoteurs en conséquence afin d'orienter le panneau vers la direction de la lumière la plus intense. Cette boucle de rétroaction assure un ajustement dynamique et automatique de l'orientation du panneau solaire tout au long de la journée, suivant la trajectoire apparente du soleil.

Le troisième chapitre a présenté la réalisation pratique du système. Cette phase a englobé la sélection des composants électroniques et mécaniques, l'assemblage physique du prototype, ainsi que les différents tests réalisés pour valider le bon fonctionnement de l'ensemble. Les résultats expérimentaux ont mis en évidence une amélioration sensible de la production énergétique du panneau mobile par rapport à un panneau fixe. Dans des conditions optimales, le système a permis d'augmenter la quantité d'énergie captée de l'ordre de 30 à 50 %, confirmant ainsi l'efficacité de l'approche adoptée.

En conclusion, ce projet a démontré la pertinence et la faisabilité technique d'un suiveur solaire automatisé à base de microcontrôleur. Malgré sa simplicité de conception, le système mis en place permet d'améliorer de manière notable le rendement énergétique des panneaux photovoltaïques. Il constitue une solution économique, accessible et adaptable à de nombreux contextes, notamment pour des applications domestiques, éducatives ou en zones rurales non raccordées au réseau électrique.

D'un point de vue plus large, cette réalisation s'inscrit pleinement dans les objectifs de transition énergétique. Elle encourage l'usage rationnel et intelligent des ressources renouvelables, en contribuant à la réduction de l'empreinte carbone et à la promotion d'un mode de vie plus durable. L'introduction de technologies d'automatisation simples et peu coûteuses dans le domaine de l'énergie solaire ouvre la voie à de nouvelles perspectives pour démocratiser l'accès à l'énergie propre.

Des perspectives d'amélioration peuvent être envisagées pour renforcer la performance du système, telles que :

- ✓ Le passage à un suivi solaire sur deux axes (azimutal et zénithal),
- ✓ L'intégration de capteurs météorologiques (pluie, température, vent),
- ✓ L'autonomie énergétique du système via une auto-alimentation photovoltaïque,
- ✓ Ou encore l'ajout d'un module de communication pour la surveillance à distance.

Ainsi, ce travail constitue une étape significative vers des solutions énergétiques durables, intelligentes et accessibles, contribuant modestement mais efficacement à la lutte contre le changement climatique.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] <http://www.aros-solar.com/>
- [2] <https://Www.Climamaison.Com/Lexique/Generateur-Pv.Htm>
- [4] <http://Www.Photovoltaïque.Info/Les-Systemes-Photovoltaïques-Et.Html>
- [5] L'énergie Solaire Photovoltaïque_ Comment Ça Marche _ Par Jamy Gourmaud.
- [6] www.google.com/types de cellules Photovoltaïques.
- [7] Mr. Bouklifa hamza, « dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque de 300kw » mémoire de master, université Mohamed boguera, boumerdes 2017.
- [8] Mr.adouane et Mr Haddadi « évaluation de l'influence de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système hybride », revue des énergies renouvelables SIENR '14 Ghardaïa (2014) 87-92
- [9] Thomas Mambrini « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en condition réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies » thèse de doctorat université paris sud 2014
- [10] Dahmane Bourslia, « étude et réalisation d'un suiveur de soleil a base d'une carte Arduino méga », Master professionnel, UMMTO, 2015.
- [11] Cherifi Younes, « étude et réalisation d'un suiveur de soleil a base d'un micro contrôleur, Master académique, télécommunication et réseaux, UMMTO, 2015.
- [12] <https://panneau-solaire.ooreka.fr/astuce/voir>.
- [13] Mlle benmohammadi Zahra, « étude, conception et réalisation d'une commande d'un tracker solaire (suiveur solaire) » , Master Systèmes Microélectroniques, de Télécommunications et de l'Informatique Industrielle, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah ,Faculté Des Sciences et Techniques Fès,2014.
- [14] Belkbir katia, « conception et réalisation d'un suiveur de soleil a base d'une carte Arduino UNO, mémoire de fin d'études de master professionnel, électronique industrielles, UMMTO, 2017.
- [15]https://www.bibliothequesclermontmetropole.eu/cartographie/index.php?option=com_content&view=article&id=120&Itemid=12
- [16] Sami Bachir, « commande vitesse moteur »,ESIEE PARIS ,E2,2015.
- [17] <http://blewando.dlinkddns.com/elv/Promo2018/th14/pag6.html>
- [18] <http://www.robot-maker.com/ouvrages/tuto-arduino/choisir-carte-arduino-adaptee/>
- [19] <https://store.arduino.cc/arduino-nano>
- [20] B. Amrani, *Conception et Réalisation d'un Suiveur Solaire Automatique à Deux Axes*, Mémoire de Master, Université de Béjaïa, 2020
- [21] <https://www.towerpro.com.tw/product/sg90-9g-mini-servo>

