



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

Université Abbès Laghrou Khenchela

Faculté de Technologie Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Présenté par :

FAHLOUL KHEIR EDDINE

THEME

**REALISATION D'UN SUIVEUR SOLAIRE A
DOUBLE AXE COMMANDER PAR ARDUINO
POUR L'OPTIMISATION DU RENDEMENT
PHOTOVOLTAÏQUE.**

Soutenu le :14 Juin 2026 devant la commission d'examen composée de :

BOUMAARAF Abdelaali : MAA : à L'Université Abbès Laghrou de Khenchela **Président**

BENHADDA Nabil : PROF : à L'Université Abbès Laghrou de Khenchela **Encadrant**

BOUALI Lazher : MCB : à L'Université Abbès Laghrou de Khenchela **Co-Encadrant**

DJELAILIA Okba : MCA : à L'Université Abbès Laghrou de Khenchela **Examineur**

Promotion 2025/2026

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, pour son suivi attentif, ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

J'adresse également mes sincères remerciements à mon Co-encadreur pour son aide, ses orientations pertinentes et son soutien durant les différentes étapes de ce projet.

Je remercie vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner et d'évaluer ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation et à l'acquisition des connaissances nécessaires à la réalisation de cette étude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inestimable tout au long de mon parcours.

À mon cher fils **Massil**, ma source de bonheur, de courage et de motivation. Que ce travail soit pour toi un témoignage de mon amour et un exemple de persévérance.

À ma chère épouse, pour son soutien inestimable et ses encouragements constants tout au long de ce travail.

À tous ceux qui me sont chers.

Résumé

L'énergie solaire est l'une des principales sources d'énergie renouvelable. Les panneaux photovoltaïques permettent de transformer le rayonnement solaire en énergie électrique. L'objectif de ce travail est d'améliorer la production d'énergie électrique à l'aide d'un système de suivi solaire automatique et de comparer ses performances à celles d'un panneau fixe.

Pour cela, un suiveur solaire basé sur une carte Arduino Uno, des capteurs LDR, un moteur à courant continu et un système vis-écrou a été réalisé. Des essais expérimentaux ont été effectués afin d'évaluer les performances du système développé. Les résultats obtenus montrent que le prototype réalisé présente un rendement plus élevé par rapport à un panneau fixe. C'est pourquoi plusieurs recherches peuvent être menées dans ce domaine afin d'exploiter au maximum l'énergie issue du rayonnement solaire.

Mots-clés : Énergie solaire, photovoltaïque, suiveur solaire, Arduino Uno, LDR, moteur à courant continu.

ملخص

تُعَدّ الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة المتجددة. تسمح الألواح الكهروضوئية بتحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية. يهدف هذا العمل إلى تحسين إنتاج الطاقة الكهربائية باستعمال نظام تتبع شمسي آلي ومقارنة أدائه مع لوحة شمسية ثابتة.

ولتحقيق ذلك، تم إنجاز متتبع شمسي يعتمد على لوحة Arduino Uno ، وحساسات ضوئية من نوع LDR ، ومحرك تيار مستمر ، ونظام لولب وصامولة (Vis-écrou). كما أجريت تجارب عملية لتقييم أداء النظام المطور. وتُظهر النتائج أن النموذج المنجز يحقق مردودًا أعلى مقارنة باللوحة الثابتة، لذلك يمكن إجراء المزيد من الأبحاث في هذا المجال من أجل استغلال أكبر قدر ممكن من الطاقة الشمسية.

الكلمات المفتاحية : الطاقة الشمسية، الخلايا الكهروضوئية، المتتبع الشمسي، Arduino Uno ، LDR، محرك تيار مستمر.

Abstract

Solar energy is one of the main renewable energy sources. Photovoltaic panels convert solar radiation into electrical energy. The objective of this work is to improve electrical energy production using an automatic solar tracking system and to compare its performance with that of a fixed solar panel.

For this purpose, a solar tracker based on an Arduino Uno board, LDR sensors, a DC motor, and a screw-nut (vis-écrou) mechanism was developed. Experimental tests were carried out to evaluate the performance of the proposed system. The results show that the developed prototype achieves a higher efficiency compared to a fixed panel. Therefore, further research can be conducted in this field in order to maximize the exploitation of solar radiation energy.

Keywords : Solar energy, photovoltaic, solar tracker, Arduino Uno, LDR, DC motor.

Sommaire

Nomenclatures	8
Liste des figures	10
Liste des tableaux	11
CHAPITRE 1	GÉNÉRALITÉS SUR L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE
1.1 Introduction	15
1.2 L'énergie renouvelable	15
1.3 L'énergie solaire photovoltaïque	15
1.4 Mouvements de la terre autour du soleil	16
1.5 Déclinaison δ	16
1.6 Systèmes photovoltaïques	17
1.6.1 Classification des systèmes PV	17
1.6.1.2 Systèmes PV à injection aux réseaux	18
1.7 Technique du suiveur solaire	19
1.7.1 Premières utilisations	19
1.8 Types de suiveurs solaires	19
1.8.1 Suiveurs solaire passif	20
1.8.2 Suiveur solaire actif	21
1.8.3 Suiveur solaire mono-axe	21
1.8.4 Suiveur solaire bi-axial	22
1.8.4.1 Avantages et les inconvénients des trackers solaires à 2 axes	23
1.9 Systèmes à un axe vs systèmes à double axe	23
1.9.1 Comparaison de l'efficacité et de la complexité	23
1.9.2 Différences de coûts et d'entretien	24
1.10 Conclusion	24
CHAPITRE 2	DESCRIPTION DES SUIVEURS SOLAIRES A DOUBLE AXE
2.1 Introduction	26
2.2 Principe mécanique du suiveur double axe	26
2.3 Suivi du soleil au cours de la journée et des saisons	26
2.4 Structure mécanique générale	27
2.5 types de moteurs utilisés dans le système de suivi solaire	27
2.5.1 Moteur à courant alternatif	27
2.5.2 Les moteurs à courant continu	27
2.5.3 Moteurs pas à pas	31
2.5.4 Les servomoteurs	33
2.6 Contraintes mécaniques du suiveur solaire	35
2.6.1 Poids du panneau photovoltaïque	35

2.6.2 Effets du vent	35
2.6.3 Résistance de la structure	36
2.6.4 Stabilité mécanique.....	36
2.6.5 Couple nécessaire au déplacement.....	36
2.7 Conclusion	36
CHAPITRE 3	CONCEPTION ET MODELISATION DU SUIVEUR SOLAIRE
3.1 Introduction.....	38
3.2 Description mécanique du suiveur double axe réalisé	38
3.3 Choix des moteurs DC pour chaque axe	39
3.4 Capteurs et acquisition de données.....	40
3.4.1 Caractéristiques.....	41
3.5 Circuit de commande	41
3.5.1 Description de l'Arduino.....	41
3.5.2 Programmation	43
3.6 Algorithme de contrôle	44
3.6.1 Étapes de l'algorithme :.....	44
3.7 Câble de connexion	45
3.8 Module relais 2 canaux 5 V	46
3.8.1 Caractéristiques.....	46
3.9 Moteur DC 12 V	47
3.10 Modélisation des capteurs LDR.....	48
3.11 Modélisation des moteurs à courant continu (MCC)	48
3.11.1 Modèle électrique	48
3.11.2 Modèle mécanique.....	49
3.12 Dimensionnement mécanique : support, axes et transmission linéaire.....	49
3.13 Calcul de puissance la vitesse et du couple, des moteurs à courant continu	50
3.13.1 Calcul de la puissance.....	50
3.13.2 Calcul de la vitesse angulaire.....	50
3.13.3 Calcul du couple	51
3.14 Conclusion	51
CHAPITRE 4	REALISATION EXPERIMENTALE.....
4.1. Introduction.....	53
4.2 Montage mécanique et intégration du panneau	53
4.3 Partie commande	54
4.4 Installation des LDR autour du panneau	55
4.4.1 Test des LDR	56
4.5 Test du bon fonctionnement des deux moteurs.....	57
4.6 Principe de fonctionnement du prototype réalisé.....	59

4.7 Mesures expérimentales du panneau en mode fixe.....	59
4.7.1 Orientation du panneau solaire	59
4.7.2 Expérience de sélection de direction	60
4.8 Analyse et discussion des résultats	63
4.9 Difficultés rencontrées	63
4.10 Solutions proposées	63
4.11 conclusion.....	64
Conclusion générale	65
Quelques perspectives	65
BIBLIOGRAPHIE	66

Nomenclatures

δ : La déclinaison solaire

PV : photo voltaïque

DC/CC : courant continu

AC/CA : courant alternatif

KWc : kilowatt-crête

PMDC : Les moteur DC a aiment permanent

BLDC : Les moteur à courant continu sans balais

OEM : Original Equipment Manufacturer

ODM : Original Design Manufacturer

PM : à aimant permanent

VR : Variable Reluctance

NEMA : National Electrical Manufacturers Association

MLI : La modulation de largeur d'impulsions

LDR : Light Dependent Resistor

SPDT : Single Pole Double Throw

NO : Normally Open

NC : Normally Closed

COM : Common

V : Volt.

A : Ampère

P : puissance

Pmec : puissance mecanique

Vcc : Tension à courant Continu

MCC : moteur a courant continue

R : résistance de l'induit (Ω)

L : inductance (H)

E : force contre-électromotrice

J : moment d'inertie

Cm : couple moteur

Nomenclatures

C_r : couple résistant (charge)

F : coefficient de frottement visqueux

Ω : vitesse angulaire

Liste des figures

Chapitre1

Figure 1.1 Mouvement de la terre autour du Soleil.

Fig.1.2.a Système photovoltaïque

Figure. 1.2.b Système photovoltaïque plus détaillé

Figure.1.3 Schéma d'un système autonome (hors-réseau).

Figure 1.4.a Injection partielle

Figure. 1.4.b Injection totale

Figure 1.5 Modèle d'un héliostat dans ses Premières utilisations

Figure. 1.6 Types de suiveurs solaires

Figure.1.7 Suiveur solaire passif

Figure. 1.8 Suiveur solaire mono axial

Figure 1.9 Suiveur solaire bi-axial

Chapitre2

Figure 2.1 moteur PMDC

Figure 2.2 moteur pas à pas

Figure 2.3 un servomoteur

Chapitre3

Figure 3.1 Symbole et capteur LDR

Figure 3.2 : Circuit équivalent du capteur LDR utilisé

Figure 3.3 La carte Arduino Uno,

Figure 3. 4 Interface du logiciel de programmation Arduino IDE

Figure. 3.4 Organigramme représente les étapes de l'algorithme

Figure. 3.5 Câble USB type B (Arduino UNO)

Figure.3.6 Fils de pin d'arduino (Fils Dupont .Jumper wires)

Figure.3. 7 description module relais 2 canaux

Figure 3.8 Moteur à courant continu (essuie glasses)

Figure 3.9 Courant du moteur

Chapitre4

Figure 4.1 soudage des différentes parties du suiveur

Figure 4.2 boîtier de commande

Figure 4.2 installation des LDR

Figure 4.3 schémas électrique simplifier

Figure 4.4 code arduino pour test des LDR

Liste Des Figures Et Tableaux

Figure 4.5 valeurs analogiques des LDR exposé à la lumière

Figure 4.6 valeurs analogiques des LDR ombragée

Figure 4.7 alimentation du moteur à partir du relai

Figure 4.8 Aperçu du prototype

Figure 4.9 code utiliser pour tester les deux moteurs

Figure 4.10 Mesure au matin Midi et soir position est

Figure 4.10 Mesure au matin Midi et soir position est

Figure 4.12 Mesure au matin Midi et soir position ouest

Figure 4.12 Mesure au matin Midi et soir position ouest

Liste des tableaux

Tableau 1 : types de moteur pas à pas.

Tableau 2 : Les différentes dimensions du prototype

Tableau 3 : Caractérisation électrique du panneau solaire fixe

Tableau 4: Caractérisation électrique du panneau solaire en mode suiveur

Introduction General

Au cours des dernières décennies, le monde a connu une croissance importante de la demande énergétique à cause du développement industriel, technologique et de l'augmentation de la population. Cette forte consommation d'énergie a entraîné une exploitation excessive des ressources fossiles telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon. Cependant, ces ressources restent limitées et leur utilisation provoque de graves problèmes environnementaux, notamment la pollution atmosphérique et le réchauffement climatique. Face à cette situation, plusieurs pays se sont orientés vers les énergies renouvelables afin de garantir une production énergétique durable et respectueuse de l'environnement.

Parmi les différentes sources d'énergies renouvelables, l'énergie solaire représente l'une des solutions les plus prometteuses grâce à son abondance, sa disponibilité et son caractère propre. Les systèmes photovoltaïques permettent de convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide des panneaux solaires. Cette technologie connaît aujourd'hui un développement rapide dans plusieurs domaines tels que l'alimentation domestique, l'agriculture, l'éclairage public et les systèmes autonomes.[1]

Malgré leurs avantages, les panneaux photovoltaïques fixes présentent certaines limites liées principalement à leur orientation par rapport au soleil. En effet, la position du soleil change continuellement durant la journée ainsi qu'au cours des saisons, ce qui influence directement la quantité d'énergie captée par le panneau solaire. Lorsque le panneau reste fixe, il ne reçoit pas toujours les rayons solaires de manière optimale, ce qui réduit considérablement son rendement énergétique.[1]

Afin de résoudre ce problème et d'améliorer l'efficacité des installations photovoltaïques, les systèmes de suivi solaire ont été développés. Le principe de ces systèmes consiste à orienter automatiquement le panneau solaire vers la position du soleil afin de maximiser l'absorption du rayonnement solaire pendant toute la journée. Parmi les différents types de suiveurs solaires, le suiveur solaire à double axe offre de meilleures performances puisqu'il permet un mouvement suivant l'axe horizontal et l'axe vertical, assurant ainsi un suivi plus précis du soleil.

Dans le cadre de ce travail, nous proposons la conception et la réalisation d'un suiveur solaire à double axe commandé par une carte Arduino. Le système utilise des capteurs de luminosité de type LDR pour détecter l'intensité lumineuse et déterminer la direction du soleil. Les informations récupérées sont traitées par la carte Arduino qui commande des moteurs électriques afin d'orienter automatiquement le panneau solaire dans la direction optimale.

Le choix de la plateforme Arduino est motivé par sa simplicité de programmation, son faible coût et sa grande flexibilité dans les applications de commande automatique. De plus, l'utilisation de moteurs essuie-glace 12V permet d'obtenir un système mécanique robuste et accessible. Ce projet

visé donc à développer une solution automatique simple, économique et efficace capable d'augmenter le rendement énergétique d'un panneau photovoltaïque.

L'objectif principal de ce mémoire est d'améliorer les performances d'un système photovoltaïque à travers la conception d'un mécanisme de suivi solaire. Donc pour atteindre cet objectif, plusieurs étapes ont été réalisées, notamment l'étude théorique des systèmes photovoltaïques et des suiveurs solaires, le choix des composants électroniques et mécaniques, la conception du système de commande, la programmation de la carte Arduino, ainsi que la réalisation pratique et les tests expérimentaux du prototype.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Dont le premier chapitre sera consacré aux généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques. Le deuxième chapitre sera dédié à l'étude des systèmes de suivi solaire et particulièrement les suiveurs à double axe. L'étude et la conception du système proposé ainsi que la modélisation et les différents composants utilisés sera présenté dans le chapitre trois. Le quatrième chapitre traitera la réalisation pratique du prototype ainsi que les tests et les résultats., une conclusion générale ainsi que les perspectives d'amélioration du système réalisé seront évoqués à la fin de ce mémoire.

CHAPITRE **1**

GÉNÉRALITÉS SUR L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Introduction

L'expression « énergie solaire » est généralement associée aux méthodes qui permettent d'utiliser cette énergie. Situé à 146 millions km de la terre, le soleil est une source d'énergie extraordinairement puissante. Pour s'en faire une idée, il suffit de savoir que le soleil envoie 1.6 milliards de KW à la terre chaque année, [1]. 40% seulement de cette énergie atteignent effectivement la surface terrestre, le reste étant réfléchi par les couches supérieures de l'atmosphère ce pourcentage relativement faible. Le rayonnement du soleil commande la majeure partie des grands processus terrestres, notamment météorologique et biologiques. Il fournit ainsi 99.98 % de l'énergie nécessaire au fonctionnement climatique. C'est aussi directement ou indirectement à lui que l'ensemble des espèces végétales et animales doit la vie. Mais ce n'est pas tout : sa lumière peut aussi être transformée en électricité. Aujourd'hui, nous utilisons cette énergie de différentes manières. La lumière du soleil est en effet à la base de toutes les techniques de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables. L'une d'être elle transforme directement le rayonnement solaire en énergie électrique.

1.2 L'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables se positionnent comme une solution adéquate à l'épuisement des ressources d'énergies fossiles, et qui peut couvrir la demande mondiale de l'énergie électrique tout en préservant notre environnement. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux... On les qualifie d'énergies "flux", leurs exploitations n'engendrent pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir, [2].

De là, on peut distinguer plusieurs familles d'énergies renouvelables ainsi que les différentes technologies mises en œuvre pour bien les exploiter, dont la plus importante est l'énergie photovoltaïque, qui fera l'objet de notre étude.

1.3 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par la transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque ou plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée, [3]

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon, [4].

1.4 Mouvements de la terre autour du soleil

La trajectoire de la terre autour du Soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique, l'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre-Soleil ne varie que de $\pm 1.7\%$ par rapport à la distance moyenne. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut 23° , [5]

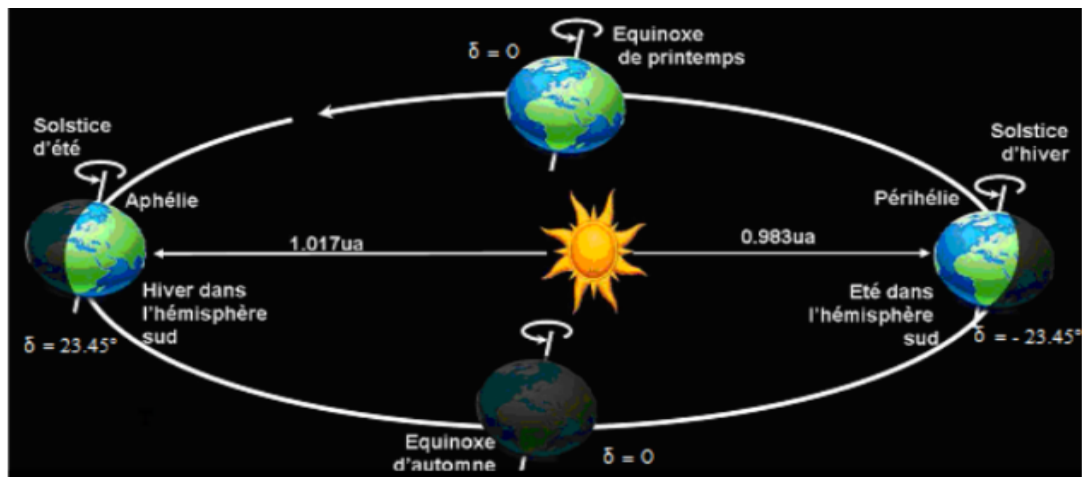


Figure 1.1 Mouvement de la terre autour du Soleil.

1.5 Déclinaison δ

Le plan de l'orbite terrestre autour du soleil s'appelle plan de l'écliptique. La Terre tourne elle-même autour de l'axe polaire, qui est incliné à $23,5^\circ$ par rapport à la perpendiculaire avec le plan de l'écliptique tout au long de l'année. La rotation de la terre autour de son axe provoque les variations diurnes du rayonnement. La position de l'axe par rapport au soleil est la cause des variations saisonnières du rayonnement solaire. L'angle entre la ligne qui relie les centres du soleil et de la Terre d'une part et le plan équatorial d'autre part change constamment. Cet angle est appelé déclinaison solaire. Pour le solstice d'hiver (22 décembre), il est de $+23,5^\circ$ alors que pour le solstice d'été (22 juin), la déclinaison est de $23,5^\circ$. [6]

$$\delta = 23.45 \sin[0.986 \times (284 + Nj)]$$

1.6 Systèmes photovoltaïques

Définition d'un système photovoltaïque (PV) Un système (photovoltaïque) PV est un ensemble d'éléments (constituants) de production d'électricité, en utilisant une source solaire. Ces constituants sont essentiellement le champ PV, le conditionnement de puissance, le système de stockage (dans un certain cas), et la charge (voir figure I.2a). Le conditionnement de puissance peut comprendre : un régulateur seul, un régulateur avec un convertisseur (DC /DC ou/et DC/ AC) ou un convertisseur seul. Un exemple d'un système plus détaillé est montré sur la Figure. I.2b.

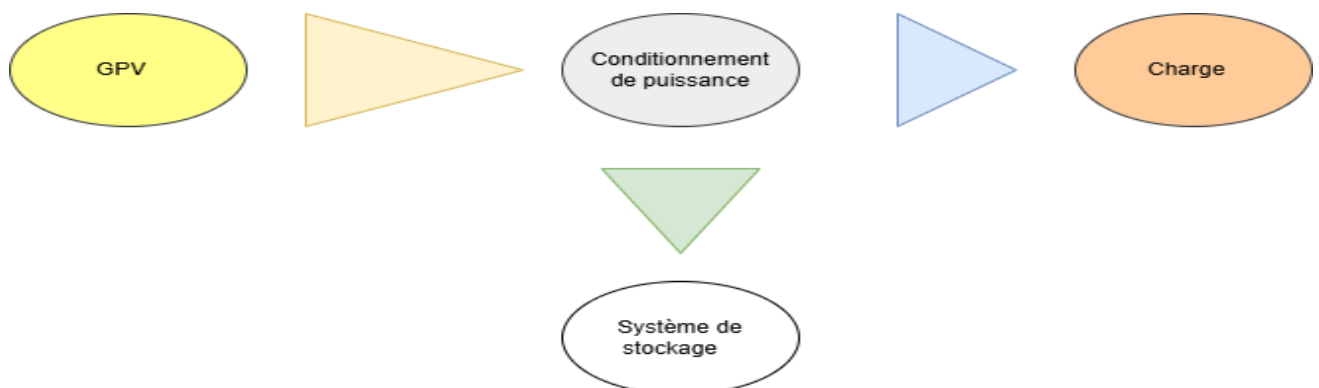


Fig.1.2.a Système photovoltaïque

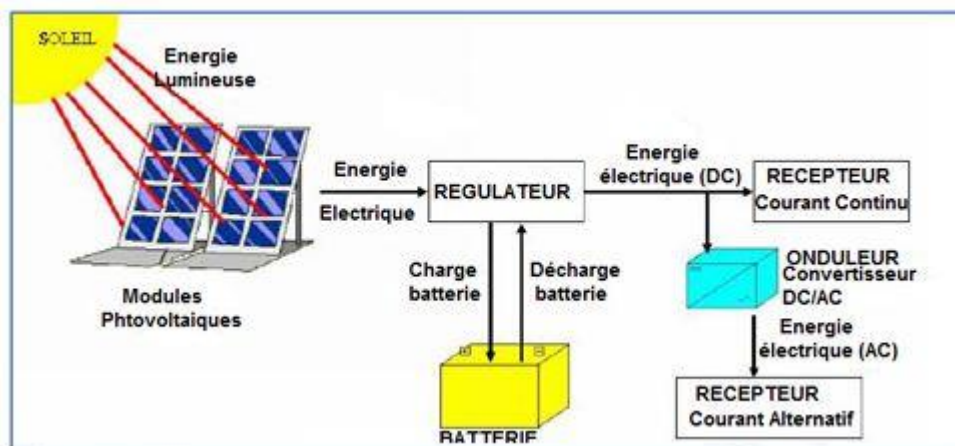


Figure. 1.2.b Système photovoltaïque plus détaillé

1.6.1 Classification des systèmes PV

On distingue deux types de systèmes PV : - Systèmes PV autonomes - Système à injection au réseau.

1.6.1.1 Systèmes autonomes

Définition

On dit qu'un système PV est autonome si la charge est passive (exemple : lampes, les moteurs, etc.). Le système PV autonome est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique (Figure.2.2a). Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries ou autres moyens de stockage pour une utilisation durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie solaire (par

exemple les périodes nocturnes, les périodes non ensoleillées). Les systèmes PV autonomes servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, en îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau (dans certains cas). En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. À l'heure actuelle, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique et où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement moins de 10 kWc) que l'énergie photovoltaïque est la plus concurrentielle.

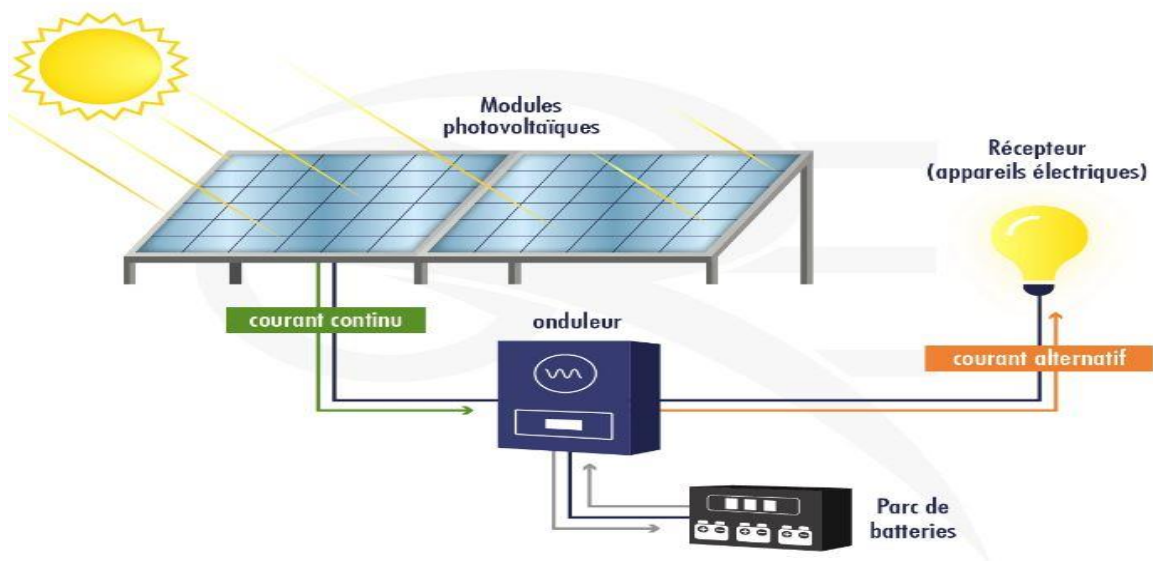


Figure.1.3 Schéma d'un système autonome (hors-réseau).

1.6.1.2 Systèmes PV à injection aux réseaux

Définition

Un système PV raccordé au réseau est un système dont la charge est partiellement ou totalement est le réseau électrique. Ç à d. le générateur PV injecte sa puissance à travers un onduleur dans le réseau électrique (Figure.1.4.a et Figure.1.4.b)

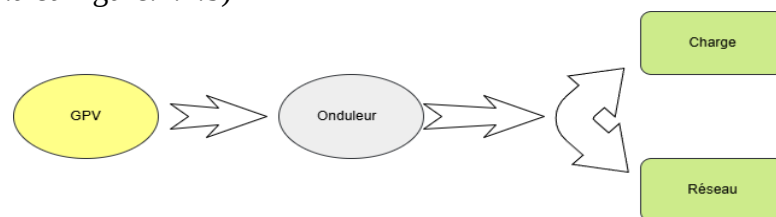


Figure 1.4.a Injection partielle

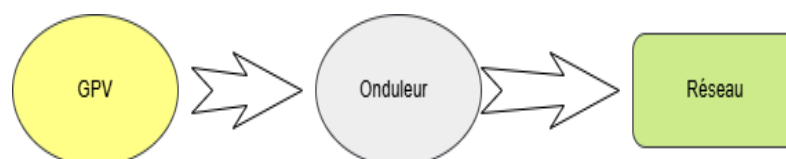


Figure. I.4.b Injection totale

1.7 Technique du suiveur solaire

Définition

Un traquer ou système de suivi solaire est un dispositif qui permet à un télescope solaire (qui surveille le soleil ou certains de ses effets sur l'atmosphère) ou à des centrales solaires de suivre le soleil en utilisant le principe de l'héliostat. La structure de support alimentée électriquement aligne les panneaux solaires pour augmenter la productivité. Car idéalement, le panneau PV devrait avoir un plan collecteur perpendiculaire au rayonnement solaire afin d'atteindre des performances maximales, [7]

1.7.1 Premières utilisations

Les premières utilisations de traqueurs à énergie solaire remontent aux années 1850. A cette époque, le principe reposait sur l'utilisation d'un pare-soleil. La rotation du miroir de l'héliostat est assurée par le mécanisme de l'horloge. La première mention du système était dans une publication en 1742 par le physicien hollandais Willem Jacob's Gravesande. [8]

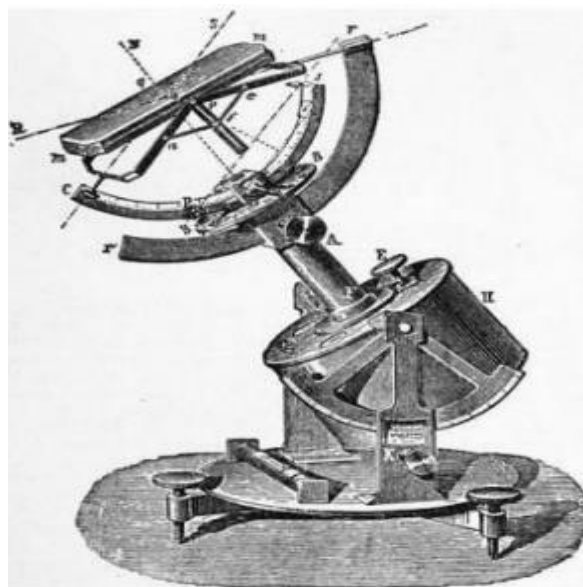


Figure 1.5 Modèle d'un héliostat dans ses Premières utilisations

Un champ d'héliostats repère le mouvement du soleil en convergeant les rayons lumineux vers un même point, concentrant ainsi la lumière incidente en employant des miroirs de réflexion tout au long de la journée. Ce dernier se rencontre dans diverses installations

1.8 Types de suiveurs solaires

On distingue principalement deux grandes familles de suiveurs solaires : Les passifs et les actifs qui comportent les suiveurs mono-axe et double axe

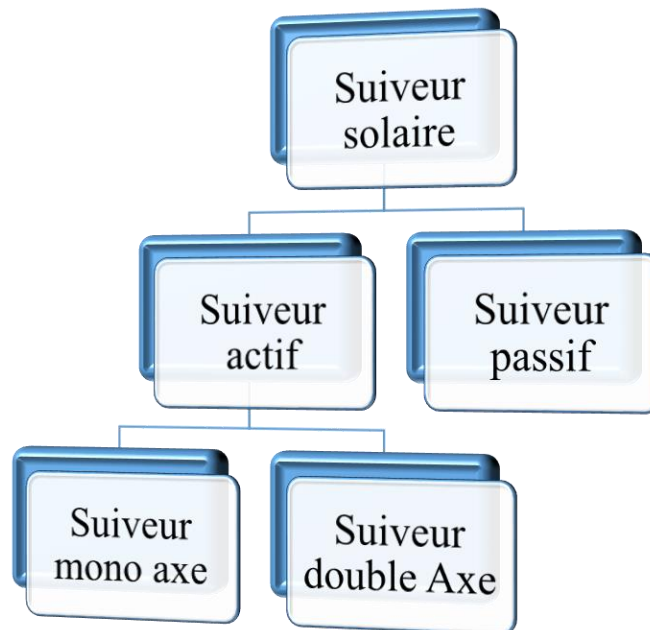


Figure. 1.6 Types de suiveurs solaires

I.8.1 Suiveurs solaire passif

Un suiveur solaire passif est constitué dans son architecture de deux tubes en cuivre montés sur les côtés Est et Ouest du capteur. Le tube de matière cuivre (**figure 1.7**) est rempli de fluides chimiques capables de se vaporiser à basse température. En effet, lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente, la température d'un côté du panneau augmente et le composé dans le tube en cuivre se vaporise. La partie gazeuse du composé occupe un plus grand volume interne, et sa partie liquide est décalée vers le côté ombragé. Cette opération de transfert de masse ajuste l'équilibre du capteur en le faisant tourner vers la source des rayons solaires. Ce type de suiveur ne consomme aucune énergie pour le repositionnement du panneau.

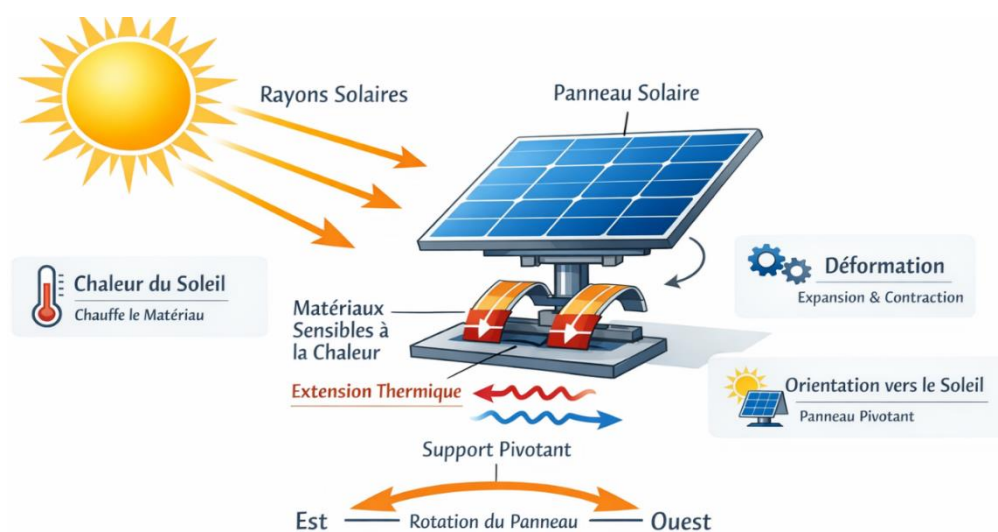


Figure.1.7 Suiveur solaire passif

1.8.2 Suiveur solaire actif

Les suiveurs solaires actifs utilisent le principe de la détection de lumière, suivant la trajectoire solaire en cherchant à optimiser au maximum l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface, il existe deux types dans cette famille : Les suiveurs mono-axe et double axe. L'avantage de ces derniers par rapports aux suiveurs passifs c'est qu'ils représentent une meilleure précision de suivi et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les ajuster.

1.8.3 Suiveur solaire mono-axe

Définition

un suiveur solaire mono axial est un dispositif sophistiqué conçu pour améliorer l'efficacité des systèmes solaires en orientant les panneaux solaires vers le soleil pendant son déplacement dans le ciel. Le fonctionnement de ces trackers implique une rotation autour d'un seul point pivot, ce qui permet aux panneaux solaires de maintenir une exposition optimale à la lumière du soleil tout au long de la journée. Cette technologie peut améliorer considérablement la capture d'énergie, permettant aux systèmes solaires de générer jusqu'à 25 % d'électricité en plus par rapport à leurs homologues fixes. En restant alignés avec le parcours du soleil, les trackers solaires monobrin optimisent la production photovoltaïque, les rendant ainsi un composant essentiel des installations solaires modernes. [9]

1.8.3.1 Mouvement de l'axe principal (Est à Ouest)

Le mouvement de l'axe principal d'un suiveur solaire mono axial est généralement orienté dans une direction est-ouest. Cet alignement permet aux panneaux de suivre la trajectoire naturelle du soleil, du lever au coucher, captant ainsi un maximum d'énergie solaire. Ce mouvement est habituellement assuré par des systèmes mécaniques tels que des engrenages ou des entraînements hydrauliques, conçus pour nécessiter une faible quantité d'énergie. Un réglage précis des trackers afin d'optimiser l'axe est-ouest peut entraîner des gains énergétiques importants. Des études ont démontré qu'un suivi efficace est-ouest peut accroître considérablement la production d'énergie dans les fermes solaires, améliorant ainsi l'efficacité globale des systèmes de production d'énergie solaire. Cet alignement s'avère particulièrement avantageux dans les grandes centrales solaires où la maximisation de la production énergétique est essentielle. [9]

1.8.3.2 Avantages des Trackers Solaires à Un Axe

➤ **Efficacité Énergétique Accrue (Gain de 10 à 25 %)**

Les trackers solaires mono-axe améliorent considérablement l'efficacité de la production d'énergie, permettant une augmentation allant jusqu'à 10 à 25 % par rapport aux systèmes solaires fixes. Cet avantage découle de leur capacité à ajuster continuellement l'angle des panneaux afin de s'aligner sur le parcours du soleil, maximisant ainsi l'exposition et la capture d'énergie. Le réalignement constant garantit des performances optimales tout

au long de la journée, les rendant particulièrement attrayants pour accroître la production d'énergie solaire. Ceux souhaitant optimiser la captation d'énergie solaire considèrent les trackers mono-axe comme inestimables, des études menées par des institutions en énergies renouvelables confirmant ces résultats supérieurs en termes d'efficacité. Les résultats de ces études motivent souvent leur adoption dans les grands projets solaires, où la maximisation de la production énergétique est cruciale.

➤ Rapport coût-efficacité vs. Systèmes bi-axiaux

Lorsque l'on compare les systèmes à un axe à leurs homologues à double axe, les premiers se distinguent généralement par leur coût plus abordable. Les systèmes à double axe, bien qu'offrant une meilleure capacité de mouvement et une efficacité accrue, entraînent des coûts d'installation et d'entretien plus élevés en raison de leur complexité. Les analyses des coûts sur le cycle de vie montrent que, même si les systèmes à double axe améliorent légèrement la production d'énergie, les économies financières liées à l'installation et à l'entretien des systèmes à un axe rendent ces derniers souvent préférables. Pour de nombreux projets, notamment les grandes centrales solaires, l'expertise penche généralement en faveur des systèmes à un axe afin d'optimiser le budget sans sacrifier trop d'efficacité. Ces systèmes offrent un bon équilibre entre performance et praticité, garantissant une large applicabilité et une viabilité financière. [9]

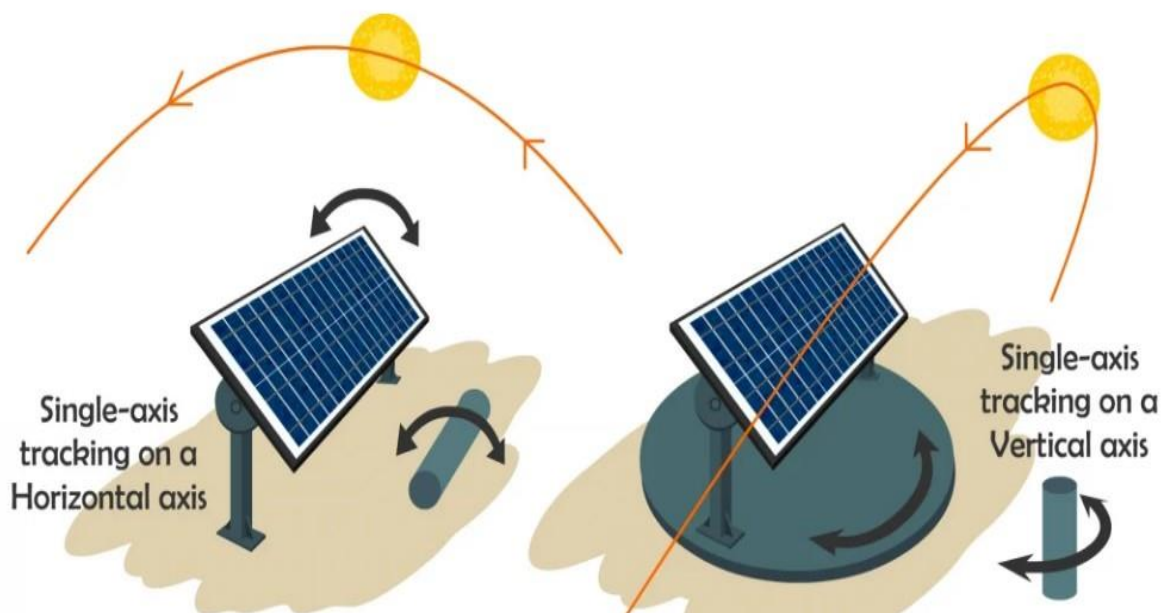


Figure. 1.8 Suiveur solaire mono axial

1.8.4 Suiveur solaire bi-axial

Contrairement au précédent, ce suiveur solaire possède deux axes ce qui lui permet de suivre les mouvements en azimut et en inclinaison au cours de la journée. Ainsi, le capteur reste constamment

orienté vers le soleil. Ce type de suiveur est très imposant et fournit de meilleures performances par rapport au suiveur mono-axe.

Un tracker biaxial optimise la production en continu :

- Il capte le maximum d'irradiation solaire toute la journée
- Il s'adapte aux variations saisonnières (angle du soleil change entre été et hiver)
- Il réduit les pertes dues à un mauvais angle d'incidence

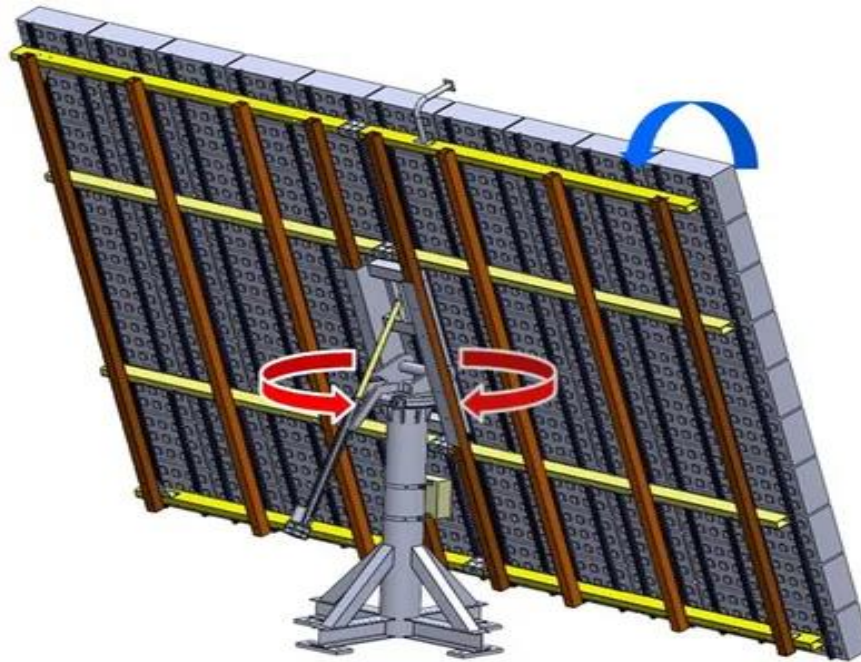


Figure I.9 Suiveur solaire bi-axial

1.8.4.1 Avantages et les inconvénients des trackers solaires à 2 axes

Avantages des trackers à deux axes

- Performance maximale (idéal pour zones très ensoleillées comme le sud de l'Algérie)
- Production plus stable sur toute l'année
- Meilleur rendement en matinée et fin de journée

Inconvénients (à ne pas ignorer)

- Coût plus élevé (achat + installation)
- Système plus complexe (2 moteurs, capteurs, contrôle)
- Maintenance plus fréquente
- Consommation électrique légèrement plus importante

1.9 Systèmes à un axe vs systèmes à double axe

1.9.1 Comparaison de l'efficacité et de la complexité

Les trackers solaires mono-axiaux offrent un équilibre harmonieux entre efficacité et simplicité de fonctionnement, tandis que les trackers bi-axiaux assurent un suivi premium du soleil avec une complexité accrue. Les systèmes mono-axiaux ajustent les panneaux tout au long de la journée,

captant ainsi le rayonnement solaire de manière efficace sans la complexité supplémentaire des mécanismes bi-axiaux. Des études comparatives montrent que, bien que les systèmes bi-axiaux produisent davantage d'énergie grâce à leur capacité à suivre le soleil sur plusieurs plans, ils entraînent également une complexité accrue qui peut rendre l'entretien plus difficile et augmenter les risques de défaillances techniques. Une analyse menée par des organismes de recherche énergétique suggère que les décideurs doivent prendre en compte à la fois les gains d'efficacité et les exigences d'entretien lorsqu'ils choisissent le système de suivi adapté à leurs projets d'énergie solaire.

1.9.2 Différences de coûts et d'entretien

Les systèmes à un axe offrent une solution plus rentable pour intégrer le suivi solaire, avec un investissement initial moindre et des coûts d'entretien réduits. En revanche, les trackers à deux axes nécessitent des investissements importants, non seulement pour l'achat mais aussi pour l'entretien continu. Des remplacements fréquents de composants et un service régulier peuvent entraîner des dépenses imprévues, affectant la rentabilité de l'utilisation de cette technologie à deux axes. Selon des modélisations financières effectuées par des analystes du secteur, ces éléments rendent souvent les trackers à un axe plus avantageux sur le long terme, en particulier lorsqu'on prévoit un budget pour des applications à grande échelle ou destinées au réseau électrique. Cette analyse indique que, bien que les systèmes à deux axes puissent promettre une production d'énergie supérieure, leurs coûts globaux et la complexité de leur entretien peuvent dans certains cas surpasser ces avantages. [9]

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales relatives aux énergies renouvelables, en mettant l'accent sur l'énergie solaire photovoltaïque comme source d'énergie propre et durable. Nous avons également étudié le mouvement de la Terre autour du Soleil ainsi que la déclinaison solaire, qui influencent directement la quantité d'énergie solaire reçue par les panneaux photovoltaïques.

Par ailleurs, nous avons abordé les différents systèmes photovoltaïques et leur classification, avant de présenter la technique du suivi solaire et les principaux types de suiveurs solaires. Enfin, une comparaison entre les systèmes à un axe et à double axe a permis de mettre en évidence les avantages du suivi solaire, notamment l'amélioration du rendement énergétique des installations photovoltaïques.

Ces connaissances constituent une base théorique essentielle pour la conception et la réalisation du système, après ces généralités en passe au deuxième chapitre qui sera dédié au suiveurs solaires à double axe.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DES SUIVEURS SOLAIRES A DOUBLE AXE

2.1 Introduction

Le suiveur solaire à double axe est un système permettant d'orienter automatiquement un panneau photovoltaïque afin qu'il reste perpendiculaire aux rayons du soleil tout au long de la journée et de l'année. Contrairement aux installations fixes, ce dispositif assure un suivi selon deux axes de rotation : l'axe horizontal (azimut) et l'axe vertical (élévation). Cette technologie permet d'augmenter la quantité de rayonnement solaire captée et d'améliorer ainsi la production d'énergie électrique des panneaux photovoltaïques. Le système est généralement constitué de capteurs de lumière, d'une unité de commande et de moteurs assurant le déplacement du panneau selon la position du soleil. Grâce à sa précision de suivi, le suiveur solaire à double axe représente l'une des solutions les plus efficaces pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques. [10]

2.2 Principe mécanique du suiveur double axe

Le suiveur solaire à double axe est un mécanisme permettant d'orienter un panneau photovoltaïque selon deux mouvements de rotation afin de suivre la position du soleil en temps réel. Son fonctionnement repose sur deux axes mécaniques indépendants : l'axe d'azimut, qui assure la rotation horizontale d'est en ouest pour suivre la course quotidienne du soleil, et l'axe d'élévation, qui permet l'inclinaison verticale du panneau afin de s'adapter aux variations de la hauteur du soleil au cours de la journée et des saisons.

La structure mécanique est généralement constituée d'un support fixe, d'un châssis mobile portant le panneau photovoltaïque, ainsi que de moteurs électriques et de systèmes de transmission (engrenages, vérins ou réducteurs) assurant les mouvements des deux axes. Les moteurs reçoivent les commandes d'un système de contrôle qui ajuste continuellement l'orientation du panneau afin de maintenir les rayons solaires perpendiculaires à sa surface. Cette configuration permet de maximiser l'énergie solaire captée et d'améliorer le rendement global de l'installation photovoltaïque. [11]

2.3 Suivi du soleil au cours de la journée et des saisons

La position du soleil varie continuellement en fonction de l'heure de la journée et de la période de l'année. Au cours de la journée, le soleil se déplace d'est en ouest, ce qui nécessite une rotation horizontale du panneau photovoltaïque afin de maintenir une orientation optimale vers les rayons solaires. En parallèle, la hauteur du soleil dans le ciel évolue entre le lever, le midi solaire et le coucher, nécessitant un ajustement de l'inclinaison du panneau.

Au cours des saisons, la trajectoire apparente du soleil change également. En été, le soleil atteint une hauteur plus importante dans le ciel, tandis qu'en hiver sa trajectoire est plus basse. Le suiveur solaire à double axe compense ces variations saisonnières grâce à son axe d'élévation, permettant au panneau de conserver une orientation perpendiculaire aux rayons solaires tout au long de l'année.

Ainsi, la combinaison des mouvements selon l'axe d'azimut et l'axe d'élévation permet un suivi précis de la position du soleil, maximisant la quantité d'énergie solaire captée par le panneau photovoltaïque. [12]

2.4 Structure mécanique générale

La structure mécanique d'un suiveur solaire à double axe est conçue pour supporter le panneau photovoltaïque et lui permettre d'effectuer des mouvements de rotation selon deux axes. Elle se compose généralement d'une base fixe assurant la stabilité de l'ensemble, d'un support rotatif permettant le mouvement horizontal (axe d'azimut) et d'un cadre mobile portant le panneau photovoltaïque pour le mouvement vertical (axe d'élévation).

Les mouvements sont assurés par des actionneurs mécaniques tels que des moteurs électriques, des vérins linéaires ou des systèmes à engrenages. Ces éléments transmettent le mouvement aux différentes parties mobiles de la structure afin d'orienter le panneau vers la position optimale du soleil. Des paliers et des articulations sont également utilisés pour réduire les frottements et garantir la fluidité des mouvements.

Cette configuration mécanique permet au panneau photovoltaïque de suivre la trajectoire du soleil tout au long de la journée et des saisons, améliorant ainsi l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. [13]

2.5 types de moteurs utilisés dans le système de suivi solaire

Il existe 3 types de moteur des systèmes de suivi solaire, notamment les moteurs à courant alternatif, à courant continu et à courant continu sans balais. Chacun présente ses avantages et ses inconvénients. [14].

2.5.1 Moteur à courant alternatif

Les moteurs à induction CA ont été largement utilisés dans les systèmes de suivi solaire dès les premiers stades du développement des équipements solaires. La tension d'alimentation du moteur CA est de 220 V. Cette tension permet d'obtenir de l'énergie directement du réseau sans batterie supplémentaire. C'est l'un de ses avantages. Cependant, leur contrôle est plus difficile que celui des autres moteurs. Dans les systèmes de suivi solaire, le contrôle du moteur est un facteur important. Le moteur CA réduit considérablement l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire. Par conséquent, il a progressivement disparu du marché grand public des systèmes de suivi solaire. [14]

2.5.2 Les moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu utilisés dans les systèmes de poursuite solaire sont principalement les moteurs PMDC (Permanent Magnet DC Motor) et les moteurs BLDC (Brushless DC Motor). Le moteur PMDC est le plus utilisé dans les petits suiveurs solaires grâce à sa simplicité, son faible coût et sa facilité de commande. Quant au moteur BLDC, il se distingue par son rendement élevé, sa longue durée de vie et sa faible maintenance, mais son système de commande est plus complexe.

Le choix du moteur dépend des exigences du système en termes de puissance, de précision de suivi et de coût. [14]

2.5.2.1 Les moteur DC a aimant permanent(PMDC)

Le design des moteurs PMDC est extrêmement simple. Cette simplicité les rend faciles à construire et faciles à entretenir. un moteur PMDC se compose de deux composants majeurs. Le rotor est la partie tournante et il contient un aimant permanent. Ils facilitent le fonctionnement du moteur en créant un champ magnétique. Le stator, qui est la partie fixe, a des fils connectés à une source d'alimentation, comme une batterie ou l'électricité provenant d'une prise murale. Ensemble, ces deux parties font tourner le moteur. [15]

2.5.2.1.1 Principes de construction et de fonctionnement

Le moteur PMDC est l'un des moteurs CC les plus simples. Il est composé de balais, d'un collecteur, d'un rotor et d'un stator. Le stator contient des aimants permanents qui produisent un champ magnétique constant, tandis que le rotor est équipé d'enroulements alimentés en courant continu (CC). Les balais alimentent les enroulements du rotor en courant, et le collecteur inverse le sens du courant pour assurer une rotation continue.

Un champ magnétique est produit lorsqu'une tension continue est appliquée, car le courant traverse les enroulements du rotor. Le rotor tourne sous l'effet du couple résultant de l'interaction du champ magnétique. [16]

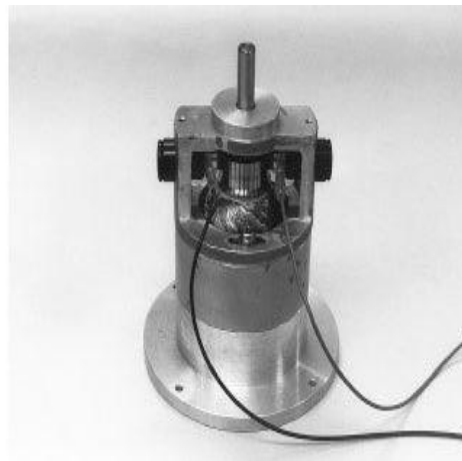


Figure 2.1 moteur PMDC

2.5.2.1.2 Types des moteur PMDC

➤ Moteur à encoches (Slotted Type)

Le moteur à encoches se caractérise par la présence de rainures dans l'induit (rotor), où sont placés les enroulements électriques. Il s'agit du type le plus répandu grâce à sa simplicité de fabrication, son coût relativement faible et sa capacité à fournir un couple élevé avec un bon rendement

➤ **Moteur sans encoches (Slotless Type)**

Dans ce type de moteur, le rotor ne possède pas de rainures. Les enroulements sont disposés directement autour du noyau magnétique. Cette conception réduit les ondulations du couple et les vibrations, ce qui permet d'obtenir une rotation plus fluide et plus précise.

➤ **Moteur sans noyau (Coreless Type)**

Le moteur sans noyau est caractérisé par l'absence de noyau ferromagnétique dans le rotor. Grâce à sa faible inertie, il offre une réponse rapide aux commandes et une grande précision de fonctionnement. Il est largement utilisé dans les applications nécessitant des mouvements rapides et précis, telles que les robots, les instruments médicaux et les systèmes de contrôle.

[17]

2.5.2.1.3 Avantages et inconvénients

➤ **Avantages :**

- Rendement élevé et faible consommation d'énergie.
- Faible entretien (hormis l'usure des balais).
- Régulation de vitesse fluide et fonctionnement précis.
- Idéal pour les petites applications portables où l'espace et la puissance sont limités.

➤ **Inconvénients :**

- Couple de démarrage limité par rapport aux moteurs à excitation série.
- Les performances diminuent sous forte charge ou en cas de variations soudaines de la demande.
- Les balais nécessitent un entretien et un remplacement périodiques, ce qui peut augmenter les coûts d'exploitation. [18]

2.5.2.2 Les moteur à courant continu sans balais (BLDC)

Les moteurs CC sans balais (BLDC) sont devenus la pierre angulaire de l'avancement de l'efficacité énergétique solaire. Contrairement aux moteurs à balais traditionnels, les moteurs BLDC éliminent l'usure associée aux balais, offrant ainsi une durabilité, une précision et une efficacité énergétique supérieures. Dans les systèmes de suivi de panneaux solaires, le choix d'un moteur BLDC peut avoir un impact significatif sur les performances globales, la longévité et la production d'énergie de l'installation. [19]

2.5.2.2.1 Types de moteurs BLDC utilisés dans les systèmes de suivi solaire

2.5.2.2.1.1 Moteurs BLDC à rotor interne

Le rotor est à l'intérieur du stator (conception classique).

➤ **Caractéristiques :**

- Bonne densité de puissance (couple élevé dans un petit volume)
- Mouvement fluide et précis

- Réponse rapide
- **Applications :**
- Petits systèmes de suivi solaire
- Trackers mono-axe
- Installations simples et compactes [19].

2.5.2.2.1.2 Moteurs BLDC à rotor externe

Le rotor est à l'extérieur et entoure le stator.

- **Caractéristiques :**
- Couple élevé à basse vitesse
- Bon pour entraînement direct sans engrenage
- Fonctionnement stable
- **Applications :**
- Grands trackers solaires
- Fermes solaires
- Systèmes robustes

2.5.2.2.1.3 Moteurs BLDC avec contrôleur intégré

Le moteur et le contrôleur sont dans un seul bloc.

- **Caractéristiques :**
- Installation facile et compacte
- Contrôle intelligent automatique
- Bonne fiabilité
- **Applications :**
- Trackers solaires automatisés
- Systèmes IoT solaires
- Installations intelligentes

2.5.2.2.1.4 Moteurs BLDC avec capteurs

Utilisent des capteurs (Hall ou encodeurs) pour connaître la position du rotor.

- **Caractéristiques :**
- Très précis
- Bonne stabilité même avec vent ou charge
- Ajustement automatique
- **Applications :**
- Trackers à haute précision
- Systèmes commerciaux
- Zones à conditions variables

2.5.2.2.1.5 Moteurs BLDC sans capteurs

La position du rotor est estimée sans capteurs.

➤ **Caractéristiques :**

- Moins cher et plus simple
- Moins d'entretien
- Câblage réduit

➤ **Applications :**

- Petits trackers
- Systèmes simples
- Installations isolées

2.5.2.2.1.6 Moteurs BLDC à couple élevé et basse vitesse

Conçus pour tourner lentement avec beaucoup de force.

➤ **Caractéristiques :**

- Fort couple à faible vitesse
- Pas besoin d'engrenage
- Bonne efficacité énergétique

➤ **Applications :**

- Grandes fermes solaires
- Trackers précis à deux axes
- Environnements difficiles

Les systèmes de suivi des panneaux solaires sont conçus pour maximiser l'exposition des panneaux photovoltaïques à la lumière du soleil tout au long de la journée. Ceci est réalisé grâce à des mécanismes de suivi à un ou deux axes, qui nécessitent un contrôle moteur précis et fiable. Les moteurs BLDC offrent le couple élevé, une maintenance réduite et un contrôle précis de la vitesse nécessaires pour un fonctionnement continu dans les environnements extérieurs.

L'efficacité d'un tracker solaire est directement liée à la capacité du moteur à répondre aux données de position solaire en temps réel. Les moteurs BLDC offrent les performances dynamiques nécessaires à des ajustements de position rapides, garantissant que les panneaux sont toujours orientés de manière optimale pour capter un maximum de lumière solaire. [19]

2.5.3 Moteurs pas à pas

Un moteur pas à pas convertit les impulsions électriques en mouvement incrémentiel précis grâce à l'excitation contrôlée de la bobine pour un positionnement précis, et les moteurs pas à pas personnalisés OEM/ODM offrent des conceptions sur mesure (par exemple, arbres, boîtiers, boîtes de vitesses, encodeurs) qui optimisent les performances, l'intégration et la fiabilité pour des applications industrielles spécifiques.

Un moteur pas à pas fonctionne en convertissant les impulsions électriques en un mouvement mécanique précis et incrémentiel. Au lieu de tourner librement comme un moteur à courant continu standard, il tourne selon des angles de pas fixes, se déplaçant d'un « pas » à la fois. Chaque étape est créée lorsque les bobines internes du moteur sont alimentées dans une séquence contrôlée, produisant un champ magnétique rotatif qui tire le rotor vers la position stable suivante.

Ce concept simple est la raison pour laquelle les moteurs pas à pas sont largement utilisés dans d'automatisation, , les machines CNC , les imprimantes 3D, , de dispositifs médicaux , les systèmes d'emballage et les applications de positionnement de précision.[20]



Figure 2.2 moteur pas à pas

➤ **Avantages :**

- Très bonne précision de positionnement.
- Contrôle simple de la position.
- Répétabilité élevée.
- Fonctionnement sans capteur dans certaines applications.

➤ **Inconvénients :**

- Consommation énergétique relativement élevée.
- Couple réduit à grande vitesse.
- Risque de perte de pas sous forte charge.

Tableau 1 types de moteur pas à pas

type de moteur pas à pas	Pour	Les avantages
Moteur pas à pas hybride	La plupart des modèles de trackers solaires	Couple élevé, précision, durabilité
Moteur pas à pas PM	Trackers légers ou portables	Faible coût, économe en énergie
Moteur pas à pas VR	Systèmes de base à faible couple	Simple, économique
Moteur pas à pas en boucle fermée	Applications de haute précision ou à vent fort	Contrôle des commentaires, aucune étape manquée
Moteur pas à pas intégré	Grandes fermes et installation facile	Electronique tout-en-un, fiabilité
Moteurs NEMA à couple élevé	Structures photovoltaïques lourdes	Couple et stabilité robustes

2.5.4 Les servomoteurs

Un servomoteur est un moteur hautement spécialisé conçu pour le contrôle précis de mouvements rotatifs ou linéaires. Il s'agit d'un moteur de rotation ou de translation qui utilise un mécanisme de retour d'information pour assurer un positionnement exact, généralement à l'aide d'un signal de commande qui dicte le mouvement du moteur jusqu'à la position souhaitée. Ce mécanisme permet un contrôle précis de divers composants, ce qui rend les servomoteurs indispensables dans les applications nécessitant un positionnement précis et des mouvements fluides. [21]

**Figure 2.3** un servomoteur

2.5.4.1 les origines des servomoteurs

Le concept de servomoteur remonte au début du XXe siècle et a évolué à travers plusieurs étapes innovantes pour devenir un élément essentiel de l'ingénierie moderne. Conçus à

l'origine pour des applications militaires et industrielles, les servomoteurs ont rapidement trouvé leur place dans divers secteurs grâce à leurs capacités de contrôle de précision. [21]

- 1920s: Introduction du terme "servo" pour décrire les systèmes de contrôle des mécanismes de direction des navires.
- 1930s: Développement des premiers systèmes d'asservissement pratiques pour le contrôle automatique des avions, en s'appuyant sur les mécanismes de rétroaction.
- 1950s: Les innovations en matière d'électronique et de théorie du contrôle ont permis la miniaturisation et la réduction des coûts des systèmes d'asservissement, élargissant ainsi leurs applications commerciales.
- 1960s: Le passage à l'électronique à semi-conducteurs a marqué une avancée significative dans la conception et la fonctionnalité des servomoteurs.
- 1982: Le brevet pour un système de contrôle numérique des servos (Brevet US4350959A), qui a permis d'améliorer la précision des servomoteurs dans la robotique et les machines à commande numérique.

2.5.4.2 Fonctionnement du servomoteur

Au cœur de chaque servomoteur se trouve sa capacité à contrôler avec précision la position de son arbre de sortie. Cette capacité est obtenue grâce à une interaction sophistiquée entre plusieurs composants clés du servomoteur : [21]

- Signal de contrôle: C'est le point de départ du fonctionnement du servomoteur. Il s'agit d'un signal électrique envoyé par le contrôleur, spécifiant la position ou le mouvement souhaité. Le signal est généralement une impulsion de largeur variable, appelée modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui code la position cible.
- Moteur et mécanisme d'engrenage : Une fois le signal de commande reçu, le circuit interne du servomoteur alimente le moteur pour qu'il se déplace vers la position souhaitée. Le moteur est souvent relié à un réducteur pour augmenter le couple et contrôler le mouvement précis et la vitesse de l'arbre de sortie.
- Système de retour d'information : Le système de retour d'information, qui surveille en permanence la position actuelle de l'arbre de sortie du moteur, fait partie intégrante de la précision du servo. Pour ce faire, on utilise généralement des capteurs tels que des potentiomètres ou des encodeurs.
- Correction des erreurs : La véritable magie se produit dans le circuit du contrôleur du servo. Il compare en permanence le signal de retour de la position actuelle du moteur au point de consigne (la position souhaitée à partir du signal de commande). En cas d'écart (signal d'erreur), le contrôleur ajuste la puissance délivrée au moteur, en

corrigeant la position jusqu'à ce que le signal de retour corresponde au point de consigne.

2.5.4.3 les avantages et les inconvénients

➤ **Avantages**

- Haute efficacité énergétique
- Grande précision de contrôle
- Puissance élevée dans un format compact
- Réponse rapide
- Faible maintenance
- Compatibilité avec les systèmes avancés
- Couple élevé à basse vitesse
- Faible production de chaleur

➤ **Inconvénients**

- Coût initial plus élevé
- Complexité de la mise en place et du réglage
- Sensibilité à l'environnement
- Bruit Nécessité de dispositifs de rétroaction précis

2.6 Contraintes mécaniques du suiveur solaire

La conception d'un suiveur solaire à double axe doit prendre en compte plusieurs contraintes mécaniques afin d'assurer la fiabilité, la stabilité et la durabilité du système en conditions réelles d'exploitation.

2.6.1 Poids du panneau photovoltaïque

Le poids du panneau constitue la charge principale supportée par la structure. Il influence directement le dimensionnement des supports, des axes de rotation et des actionneurs. Une structure insuffisamment dimensionnée peut entraîner des déformations mécaniques, une usure prématurée des composants ou un déséquilibre du système.

2.6.2 Effets du vent

Le vent représente une contrainte dynamique importante, surtout pour les panneaux installés en hauteur ou en milieu ouvert. La force du vent exerce une pression sur la surface du panneau, générant des moments mécaniques élevés autour des axes de rotation. Dans certains cas extrêmes, cela peut provoquer des vibrations, une instabilité ou même un basculement de la structure. Il est donc nécessaire de prévoir un dimensionnement adapté ainsi que des systèmes de protection ou de mise en position de sécurité.

2.6.3 Résistance de la structure

La structure mécanique doit être suffisamment rigide pour supporter les efforts statiques et dynamiques sans déformation excessive. L'utilisation de matériaux appropriés (acier, aluminium) et un bon choix de géométrie permettent d'augmenter la résistance globale tout en limitant le poids total du système.

2.6.4 Stabilité mécanique

La stabilité du système est essentielle pour garantir un suivi précis du soleil. Le centre de gravité doit être correctement positionné afin d'éviter les déséquilibres lors des mouvements. Une mauvaise stabilité peut entraîner des oscillations, une perte de précision ou des contraintes supplémentaires sur les actionneurs.

2.6.5 Couple nécessaire au déplacement

Le couple requis pour déplacer le panneau dépend du poids, de la surface exposée au vent et des frottements mécaniques des articulations. Les actionneurs doivent être capables de fournir un couple suffisant pour assurer le mouvement dans toutes les conditions de fonctionnement. Une sous-estimation de ce couple peut entraîner un blocage du système ou une perte de performance du suivi solaire. [22]

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents aspects liés au suiveur solaire à double axe. Nous avons d'abord expliqué son principe de fonctionnement basé sur l'orientation du panneau photovoltaïque selon deux axes afin de suivre la position du soleil. Ensuite, la structure mécanique générale a été détaillée, mettant en évidence les éléments principaux tels que la base, les axes de rotation et les systèmes d'actionnement.

Nous avons également étudié les différents systèmes de transmission du mouvement, notamment les engrenages, la vis sans fin, la chaîne et les pignons, les courroies ainsi que les vérins électriques, en soulignant leurs avantages et leurs domaines d'utilisation. Par la suite, les principaux actionneurs utilisés dans les systèmes de suivi solaire ont été présentés, avec une comparaison entre les moteurs à courant continu, les moteurs pas à pas, les servomoteurs et les vérins électriques.

Enfin, les contraintes mécaniques influençant la conception du système ont été analysées, notamment le poids du panneau, les effets du vent, la résistance de la structure, la stabilité mécanique et le couple nécessaire au déplacement.

Ainsi, ce chapitre permet de poser les bases théoriques et mécaniques indispensables à la conception et à la réalisation d'un suiveur solaire à double axe performant et fiable.

CHAPITRE 3

CONCEPTION ET MODELISATION DU SUIVEUR SOLAIRE

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la conception et la modélisation du système de suivi solaire à double axe réalisé dans le cadre de ce projet. Cette étape constitue une phase essentielle, car elle permet de définir l'architecture générale du système ainsi que les différents composants nécessaires à son fonctionnement.

Dans un premier temps, nous présenterons la conception du système en décrivant les différents éléments matériels utilisés, notamment les capteurs LDR, la carte Arduino, les moteurs à courant continu et les modules de commande. Le choix de ces composants sera également justifié en fonction des besoins du suiveur.

Dans un second temps, nous aborderons la modélisation des différentes parties du système. Cette modélisation concerne les capteurs LDR utilisés pour la détection de la position du soleil ainsi que le moteur à courant continu chargé d'assurer le déplacement du panneau solaire. Elle permet de mieux comprendre le comportement du système et d'établir les relations entre les grandeurs électriques et mécaniques.

Enfin, nous présenterons le dimensionnement mécanique de la structure, des axes de rotation et du système de transmission afin de garantir un fonctionnement fiable et stable du suiveur solaire.

Ce chapitre constitue ainsi une étape fondamentale dans le développement du prototype, puisqu'il permet de passer de l'étude théorique à la préparation de la réalisation pratique du système.

3.2 Description mécanique du suiveur double axe réalisé

Le suiveur solaire réalisé dans ce projet est un système de suivi à double axe conçu pour orienter un panneau photovoltaïque en fonction de la position du soleil. La structure repose sur une base métallique fixe assurant la stabilité globale de l'ensemble et supportant les différents éléments mécaniques et électroniques.

Le mouvement du système est assuré par deux mécanismes principaux. Le premier axe permet la rotation horizontale afin de suivre le déplacement du soleil de l'est vers l'ouest. Ce mouvement est réalisé à l'aide d'un moteur à courant continu de type moteur d'essuie-glace de 12V, associé à un système de transmission mécanique. Vis –écrou. La rotation du système est basée sur un seul roulement. Le moteur est fixe sur un support vertical (tube métallique).

Le deuxième axe permet l'inclinaison verticale du panneau photovoltaïque (déplacement du soleil du nord au sud). Ce mouvement est obtenu grâce à un système de type vérin linéaire composé d'un moteur DC entraînant une tige filetée. La rotation du moteur est transformée en un déplacement linéaire permettant de lever ou d'abaisser le panneau selon la position du soleil. Le moteur de cette partie est fixé dans la partie mobile du système.

Quatre LDR ont été fixées sur les côtés du panneau solaire, et leurs fils ont été acheminés directement vers le boîtier de commande.

L'ensemble du système est commandé par une unité de contrôle (Arduino) qui traite les informations provenant des capteurs de lumière (LDR) et commande les moteurs afin d'ajuster en temps réel l'orientation du panneau. Cette configuration permet d'obtenir un suivi automatique simple, économique et efficace.

La structure mécanique a été conçue pour résister au poids du panneau ainsi qu'aux efforts externes comme le vent. Des éléments de fixation et de support ont été intégrés afin d'assurer la stabilité et la fiabilité du système durant son fonctionnement.

Ainsi, ce suiveur solaire combine un système mécanique simple et des composants électroniques accessibles,

Dans la partie inférieure, un boîtier d'alimentation a été installé. Il contient deux batteries de 6 V connectées en série afin d'obtenir une tension de 12 V. L'alimentation est équipée d'un interrupteur marche/arrêt, suivi d'un fusible de protection de 10 A. Un système de charge a également été intégré, permettant de convertir le 220 V alternatif en 12 V continu afin de recharger les batteries. Le système de commande est assuré par une carte Arduino, qui constitue le cœur du contrôle du suiveur solaire. Enfin, un module relais a été installé pour la commande des actionneurs, en attente de l'ajout d'un second relais.

3.3 Choix des moteurs DC pour chaque axe

Les moteurs à courant continu (DC) ont été retenus pour la réalisation du système de suivi solaire en raison de leurs caractéristiques adaptées aux applications simples de positionnement. Ils présentent une structure robuste, un coût relativement faible et une facilité d'intégration avec des systèmes de commande comme l'Arduino. Dans ce mémoire, deux moteurs DC sont utilisés, chacun dédié à un axe différent : un moteur pour l'axe horizontal (azimut) et un autre pour l'axe vertical (élévation). Cette configuration permet un contrôle indépendant de chaque mouvement du panneau solaire.

Le choix des moteurs DC est également justifié par leur capacité à fournir un couple suffisant à basse vitesse, ce qui est essentiel pour assurer un mouvement progressif et stable du panneau. De plus, leur commande est simplifiée grâce à l'utilisation de modules relais, permettant d'inverser le sens de rotation en fonction des signaux envoyés par la carte Arduino. Ainsi, le système peut ajuster automatiquement la position du panneau solaire en fonction de l'intensité lumineuse détectée par les capteurs LDR

3.4 Capteurs et acquisition de données

Le système d'acquisition de données repose principalement sur l'utilisation de capteurs de lumière de type LDR (Light Dependent Resistor). Ces capteurs ont pour rôle de mesurer l'intensité lumineuse reçue sur différentes zones du panneau solaire afin de déterminer la direction de la source lumineuse. Dans ce projet, quatre LDR sont placés aux extrémités du panneau solaire (haut, bas, gauche et droite), ce qui permet une détection précise des variations de lumière selon l'orientation du soleil. [23]

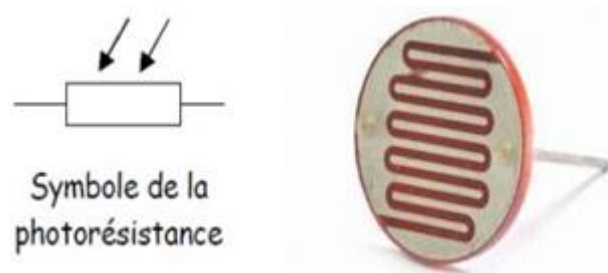


Figure 3.1 Symbole et capteur LDR

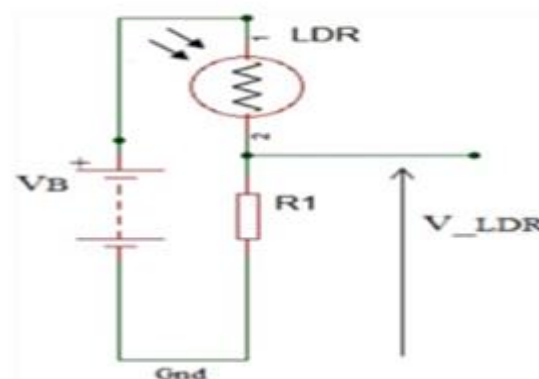


Figure 3.2 : Circuit équivalent du capteur LDR utilisé

Le principe de fonctionnement des LDR repose sur la variation de leur résistance en fonction de l'intensité lumineuse : plus la lumière est forte, plus la résistance diminue. Ces variations de résistance sont converties en signaux électriques analogiques.

Les données issues des LDR sont ensuite lues par la carte Arduino via ses entrées analogiques. L'Arduino compare en permanence les valeurs reçues afin de détecter la différence d'éclairement entre les capteurs. En fonction de ces différences, il génère des signaux de commande destinés au système d'actionnement (moteurs DC via relais), permettant ainsi d'ajuster automatiquement l'orientation du panneau solaire pour maximiser l'exposition à la lumière.

Des résistances ont été ajoutées au circuit associé aux LDR afin de former des diviseurs de tension. Chaque LDR est couplé à une résistance fixe, ce qui permet de convertir les variations de résistance dues à la lumière en variations de tension lisibles par la carte Arduino. Ce montage en pont diviseur assure une meilleure stabilité des mesures et améliore la précision de l'acquisition des données.

L'utilisation de quatre résistances, une pour chaque capteur, permet d'obtenir des signaux indépendants et fiables pour chaque direction du panneau solaire. [23]

3.4.1 Caractéristiques

La résistance photosensible est la résistance d'un matériau semi-conducteur, la variation de conductivité avec l'intensité lumineuse varie. L'utilisation de cette fonction fonctionnera avec différentes formes et zones de réception de lumière de la résistance photosensible. La photorésistance est largement utilisée dans les jouets, les lampes, les caméras et autres industries.

- Modèle : GL5528
- Tension maximale : 150V, DC
- Puissance maximale : 100mW
- Température de fonctionnement : -30 ° C ~ 70 ° C
- Pic spectral : 540nm
- Résistance lumineuse (10Lux) ($K\Omega$) : 10 – 20
- Résistance foncée : 1 $M\Omega$
- Temps de réponse : 20ms (Rise), 30ms (Down) (Justification du choix : faible cout, disponibilité) [23]

3.5 Circuit de commande

Le circuit de commande de notre système est basé complètement sur un circuit programmable dit Arduino, l'avantage de ce dernier est de minimiser la surface des cartes électroniques donc on minimise l'utilisation des quantités des composants électroniques [24]

3.5.1 Description de l'Arduino

Une carte Arduino est un type de kit basé sur un microcontrôleur. La première technologie Arduino a été développée en 2005 par David Cuartielles et Massimo Banzi. Les concepteurs ont pensé à fournir une carte facile et peu coûteuse pour les étudiants, les amateurs et les professionnels pour construire des appareils. La carte Arduino peut être achetée auprès du vendeur ou directement, nous pouvons la fabriquer à la maison en utilisant divers composants de base. Les meilleurs exemples d'Arduino pour les débutants et les amateurs comprennent les détecteurs de moteur et les thermostats, ainsi que les robots simples. En 2011, Adafruit Industries s'attendait à ce que plus de 3 lakhs de cartes Arduino aient été produites. Mais, 7 lakhs de cartes étaient entre les mains des utilisateurs en 2013. La technologie Arduino est utilisée dans de nombreux appareils d'exploitation comme la communication ou le contrôle. Un exemple typique de la carte Arduino est l'Arduino Uno. Il comprend un microcontrôleur ATmega328 et il a 28 broches

Dans notre projet en a utilisé la carte arduino UNO.

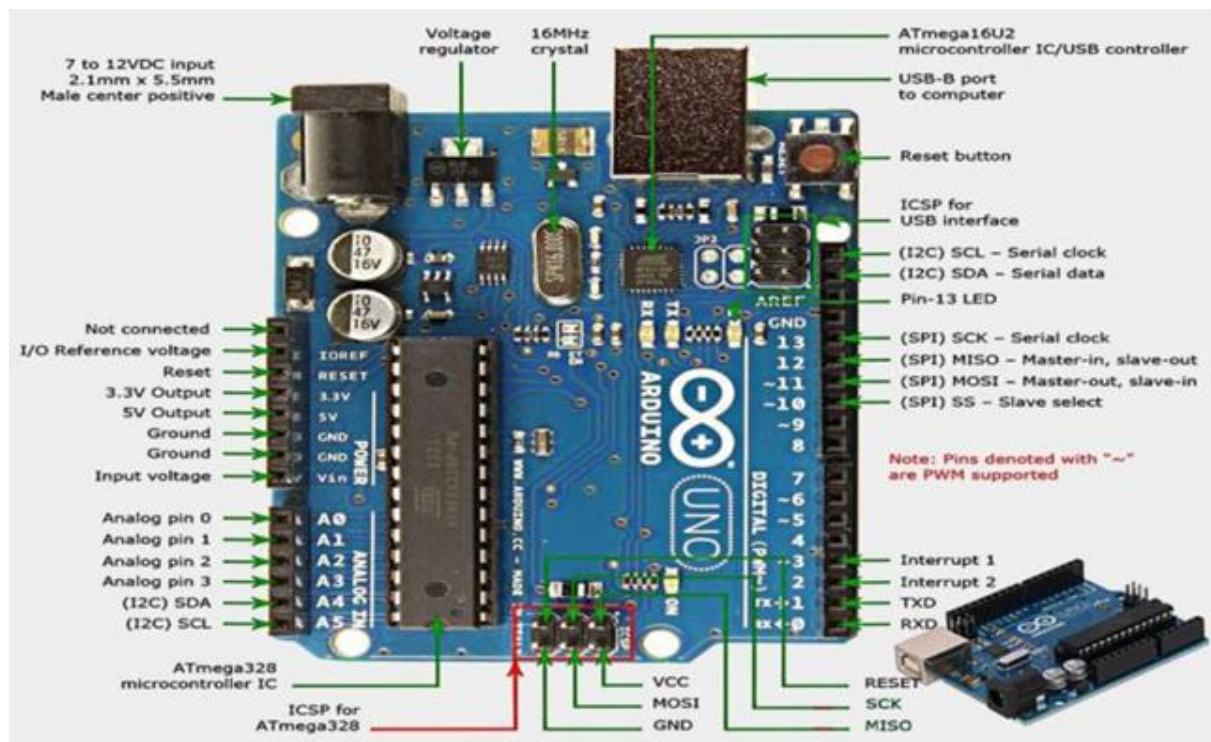


Figure 3.3 La carte Arduino Uno,

La carte Arduino Uno est une plateforme de prototypage basée sur le microcontrôleur ATmega328P. Elle se compose de 14 broches d'E/S numériques, dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM (3, 5, 6, 9, 10 et 11), ainsi que de 6 entrées analogiques (A0 à A5). Elle dispose également d'une connexion USB, d'une prise d'alimentation externe, d'un oscillateur à quartz de 16 MHz, d'un bouton de réinitialisation et d'un connecteur ICSP.

La carte Arduino Uno peut être alimentée soit via un port USB relié à un ordinateur, soit par une source d'alimentation externe telle qu'une batterie ou un adaptateur secteur, avec une tension recommandée comprise entre 7 et 12 V.

Les broches numériques peuvent fonctionner en entrée ou en sortie avec un courant maximal d'environ 40 mA par broche. Les broches 0 et 1 sont utilisées pour la communication série (RX et TX). Les broches 2 et 3 peuvent être utilisées comme interruptions externes. La broche 13 est reliée à une LED intégrée sur la carte.

Les entrées analogiques offrent une résolution de 10 bits, permettant de convertir une tension analogique en une valeur numérique comprise entre 0 et 1023. La broche AREF permet de définir une tension de référence pour les conversions analogiques.

Le microcontrôleur ATmega328P possède 32 Ko de mémoire Flash pour le programme, 2 Ko de SRAM pour les données et 1 Ko d'EEPROM pour le stockage permanent. Il fonctionne avec une fréquence d'horloge de 16 MHz. [25].

L'architecture de la carte Arduino Uno est de type Harvard, ce qui signifie que la mémoire programme et la mémoire de données sont séparés. Le code est stocké dans la mémoire Flash tandis que les données sont traitées dans la SRAM.

3.5.2 Programmation

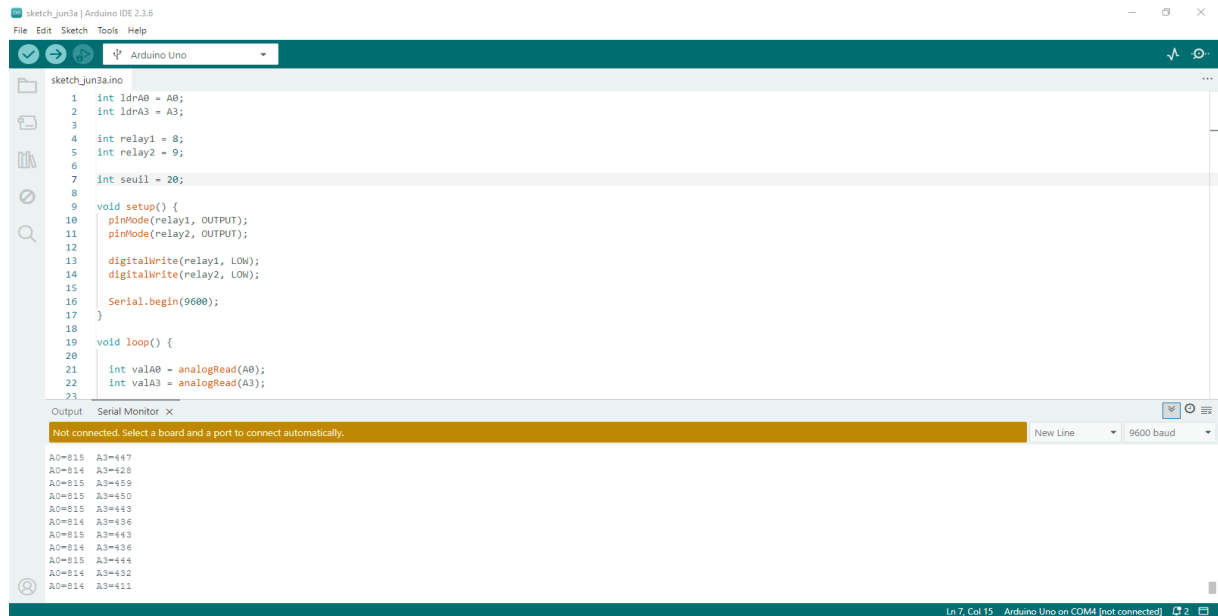


Figure 3. 4 Interface du logiciel de programmation Arduino IDE.

La programmation dans la carte Arduino est appelée croquis. Chaque croquis contient trois parties telles que la déclaration des variables, l'initialisation et le code de contrôle. Où, l'initialisation est écrite dans la fonction de configuration et le code de contrôle est écrit dans la fonction de boucle. Le croquis est enregistré avec uno et toute opération comme l'ouverture d'un croquis, la vérification et l'enregistrement peut être effectuée à l'aide du menu d'outils. Le croquis doit être stocké dans le répertoire du carnet de croquis. Sélectionnez la carte appropriée dans le menu Outils et le port série dans le menu Outils. Sélectionnez le menu des outils et cliquez sur le bouton de téléchargement, puis le chargeur de démarrage télécharge le code sur le microcontrôleur.

3.5.2.1 Fonctions de base de la technologie Arduino

La broche de lecture numérique lit la valeur numérique de la broche donnée. La broche d'écriture numérique est utilisée pour écrire la valeur numérique de la broche donnée. La broche de mode de broche est utilisée pour régler la broche en mode E/S. La broche de lecture analogique lit et renvoie une valeur comprise entre 0 et 1023. La broche d'écriture analogique écrit une valeur PWM sur la broche.

3.5.2.2 Avantages de la technologie Arduino

- Il est bon marché.
- Il est livré avec une fonction matérielle open source qui permet aux utilisateurs de développer leur propre kit.

- Le logiciel de l'Arduino est bien adapté à tous les types de systèmes d'exploitation comme Linux, Windows et Macintosh, etc.
- Il est également livré avec une fonction de système logiciel open source qui permet aux développeurs d'utiliser le code Arduino pour fusionner avec les bibliothèques de langages de programmation en vigueur et peut être étendu et modifié.
- Pour les débutants, il est très simple à utiliser.

3.5.2.3 Applications de la technologie Arduino

Le robot d'évitement d'obstacles exploité avec Arduino. Le concept principal de ce projet est de concevoir un robot utilisant des capteurs à ultrasons pour éviter les obstacles. Un robot est une machine et c'est une combinaison d'instructions de programmes et de moteurs. Il peut effectuer certaines tâches avec des conseils ou automatiquement. Ce véhicule robotique est contrôlé par un microcontrôleur de la famille Atmel des cartes Arduino. Lorsqu'un obstacle se présente devant lui, il se guide lui-même et change de direction. [26]

3.6 Algorithme de contrôle

Le principe de commande repose sur la comparaison des niveaux d'éclairement mesurés par les quatre capteurs LDR. Les capteurs sont répartis en deux groupes correspondant aux deux axes de rotation du panneau.

Dans un premier temps, l'Arduino effectue la lecture des valeurs fournies par les capteurs. Ensuite, il compare les valeurs des capteurs placés à droite et à gauche afin de déterminer le sens de déplacement sur l'axe horizontal. Une comparaison similaire est réalisée entre les capteurs supérieurs et inférieurs pour contrôler l'axe vertical.

Lorsque la différence entre deux capteurs opposés dépasse un seuil prédéfini, l'Arduino active le moteur correspondant à travers le module relais afin d'orienter le panneau vers la zone recevant le maximum de rayonnement solaire. Lorsque les valeurs des capteurs deviennent pratiquement égales, les moteurs sont arrêtés et le panneau conserve sa position optimale.

Ce processus est exécuté de manière continue, permettant au panneau photovoltaïque de suivre automatiquement le déplacement apparent du soleil tout au long de la journée et d'améliorer ainsi le rendement énergétique du système.

3.6.1 Étapes de l'algorithme :

L'algorithme de commande du suiveur solaire repose sur la comparaison des valeurs fournies par les capteurs LDR afin d'orienter automatiquement le panneau solaire vers la direction où l'éclairement est maximal. Les principales étapes de l'algorithme sont les suivantes :

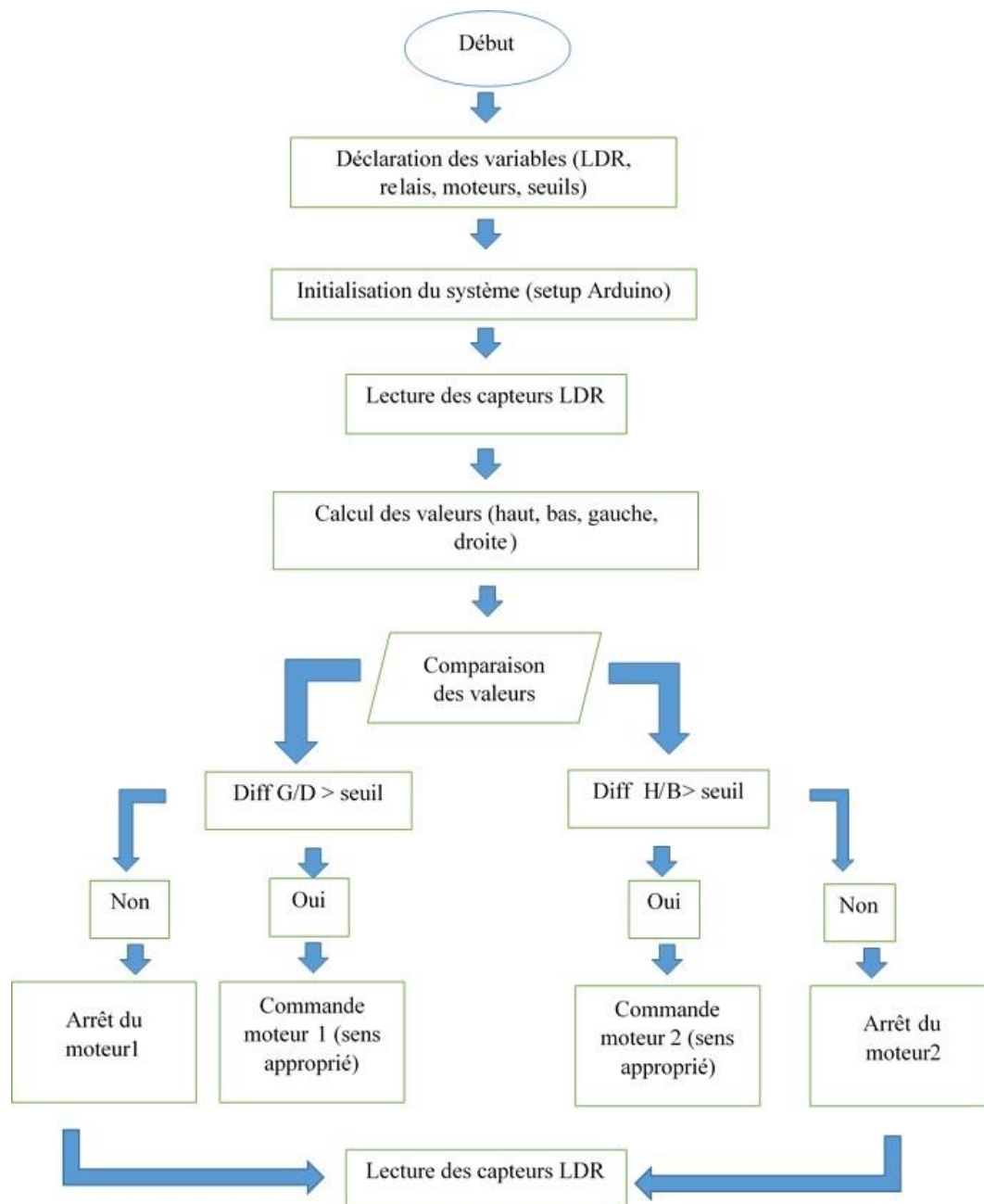


Figure. 3.4 Organigramme représente les étapes de l'algorithme

3.7 Câble de connexion

Le câble USB Type B pour Arduino Uno est un câble de connexion utilisé pour relier la carte Arduino à un ordinateur. Il possède un connecteur carré de type B qui se branche sur la carte Arduino, et une prise USB standard de l'autre côté pour se connecter au PC. Ce câble permet de transférer les programmes depuis le logiciel Arduino IDE vers la carte, et assure également l'alimentation électrique de 5V pendant son fonctionnement. Il est important d'utiliser un câble de type data (transfert de données) et non un simple câble de charge, car ce dernier ne permet pas de téléverser le code vers l'Arduino.



Figure. 3.5 Câble USB type B (Arduino UNO)

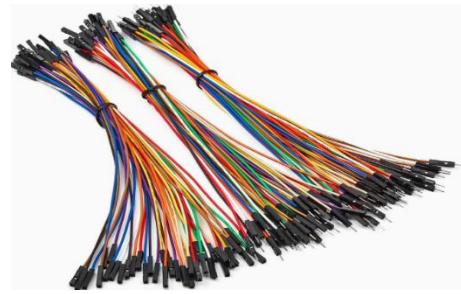


Figure.3.6 Fils de pin d'arduino (Fils Dupont (Jumper wires))

Les fils Dupont sont de petits câbles très utilisés en électronique, surtout avec les cartes Arduino. Ils permettent de connecter facilement les composants électroniques (capteurs, relais, moteurs, breadboard...) sans soudure.

Ils existent en trois types :

- Male / Male (Mâle / Mâle)
- Male / Female (Mâle / Femelle)
- Female / Female (Femelle / Femelle)

Ces câbles sont très pratiques pour les projets éducatifs et les tests rapides, car ils permettent un montage et démontage facile.

3.8 Module relais 2 canaux 5 V

Ceci est un module d'interface relais **basse logique (LOW level) 5V à 2 canaux**. Chaque canal nécessite un courant de commande de **15 à 20 mA**. Il peut être utilisé pour contrôler divers appareils et équipements nécessitant un courant élevé. Il est équipé de relais haute intensité pouvant fonctionner sous **250V AC / 10A** ou **30V DC / 10A**. Il dispose d'une interface standard qui peut être commandée directement par un microcontrôleur.

3.8.1 Caractéristiques

- Tension d'alimentation : 5V DC / 12V DC
- Courant : supérieur à 100 mA
- Charge supportée : 250V AC 10A ou 30V DC 10A
- Dimensions : 50,5 mm × 38,5 mm × 18,5 mm (L × l × H)
- Poids : 31 g
- Type de relais : SPDT (Single Pole Double Throw / simple inverseur)
- Isolation par optocoupleur, offrant une bonne immunité aux interférences
- Lorsque l'entrée est à niveau bas (LOW), le relais est désactivé et le voyant est allumé

- Interface standard pouvant être directement contrôlée par un microcontrôleur (8051, AVR, PIC, DSP, ARM, MSP430, logique TTL, [27]).

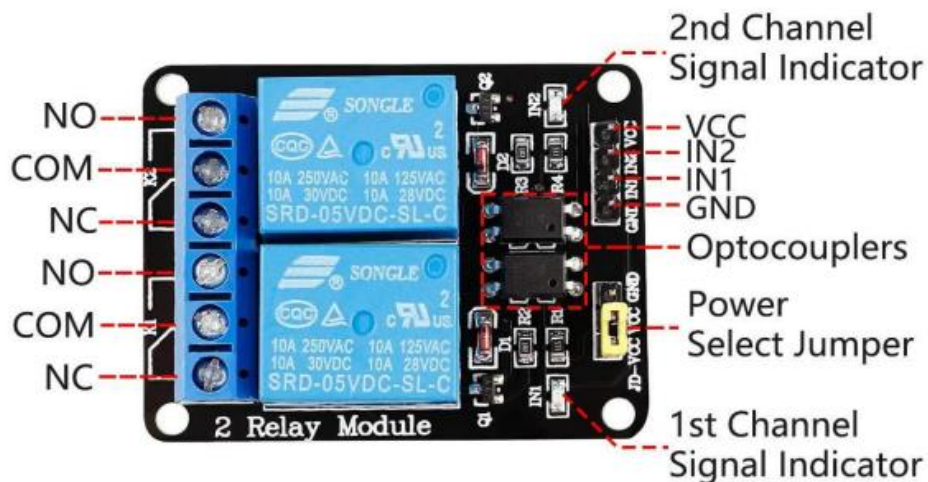


Figure.3. 7 description module relais 2 canaux

3.9 Moteur DC 12 V

Après une recherche profonde, la plus part des travaux scientifiques présentés dans le domaine de la conception et la réalisation des suiveurs solaire utilisent les moteurs pas à pas ou bien les serveux moteurs dont ces derniers délivrent des couples faibles, c'est pour cette raison que nous avons trouvé que ce genre c'est le plus adapté à notre système.



Figure 3.8 Moteur à courant continu (essuie glasses)

Un moteur électrique à courant continu de type moteur d'essuie-glace a été utilisé dans le système de suivi solaire. Ce type de moteur est largement utilisé dans les applications automobiles en raison de son couple élevé et de sa robustesse mécanique, ce qui le rend adapté pour déplacer des charges relativement importantes comme la structure du panneau solaire.

Le moteur fonctionne sous une tension nominale de 12 V. D'après les mesures effectuées, le courant consommé varie entre 5 A et 5.5 A selon la charge et les conditions de fonctionnement.

La puissance électrique du moteur peut être estimée par la relation :

$$P = U \times I \quad (3.1)$$

- Pour $I = 4 \text{ A}$: $P = 12 \times 5 = 60 \text{ W}$
- Pour $I = 6 \text{ A}$: $P = 12 \times 5.5 = 66 \text{ W}$

Ainsi, la puissance du moteur se situe approximativement entre 60 W et 66W, ce qui confirme qu'il s'agit d'un moteur suffisamment puissant pour assurer le mouvement du système de suiveur solaire. Ce type de moteur est particulièrement adapté aux systèmes de suivi solaire grâce à sa robustesse et à la stabilité de son fonctionnement.

3.10 Modélisation des capteurs LDR

Les capteurs LDR (Light Dependent Resistor) sont utilisés dans le système de suivi solaire pour détecter l'intensité lumineuse et permettre l'orientation du panneau solaire vers la source de lumière maximale.

Une LDR est un composant dont la résistance varie en fonction de la luminosité : elle diminue lorsque l'éclairement augmente et augmente lorsque la lumière diminue. Cette propriété permet de convertir une grandeur physique (lumière) en une grandeur électrique (résistance, puis tension).

Afin d'exploiter ce principe, la LDR est associée à une résistance fixe pour former un pont diviseur de tension. La tension de sortie dépend directement de la variation de la résistance de la LDR selon l'éclairement :

$$V_{Out} = \frac{V_{cc} * R_{LDR}}{R_{LDR} + R} \quad (3.2)$$

Où R : est la résistance qu'on a ajoutée à LDR (10kΩ)

Dans le système de suiveur solaire, plusieurs LDR sont placées en configuration géométrique (généralement en croix) afin de comparer les niveaux de lumière provenant de différentes directions.

La différence entre les tensions mesurées permet de déterminer la position relative du soleil.

Le microcontrôleur Arduino lit ces tensions sous forme de valeurs analogiques, puis calcule l'écart entre les capteurs afin de générer un signal de commande qui ajuste la position du panneau solaire jusqu'à l'équilibre des intensités lumineuses.

3.11 Modélisation des moteurs à courant continu (MCC)

La modélisation d'un moteur à courant continu (MCC) permet de représenter son comportement électrique et mécanique afin de mieux analyser et commander le système de suiveur solaire.

3.11.1 Modèle électrique

Le moteur est modélisé électriquement par une résistance d'induit R, une inductance L et une force contre-électromotrice E proportionnelle à la vitesse de rotation :

$$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a \quad (3.3)$$

Avec :

- U : tension d'alimentation (V)
- I : courant (A)
- R : résistance de l'induit (Ω)
- L : inductance (H)

- E : force contre-électromotrice

La force contre-électromotrice est donnée par :

$$E_{cem} = K_e \Omega \quad (3.4)$$

Où K est la constante du moteur et Ω la vitesse angulaire.

3.11.2 Modèle mécanique

Le comportement mécanique du moteur est décrit par l'équation :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (3.5)$$

Avec :

- J : moment d'inertie
- C_m : couple moteur
- C_r : couple résistant (charge)
- F : coefficient de frottement visqueux
- Ω : vitesse angulaire

Le couple du moteur est proportionnel au courant :

$$C_{em} = K * I \quad (3.6)$$

Ce modèle permet de relier les grandeurs électriques (tension, courant) aux grandeurs mécaniques (couple, vitesse). Il est essentiel pour analyser le comportement dynamique du moteur d'essuie-glace utilisé dans le système de suiveur solaire et pour optimiser sa commande. [28]

3.12 Dimensionnement mécanique : support, axes et transmission linéaire.

Les dimensions du prototype réalisé sont présentées afin de valider la conception mécanique du système. La structure a été conçue avec des dimensions adaptées au panneau solaire utilisé, tout en assurant la stabilité et la résistance mécanique nécessaires.

Le tableau suivant regroupe l'ensemble des dimensions et mesures du prototype réalisé dans le cadre de ce prototype

Tableau2. Les différentes dimensions du prototype

élément	photo	Dimension L*larg*H
Base de support		40*40*3 cm
Support principal (fixe)		25 cm
Support secondaire (mobile)		10 cm
Support horizontal pour panneau solaire (forme U)		40 cm
Cadre pour panneau		15 cm
Tige de transmission mvt est- ouest		35*23.5
Tige de transmission mvt nord -sud		13 cm
Armoire de commande		9cm
		20*15 cm

3.13 Calcul de puissance la vitesse et du couple, des moteurs à courant continu

3.13.1 Calcul de la puissance

On a $P=U*I$, avec $U =12\text{ v}$



Figure 3.9 Courant du moteur

Après le calcul du courant utilisant le multimètre j'ai trouvé que le courant varie entre 5 et 5.5 ampère, Alors la puissance P sera entre 60 et 66 w.

Pour notre moteur la puissance moyenne est presque 63 w

$$P=63\text{w}$$

3.13.2 Calcul de la vitesse angulaire

Avec un chronomètre on a trouvé que la vitesse du moteur est de 20 tours par 16 seconde ce qui nous donne une vitesse $N=20*60/16$, donc $N =75\text{ tr/min}$, donc quand on a calculé la vitesse angulaire on a trouvé que :

$$\Omega = N*2\pi /60 =75*2*3.14/60 =7.85\text{ rad/s} \quad \Omega = 7.85\text{ rad/s}$$

3.13.3 Calcul du couple

Le couple électromagnétique du moteur à courant continu est un paramètre essentiel pour évaluer sa capacité à entraîner le système de suiveur solaire.

Le couple moteur est ensuite déterminé à partir de la relation fondamentale de la puissance mécanique :

$$P = C \cdot \Omega \quad \text{ainsi } C = P / \Omega$$

Dans la plus part des travaux de recherche sur les suiveurs solaire le rendement du moteur est prenaiss égale à 80%. [20]

Donc on peut écrire $P_{\text{mécanique}} \approx P_{\text{électrique}} \cdot 0.80$

En remplaçant par les valeurs numériques : $C_{em} = 63 \cdot 0.80 / 7.85 \approx 6.42 \text{ N}\cdot\text{m}$ donc le couple électromagnétique développé par le moteur à courant continu est :

$$C_{em} = 6.42 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Le couple électromagnétique du moteur est estimé à environ **8 N·m**, ce qui confirme que le moteur d'essuie-glace utilisé dispose d'un couple suffisant pour assurer le mouvement du système de suiveur solaire pour un prototype.

3.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la conception et la modélisation du système de suiveur solaire à double axes. Nous avons décrit l'architecture générale du système ainsi que les différents composants utilisés, notamment les capteurs LDR, la carte Arduino, les moteurs à courant continu et les modules de commande.

Nous avons également étudié le principe de fonctionnement des capteurs et du moteur à courant continu à travers leur modélisation, ce qui a permis de mieux comprendre le comportement global du système. Par ailleurs, le dimensionnement mécanique de la structure des éléments de transmission a été réalisé afin d'assurer un fonctionnement fiable et adapté aux exigences du prototype.

Enfin, l'élaboration de l'algorithme de commande a permis de définir la stratégie de suiveur solaire adoptée pour orienter automatiquement le panneau vers la zone de la plus forte luminosité. L'ensemble des études présentées dans ce chapitre constitue la base de la réalisation pratique du prototype qui sera détaillée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

REALISATION EXPERIMENTALE

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la réalisation expérimentale du système de suivi solaire. Cette étape constitue la phase pratique du projet, où les différents éléments conçus et modélisés précédemment sont assemblés et testés sur un prototype réel.

Nous détaillerons d'abord la mise en œuvre du système mécanique et électrique, incluant le montage de la structure, l'installation des moteurs, ainsi que le câblage des capteurs LDR et des modules de commande. Ensuite, nous aborderons la programmation de la carte Arduino qui assure le traitement des signaux et le contrôle des actionneurs.

Enfin, nous présenterons les tests expérimentaux effectués afin d'évaluer les performances du système dans des conditions réelles de fonctionnement, notamment la précision du suivi, la stabilité du mouvement et la réactivité du système face aux variations de luminosité.

Ce chapitre permet ainsi de valider les choix de conception et de vérifier le bon fonctionnement global du prototype réalisé

4.2 Montage mécanique et intégration du panneau

Après une discussion avec l'encadreur, le choix s'est porté sur un moteur d'essuie-glace en raison de son couple élevé. Le prototype a été réalisé entièrement en structure métallique afin de garantir une bonne résistance mécanique, capable de supporter les efforts générés par le moteur et le poids du panneau solaire.

Après la prise des mesures nécessaires, un panneau solaire de dimensions 33×22 cm a été utilisé. Les différentes parties de la structure ont été assemblées par soudage, puis l'ensemble a été peint afin d'assurer une meilleure protection contre la corrosion.

Les moteurs ont été fixés solidement sur la structure et un boîtier a été installé et utilisé comme armoire de commande. Le système mécanique permet un mouvement dans deux directions, assurant ainsi le suivi solaire selon deux axes.



Figure 4.1 soudage des différentes parties du suiveur

4.3 Partie commande

Concernant la partie électrique, une boîte de commande a été réalisée. Elle contient deux batteries de 6 V connectées en série pour alimenter les moteurs, ainsi qu'un chargeur de batterie pour les recharger. Des relais ont été utilisés pour la commande des moteurs, avec l'ajout de fusibles pour assurer la protection du circuit.

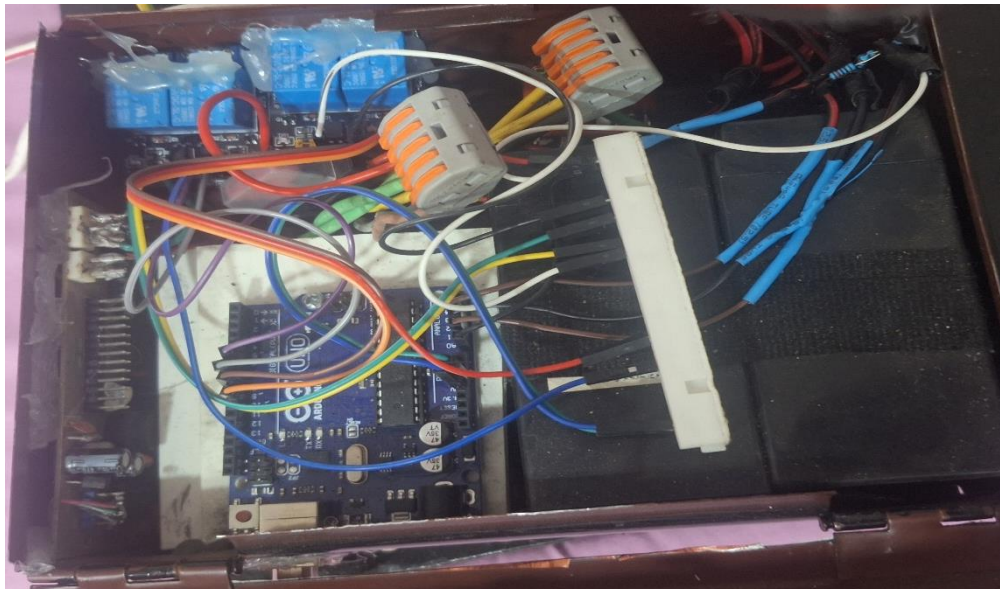


Figure 4.2 boîtier de commande

4.4 Installation des LDR autour du panneau

Les quatre capteurs de luminosité (LDR) ont été installés sur le panneau photovoltaïque en formant une croix. Cette disposition permet de créer une différence d'éclairement entre les capteurs lorsque le panneau n'est pas parfaitement orienté vers le soleil.

Chaque capteur LDR est connecté par deux fils : le premier est relié à l'alimentation de +5 V, et le deuxième est connecté à une résistance de 10 K Ω afin de réaliser un montage en pont diviseur de tension. Le point commun entre la LDR et la résistance est relié à une entrée analogique de la carte Arduino (A0, A1, A2 et A3) l'autre point est relié au GND. L'Arduino mesure les tensions correspondantes et compare les valeurs obtenues afin de déterminer la direction du rayonnement solaire et commander les moteurs de poursuite.



Figure 4.2 installation des LDR

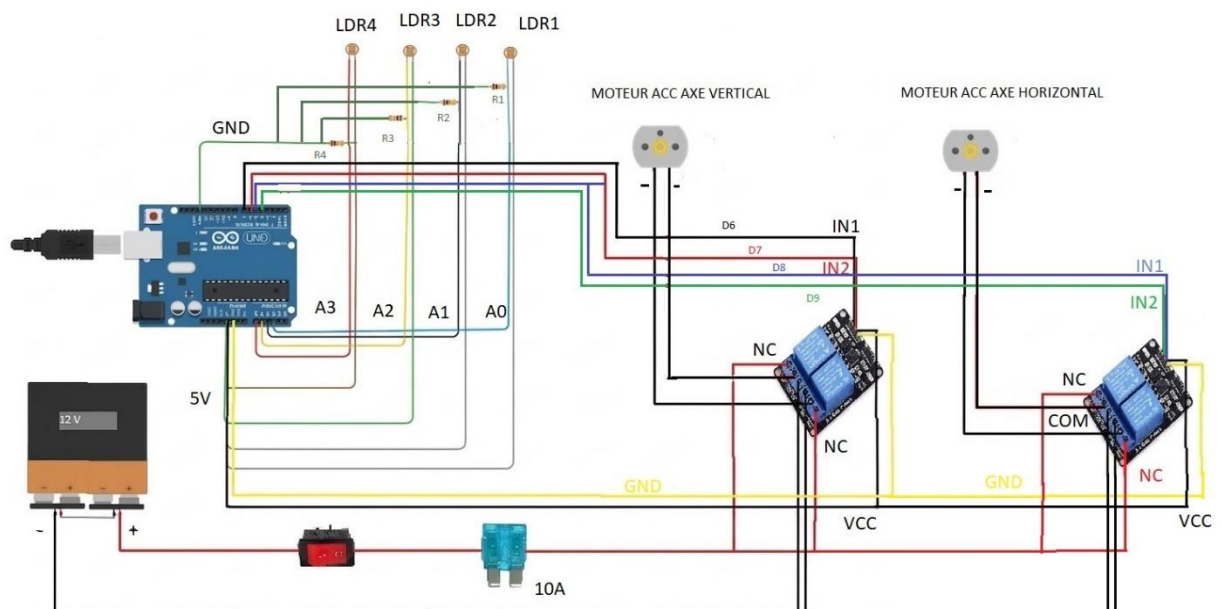


Figure 4.3 schémas électrique simplifier

4.4.1 Test des LDR

Après le câblage des capteurs LDR avec les résistances et leur connexion à la carte Arduino, une phase de test a été réalisée afin de vérifier leur bon fonctionnement.

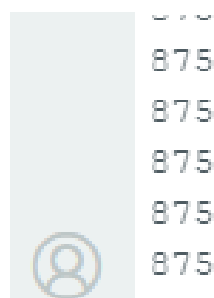
La carte Arduino a été connectée à l'ordinateur, puis un simple code a été téléchargé permettant l'affichage des valeurs analogiques des capteurs LDR sur le moniteur série. Cette étape a permis de visualiser en temps réel les variations des signaux fournis par chaque capteur.

```
sketch_jun3a.ino
1  int ldr = A3;
2  int valeur;
3
4  void setup() {
5      Serial.begin(9600);
6  }
7
8  void loop() {
9      valeur = analogRead(ldr);
10     Serial.println(valeur);
11     delay(500);
12 }
```

Figure 4.4 code arduino pour test des LDR

Le test a consisté à exposer chaque LDR individuellement à la lumière tout en couvrant les autres afin d'observer la variation des valeurs affichées. Lorsque le capteur est exposé à la lumière, la valeur mesurée augmente ou diminue selon le montage utilisé, tandis que lorsque le capteur est couvert, une variation inverse est observée.

Cette procédure a permis de confirmer le bon fonctionnement des capteurs LDR ainsi que la validité du montage électrique avant leur intégration dans le système de suivi solaire.



```
875
875
875
875
875
```

Figure 4.5 valeurs analogiques des LDR exposé à la lumière

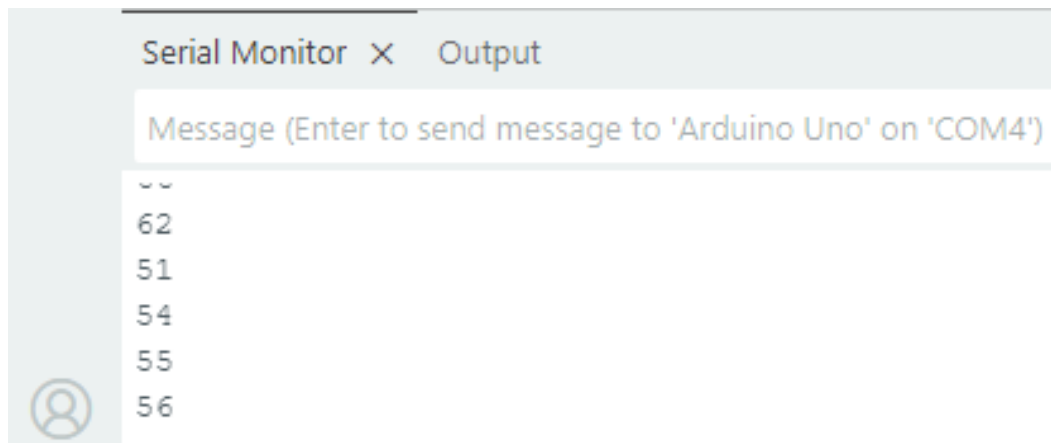


Figure 4.6 valeurs analogiques des LDR ombragée

4.5 Test du bon fonctionnement des deux moteurs

Les deux moteurs utilisés fonctionnent sous une tension de 12 V et nécessitent un courant relativement élevé. Étant donné que la carte Arduino ne peut pas fournir directement le courant nécessaire à leur fonctionnement, un module relais a été utilisé comme interface de commande. Ce module permet de commuter des courants plus importants tout en protégeant la carte Arduino.

L'alimentation des moteurs est assurée par une batterie de 12 V, tandis que l'Arduino commande les relais associés à chaque moteur à travers ses sorties numériques.

Après le téléchargement du programme de test dans la carte Arduino, plusieurs essais ont été réalisés afin de vérifier le bon fonctionnement des moteurs ainsi que la validité des connexions électriques.

Les résultats obtenus ont montré que les moteurs répondaient correctement aux commandes et que le câblage réalisé était conforme aux exigences du système.

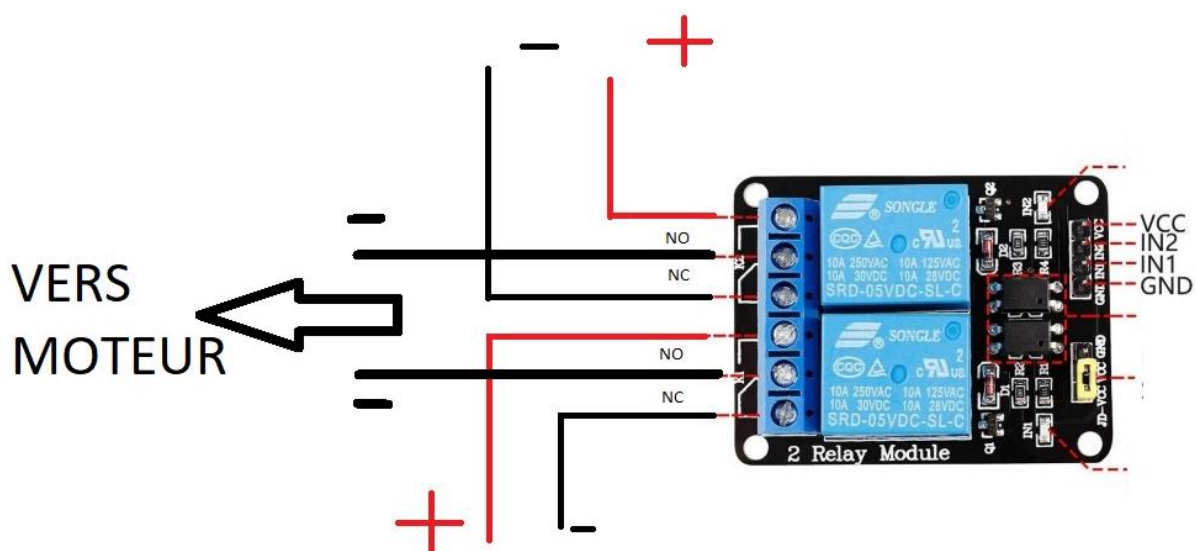


Figure 4.7 alimentation du moteur à partir du relai



Figure 4.8 Aperçu du prototype

La figure 4.7 illustre le câblage du moteur avec les relais. Le moteur est connecté de manière à rester à l'arrêt lorsque les valeurs mesurées par les capteurs LDR sont équilibrées, c'est-à-dire lorsqu'aucune correction de position n'est nécessaire.

Lorsque l'Arduino détecte une différence entre les valeurs des LDR, il active le relais correspondant afin d'alimenter le moteur dans le sens requis pour corriger l'orientation du panneau. Si la correction doit être effectuée dans le sens opposé, le second relais est activé, ce qui inverse le sens de rotation du moteur. Ainsi, le système permet d'orienter automatiquement le panneau solaire vers la position où l'éclairement est maximal.

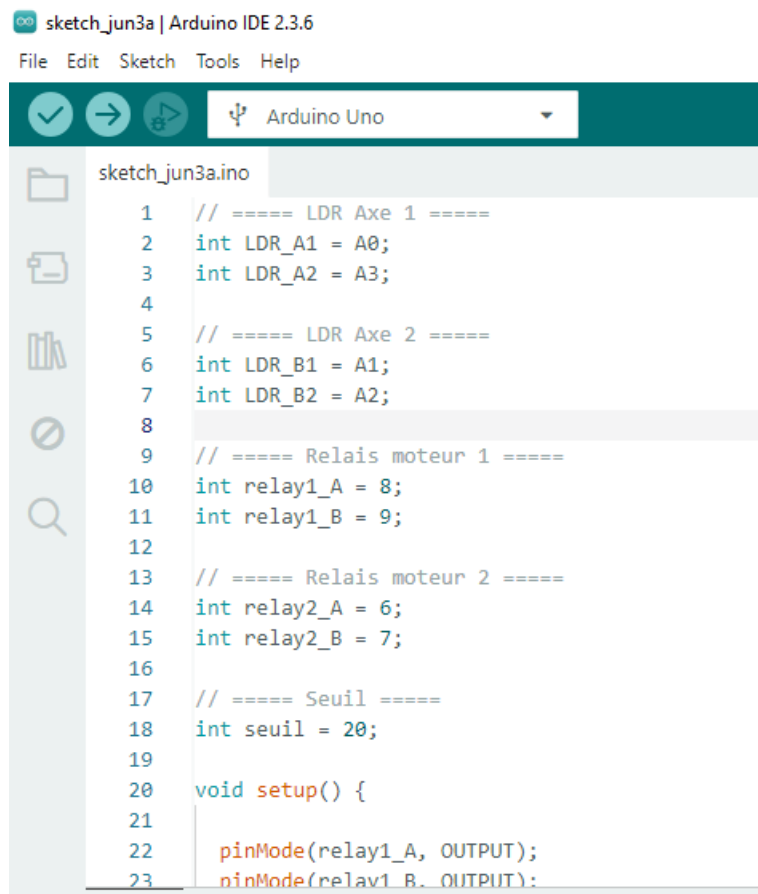


Figure 4.9 code utiliser pour tester les deux moteurs

4.6 Principe de fonctionnement du prototype réalisé

Le principe de fonctionnement du suiveur solaire repose sur la comparaison des niveaux d'éclairement mesurés par quatre capteurs LDR disposés autour d'une cloison. Les valeurs acquises sont envoyées à la carte Arduino qui calcule les différences d'éclairement entre les capteurs.

Afin d'éviter les mouvements inutiles du panneau dus aux faibles variations de luminosité ou aux perturbations de mesure, un seuil de tolérance est fixé dans le programme. Lorsque la différence entre les valeurs des capteurs dépasse ce seuil, l'Arduino active les relais correspondants afin de commander les moteurs et corriger l'orientation du panneau. En revanche, si la différence reste inférieure au seuil défini, les moteurs restent à l'arrêt. Le système assure ainsi un suivi automatique du soleil tout en limitant les oscillations et la consommation d'énergie.

4.7 Mesures expérimentales du panneau en mode fixe

4.7.1 Orientation du panneau solaire

L'orientation d'un module photovoltaïque est la direction vers laquelle est tournée sa face avant, qui capte les rayons du soleil.

Le soleil change de position continuellement entre son lever à l'est et son coucher à l'ouest

La meilleure orientation de panneaux solaires est plein sud, pour profiter d'un rendement optimal lissé sur la journée

Une orientation plein nord est totalement déconseillée : elle ne permet pas de produire suffisamment d'électricité pour rentabiliser votre installation []

L'inclinaison représente le degré de pente des panneaux photovoltaïques par rapport à la ligne d'horizon. En théorie, pour maximiser la production, il faudrait que le panneau change d'inclinaison de manière à suivre la course du soleil. En général, on considère que l'inclinaison optimale d'un panneau solaire est de 30° à 35° .

En pratique, la meilleure inclinaison est obtenue après l'analyse des mesures effectuées.

4.7.2 Expérience de sélection de direction

Pour choisir la meilleure direction pour notre panneau en mode fixe on a fait quelque essai

Dans des temps différents mesurant la tension et le courant de court-circuit à chaque fois



Figure 4.10 Mesure au matin Midi et soir position est



Figure 4.11 Mesure au matin Midi et soir position sud



Figure 4.12 Mesure au matin Midi et soir position ouest

Notre panneau génère une tension de 6 v et une puissance de 10 w d’après le constructeur

Le tableau suivant présente le calcul de la puissance générée lors des essais réalisés au cours de la journée.

Tableau 3: Caractérisation électrique du panneau solaire fixe

Direction	Horaires 05/06/2026	V (Voltage généralé) v	I (Courant court- circuit)A	P (Puissance généralée)w	N (Rendement du panneau)%	Rendement de la journée%
est	Matin	6.77	0.69	4.67	46	23.5
	Midi	6.14	0.11	0.67	6.7	
	Soir	6.00	0.3	1.8	18	
Sud	Matin	6.70	0.52	3.48	34	60
	Midi	6.93	1.09	7.55	75	
	Soir	6.70	1.07	7.16	71	
Ouest	Matin	6.14	0.27	1.65	16.5	25.5
	Midi	6.62	0.3	2	20	
	Soir	6.77	0.60	4	40	

Enfin, nous avons constaté que l'orientation vers le sud est la plus favorable pour l'installation du panneau photovoltaïque.



Figure 4.9 installation du panneau

Après la détermination de l'orientation optimale du panneau fixe, nous avons effectué les mêmes mesures avec le système de suivi solaire à double axe afin de comparer les performances des deux configurations. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Caractérisation électrique du panneau solaire en mode suiveur

Direction	Horaires 06/06/2026	V (Voltage généré) v	I (Courant court- circuit)A	P (Puissance générée)w	N (Rendement du panneau)%
est	Matin	6.77	0.7	4.73	47
Sud	Midi	6.93	1.15	8	80
Ouest	Soir	6.77	0.2	1.35	13.5

4.8 Analyse et discussion des résultats

Dans la première série d'essais réalisée sur le panneau fixe, nous avons constaté que la tension reste relativement élevée pour les différentes orientations et aux différents moments de la journée. En revanche, l'intensité du courant varie considérablement, ce qui entraîne une variation de la puissance produite.

Par exemple, à midi, lorsque le panneau est orienté vers l'est, la tension mesurée est d'environ 6 V, mais l'intensité du courant reste faible, ce qui conduit à une faible puissance électrique. À l'inverse, lorsque le panneau est orienté vers le sud à la même période, l'intensité atteint une valeur beaucoup plus élevée, ce qui permet d'obtenir une puissance maximale.

Ces résultats montrent que l'obtention d'un bon rendement dépend principalement de l'orientation du panneau par rapport au rayonnement solaire. En effet, le rendement est optimal lorsque les rayons du soleil arrivent perpendiculairement à la surface du panneau.

Cette observation est confirmée par la deuxième série d'essais réalisée avec le suiveur solaire. Grâce à son système d'orientation automatique, le panneau maintient une position plus favorable face au soleil tout au long de la journée, ce qui améliore la captation du rayonnement solaire et augmente la puissance produite. Nous pouvons ainsi conclure que l'utilisation d'un suiveur solaire contribue efficacement à l'amélioration du rendement du panneau photovoltaïque.

4.9 Difficultés rencontrées

Lors de la réalisation du prototype, nous avons rencontré quelques difficultés techniques liées à la mise en œuvre du système.

Le premier problème concernait la fixation des moteurs. En effet, leur installation n'était pas assez stable, ce qui provoquait des vibrations sur l'ensemble du système à cause de la rigidité des supports utilisés.

Un autre problème important était le fonctionnement des deux moteurs en même temps. Après vérification, nous avons constaté que le type de moteur utilisé ne possède pas une bonne isolation électrique au niveau du châssis (masse commune avec le carter). Ainsi, lorsque l'on change le sens de rotation d'un moteur, un passage de courant peut se produire vers l'autre moteur via la structure métallique, ce qui entraîne leur activation simultanée.

Enfin, nous avons rencontré une limite liée au système utilisé pour orienter le panneau. Le mécanisme choisi produit un mouvement surtout linéaire, ce qui limite l'angle de rotation du panneau, surtout dans le sens est-ouest. Cela a eu un effet direct sur les résultats, notamment en fin de journée où le panneau n'était pas bien orienté vers le soleil, ce qui a réduit la production.

4.10 Solutions proposées

Pour résoudre les problèmes rencontrés lors de la réalisation du prototype, nous avons proposé des solutions simples.

Pour la fixation des moteurs et les vibrations, il faut bien fixer les moteurs avec des supports plus solides et ajouter des éléments pour réduire les vibrations afin de stabiliser le système.

Pour le problème des deux moteurs qui fonctionnent en même temps, il faut séparer correctement les circuits électriques et éviter le contact direct entre les parties métalliques. On peut aussi utiliser des parties en plastiques pour éviter le retour du courant

Pour la limitation du mouvement du panneau, il faut changer le système de déplacement par un mécanisme plus adapté qui permet une rotation plus large, afin que le panneau puisse mieux suivre la position du soleil pendant toute la journée.

4.11 conclusion

En conclusion, ce projet nous a permis de réaliser un système simple qui suit la lumière du soleil pour améliorer le fonctionnement d'un panneau solaire.

Les résultats montrent que le panneau fixe produit de l'énergie, mais cette production change selon sa position par rapport au soleil. Par contre, avec le système de suivi solaire, le panneau est mieux orienté, ce qui permet de produire plus d'énergie et d'améliorer le rendement.

Pendant la réalisation du projet, nous avons rencontré quelques problèmes techniques, mais nous avons essayé de les résoudre avec des solutions simples pour améliorer le système.

Ce travail nous a aidés à comprendre le fonctionnement des panneaux solaires et l'importance de bien les orienter pour obtenir une meilleure production d'énergie.

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif la conception et la réalisation d'un système de suivi solaire permettant d'améliorer l'orientation d'un panneau photovoltaïque afin d'augmenter la quantité d'énergie produite.

Dans un premier temps, nous avons étudié les notions générales liées à l'énergie solaire et aux panneaux photovoltaïques, ainsi que les différents composants nécessaires à la réalisation du système. Ensuite, nous avons conçu et réalisé un prototype de suiveur solaire basé sur une carte Arduino, des capteurs LDR, des relais et des moteurs à courant continu. Enfin, plusieurs essais expérimentaux ont été effectués afin d'évaluer les performances du système réalisé.

Les résultats obtenus ont montré que l'orientation du panneau joue un rôle important dans la production d'énergie. Le panneau équipé du suiveur solaire a présenté de meilleures performances que le panneau fixe, car il reste orienté vers le soleil pendant une plus grande partie de la journée. Cette amélioration se traduit par une augmentation du courant produit et, par conséquent, de la puissance générée.

Au cours de la réalisation du projet, certaines difficultés techniques ont été rencontrées, notamment au niveau de la fixation des moteurs, du contrôle de leur fonctionnement et du mécanisme de rotation du panneau. Malgré ces contraintes, le prototype a permis de valider le principe de fonctionnement du suivi solaire et d'atteindre les objectifs fixés.

En conclusion, ce projet a montré l'intérêt de l'utilisation d'un suiveur solaire pour améliorer le rendement des systèmes photovoltaïques. Il constitue également une expérience enrichissante qui nous a permis d'acquérir des connaissances pratiques dans les domaines de l'énergie solaire, de l'électronique et de la programmation embarquée.

Quelques perspectives

Les résultats obtenus dans ce travail ouvrent la voie à plusieurs perspectives d'amélioration. Tout d'abord, le système mécanique à vis-écrou utilisé pourrait être davantage développé afin d'augmenter la plage de rotation du panneau solaire jusqu'à 180°. Cette amélioration permettrait un meilleur suivi de la trajectoire du soleil tout en conservant une grande précision de positionnement et une bonne stabilité du mouvement.

Par ailleurs, l'intégration de techniques d'intelligence artificielle pourrait permettre d'optimiser les performances du suiveur solaire en prédisant la position du soleil et en adaptant automatiquement le fonctionnement du système aux conditions météorologiques, ce qui contribuerait à améliorer le rendement énergétique.

L'ajout d'un afficheur LCD permettrait également de visualiser en temps réel les informations importantes telles que les valeurs des capteurs, la position du panneau et les paramètres de fonctionnement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] TOUMI Nihed ‘‘ Energie Solaire Photovoltaïque Et Systeme Photovoltaïque Autonome’’projet Fin D’étude Licence uni Annaba.
- [2] <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy>
- [3] https://fr.scribd.com/document/548184971/TP-boubekri-energie-photovoltaïque#google_vignette.
- [4] S.Belakehal, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 2010.
- [5] https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_mouvement-terre-lune/stlp-mouvement-terre-soleil.html
- [6] J.E. Braun et J.C. Mitchell, solar geometry for fixed and tracking surface, edition: solar energy laboratory, 1983.
- [7] Wikipédia, « Trackersolair », <https://fr.wikipedia.org/wiki/> (dernier accès 10-05-2018))
- [8] Z.Benmohammadi, « Etude, conception et réalisation d’une commande d’un tracker solaire (suiveur solaire) », Mémoire de Master, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah de Fés, 2014.
- [9] <https://www.supersolarpv.com/fr/blog/what-is-a-single-axis-solar-tracker>
- [10] M. Khan et al., “A Review of the Sustainable Development of Solar Photovoltaic Tracking System Technology,” Energies, vol. 16, no. 23, 2023.
- [11] Solar Compare Team, Dual Axis Tracker: Definition, Types and How it Works, 2024.)
- [12] M. Khan et al., “A Review of the Sustainable Development of Solar Photovoltaic Tracking System Technology,” Energies, vol. 16, no. 23, 2023.)
- [13] M. Khan et al., “A Review of the Sustainable Development of Solar Photovoltaic Tracking System Technology,” Energies, vol. 16, no. 23, 2023.
- [14] <https://doncenmotor.com/fr/solar-tracker-motor/>
- [15] <https://www.hangdafans.com/fr/blog/pmdc-motor-construction-working-and-applications1>
- [16] <https://www.leili-motor.net/fr/moteur-a-courant-continu-a-aimant-permanent-et-moteur-a-excitation-serie.html>
- [17] https://www.nidec.com/en/technology/motor/basic/00004/?utm_source=chatgpt.com
- [18] <https://www.leili-motor.net/fr/moteur-a-courant-continu-a-aimant-permanent-et-moteur-a-excitation-serie.html>
- [19] <https://www.jkongmotor.com/fr/blcd-motors-for-solar-panel-tracking-systems.html>
- [20] <https://www.jkongmotor.com/fr/how-does-a-stepper-motor-work-in-short.html>
- [21] https://www.a-m-c.com/fr/servomoteur/?utm_source=perplexity
- [22] Mousazadeh, H. et al., “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(8), 2009.

- [23] MEKKI WALID BADR-EDDINE et MOHAMMED BELHADJ ABDELKADER WELID
« Conception et réalisation d'un panneau solaire à base d'Arduino » Universitaire Belhadj
Bouchaib d'Ain-Temouchent 2018/2019.
- [24] Azzi Omar, « Réalisation d'un système de Suiveur à base arduino » Université Mohamed
Khider Biskra, Mémoire soutenu le 14/09/2020..
- [25] MEKKI WALID BADR-EDDINE et MOHAMMED BELHADJ ABDELKADER WELID
« Conception et réalisation d'un panneau solaire à base d'Arduino » Universitaire Belhadj
Bouchaib d'Ain-Temouchent 2018/2019.
- [26] <https://fr.fmuser.net/content/?10729.html>
- [27] [27] <https://www.sunfounder.com/>
- [28] S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, 5th ed., McGraw-Hill, 2012.
- [29] (https://www.monkitsolaire.fr/blog/bien-exposer-son-kit-solaire-les-techniques-indispensables-n82?srsItid=AfmBOoqSlK7muw9GSgG9WUqHptW-ZUX_Ut0rD5HvW74dV-g9hbtHuoEl).