



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



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : *Sciences et Technologie*

Filière : *Electrotechnique*

Spécialité : *Commande Electrique*

*Thème*

**Réalisation d'un Suiveur Solaire à deux  
axes Commandé par une Carte Arduino**

Dirigé par :

- Pr. BEKAKRA Youcef

Réalisé par :

- CHETEHOUNA Tarek

- GHILANI Omar

- AMAMRA Imad

Promotion : 2022

# Résumé

La technologie photovoltaïque est une révolution dans les énergies renouvelables. Notre travail ayant comme objectif de l'amélioration du gain en énergie électrique du panneau solaire mobile par rapport au système fixe. Notre dispositif d'instrument sera fixé sur une structure mécanique que nous avons réalisé à base de deux servomoteurs avec leurs circuits de commande permettant ainsi la rotation du panneau selon les deux directions horizontale et verticale. Pour cette application, nous avons réalisé une lunette à base de quatre capteurs photo résistifs de type 'LDR' qui sont disposés de manière à ce que leur éclairage ne soit identique que si la lunette est pointée vers le soleil. Les signaux issus des capteurs sont transmis aux entrées d'un ARDUINO de type dans « UNO » qui permet la comparaison des niveaux de tensions pour la commande des deux moteurs. Enfin, le système que nous avons réalisé est capable de suivre fidèlement la position du soleil avec un bon rendement.

Mots clés : énergie photovoltaïque, énergie solaire, rayonnement solaire.

## ملخص

تعد التكنولوجيا الكهروضوئية ثورة في الطاقات المتجددة. يقوم مشروعنا على صنع متتبع شمس تلقائي باستعمال حساسات ضوئية. الهدف من هذا المشروع هو تحسين المكاسب في الطاقة الكهربائية للوحة شمسية تتحرك نسبة إلى النظام الثابت. سيتم تثبيت جهازنا بواسطة هيكل ميكانيكي يتحرك بواسطة محركين ذو تيار مستمر من نوع سيرفو مع دوائر التحكم الخاصة بهم مما يتيح تدوير اللوحة في الاتجاهين الأفقي والعمودي. بالنسبة لهذا التطبيق، لقد صنعنا متتبعاً مكوناً من أربعة أجهزة استشعار مقاومة للضوء من نوع "LDR". يتم نقل الإشارات الصادرة من أجهزة الاستشعار إلى مدخلات متحكم من النوع "UNO" والذي يسمح بمقارنة مستويات الجهد للسيطرة على المحركين مما يسمح بتوجيه اللوحة نحو الشمس. وأخيراً، فإن النظام الذي حققناه قادر على متابعة أشعة الشمس و اعطاء مردود اعلى من الطاقة الكهربائية مقارنة بالنظام الثابت.

الكلمات المفتاحية : الطاقة الكهروضوئية الطاقة الشمسية الإشعاع الشمسي

## Abstract

Photovoltaic technology is the revolution of renewable energies, our work has as objective the improvement of the gain in electrical energy of the solar tracker moving relative to the fixed system. Our instrument device will be fixed on a mechanical structure that we made based on two DC motors with their control circuits allowing rotation of the panel in both horizontal and vertical directions. For this application, we have made a telescope made of four photoresist sensors type 'LDR' which are arranged in such a way that their illumination is identical only if the telescope is pointed towards the sun. Finally, the system we have achieved is able to follow the sun's rays and give a higher yield of electrical energy compared to the fixed system.

Keywords: photovoltaic energy, solar energy, solar radiation

## *Remerciements*

A DIEU notre créateur nous exprimons notre profonde reconnaissance et notre gratitude

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude à notre encadrent Mr «**Youcef BEKAKRA**»

Nous remercions par ailleurs vivement les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail et d'assister à notre soutenance.

Enfin, nous remercions tous nos amis et tous ceux qui de près ou de loin nous ont toujours soutenu dans cette aventure.

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes parents :*

*Ma très chère mère **Missa Dalila**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, je t'aime et je te souhaite une longue vie.*

*Mon cher père **Abdel Razzak** qui n'a pas arrêté de m'encourager et de sacrifier pour que je puisse franchir tout obstacle durant mes années d'études, que dieu me le garde en très bonne santé.*

*A mes chers frères **Abdellatif, Fares** pour leur appui et leur encouragement.*

*A mes chères sœurs **Souad, Fatema et Zahra** pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.*

*Les petits frères, **Akram, Hibat Alrahman, Safa.***

*A tous mes amis, Sans qui la vie me semblerait bien fade, je vous souhaite la prospérité et le succès, et a tous ceux qui nous ont assisté dans la réalisation et le bon déroulement de ce travail.*

*Tarek.Ch*

## *Dédicace*

*Je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné du courage et  
La patience qui m'a permis d'accomplir cet humble travail.*

*Je dédie le fruit de mes efforts et de mon travail*

*A mes chers parents **Hamza** et*

***Massouda fridgat***

*Pour leur sacrifice, leur amour, leurs prières et leur soutien.*

*A mes frères et sœurs*

*Tous mes amis,*

*Sans qui la vie me semble si douce, je te le souhaite  
Prosperité et succès et tous ceux qui nous ont aidés à  
Réalisation et bon fonctionnement de cette affaire.*

## *Dédicace*

*Tout d'abord, je voudrais remercier le seul Dieu qui me donne  
Le courage et la volonté d'affronter la différence  
difficultés de la vie,*

*Je dédie le fruit de mes efforts à celle qui m'a protégé, m'a donné la vie,  
m'a entouré de sa tendresse, et a tenu à m'enseigner avec sa patience et son sacrifice,  
à qui sa supplication a été le secret de ma réussite, ma chère mère **Massouda Amamra**,  
que Dieu la protège.*

*J'offre une dédicace particulière à celui qui m'a soutenu dans mon parcours  
académique et qui a été derrière chaque étape que j'ai franchie sur le chemin de  
la connaissance et de la connaissance vers l'homme le plus grand et le plus cher  
de l'univers, mon cher père, **Lazhar** .*

*A ceux qui sont Anas de mon âge et le réservoir de mes souvenirs, mes chers  
frères **Abdel Hamid** et **Al Arousi**, et le bourgeon de la famille, ma chère soeur **Nour**.*

*Je ne manque pas non plus de dédier le fruit de mon travail à tous mes  
camarades de classe, de près ou de loin, et particulièrement à mes collègues **Tariq**  
et **Omar**, et à tous les membres de leurs familles.*

*Et à toutes les personnes pour qui j'ai de l'amour et de l'appréciation.*

*A tous, je dédie cette humble recherche.*

**Imad.A**

# Nomenclatures

A : Ampère.

Bd: Capteur Bas droit

Bg : Capteur Bas gauche

CC: Courant Continu

E : éclairage ( $w/ m^2$ ).

Em : Éclairage moyen ( $W/m^2$ )

EVA: éthylène-acétate de vinyle

GPV : générateur photovoltaïque.

Hd : Capteur Haut droit

Hg : Capteur Haut gauche

Icc : Le courant de court-circuit (A).

LDR : Light Dependent Resistor

M1 : moteur 1

M2 : moteur 2

N : dopée au phosphore.

$\eta$  : rendement énergétique.

P : dopée au bore

pc : Puissance de crête.

PV : photovoltaïque.

PWM : La modulation de largeur d'impulsions

RCO : Rapport Cyclique d'Ouverture

S : surface active de la cellule ( $m^2$ ).

STC : Standard Test Condition, c'est-à-dire sous l'ensoleillement de  $1000 w/m^2$

Ta : Température ambiante ( $^{\circ}C$ )

Tc : Température de la cellule ( $^{\circ}C$ )

TUC : Température d'utilisation de la cellule ( $^{\circ}C$ )

V : Volt.

Vcc : Tension à courant Continu

Vco : La tension de circuit ouvert (V).

W : Puissance générée

# Liste des figures

## Chapitre I

- Figure I.1** : Coupe transversale d'une cellule PV typique.
- Figure I.2** : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.
- Figure I.3** : Exemple d'un panneau solaire.
- Figure I.4** : Composants d'un champ de modules photovoltaïques.
- Figure I.5** : Composition d'un module PV.
- Figure I.6** : Panneau monocristallins.
- Figure I.7** : Panneau poly cristallins.
- Figure I.8** : Panneau amorphes.
- Figure I.9** : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.
- Figure I.10** : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.
- Figure I.11** : Type de suiveur solaire.
- Figure I.12** : Suiveur mono-axe.
- Figure I.13** : Suiveur double-axe.

## Chapitre II

- Figure II .1** : Schéma synoptique de notre suiveur du soleil.
- Figure II.2** : Symbole et capteur LDR.
- Figure II.3** : Circuit équivalent du capteur LDR utilisé .
- Figure II.4** : Caractéristiques d'une photorésistance.
- Figure II .5** : présentation (captures + actionneurs) de la carte Arduino.
- Figure II .6** : La carte Arduino.
- Figure II .7** : Connecteur ICSP en un Arduino UNO.
- Figure II.8** : Câble USB type A/B (Arduino UNO).
- Figure II.9** : fils de pins utilisés pour arduino.
- Figure II.10** : Interface du Partie de programmation dan logiciel Arduino.
- Figure II.11** : Servomoteur chinois 9 g.
- Figure II.12** : Servomoteur Artimon FEDOROV.
- Figure II.13** : lustration du signal de contrôle d'un servomoteur.
- Figure II.14** : Panneau solaire.

## Chapitre III

- Figure III.1** : Simulation par logiciel PROTEUS du branchement électrique des quatre LDRs à l'Arduino.

**Figure III.2 :** Simulation par logiciel PROTEUS du branchement électrique des deux servomoteurs.

**Figure III.3 :** l'interface de logiciel Fritzing.

**Figure III.4 :** Brochage des LDR à l'Arduino.

**Figure III.5 :** Montage Circuit électrique des servomoteurs ( Fritzig ).

**Figure III.6 :** circuit électrique de suiveur.

**Figure III.7 :** La base de suiveur solaire.

**Figure III.8 :** Panneaux en bois, le socle fixe et le disque tournant.

**Figure III.9 :** La partie responsable du mouvement de haut en bas.

**Figure III.10 :** Plate-forme d'installation.

**Figure III.11 :** Installation sur les deux poteaux en bois précédents.

**Figure III.12 :** La variation de la résistance du LDR par rapport l'éclairage.

**Figure III.13 :** Procédé de soudage.

**Figure III.14 :** Processus d'assemblage de pièces en plastique.

**Figure III.15 :** Capteur de lumière.

**Figure III.16 :** Montage Circuit électrique de servomoteur.

**Figure III.17 :** Les étapes à suivre pour tester les servomoteurs.

**Figure III.18 :** Le programme pour tester les servomoteurs.

**Figure III.19 :** Montage réel partiel du système suiveur solaire.

**Figure III.20 :** Aperçu du prototype.

**Figure III.21 :** La position du panneau solaire fixe prise de la zone d'In Amenas

**Figure III.22:** Mesure du temps du matin.

**Figure III.23:** Mesure de midi.

**Figure III.24:** Mesure du temps du soir.

**Figure III.25:** Panneau fixe (orienté vers le sud).

**Figure III.26:** Panneau suiveur.

## Sommaire

<b>Remerciements</b> .....	<b>2</b>
<b>Dédicace</b> .....	<b>3</b>
<b>Nomenclatures</b> .....	<b>6</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>13</b>
<b>CHAPITRE I : Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque</b> .....	<b>15</b>
<b>I.1 INTRODUCTION :</b> .....	<b>16</b>
<b>I.2 L'effet photovoltaïque :</b> .....	<b>16</b>
<b>I.3 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque :</b> .....	<b>17</b>
<b>I.4 Panneaux solaire :</b> .....	<b>18</b>
<b>I.4.1 Les rendements :</b> .....	<b>18</b>
<b>I.4.2 Composition d'un module solaire photovoltaïque :</b> .....	<b>19</b>
<b>I.5 Les Différents Types de Panneaux Photovoltaïques :</b> .....	<b>19</b>
<b>I.5.1 Les Panneaux photovoltaïques monocristallins :</b> .....	<b>19</b>
<b>I.5.2 Les panneaux photovoltaïques poly cristallins :</b> .....	<b>20</b>
<b>I.5.3 Les panneaux solaires amorphes :</b> .....	<b>20</b>
<b>I.5.4 Le rendement de la cellule photovoltaïque :</b> .....	<b>21</b>
<b>I.5.5 Influence de l'éclairement :</b> .....	<b>21</b>
<b>I.5.6 Influence de la température :</b> .....	<b>22</b>
<b>I.6 Système de poursuite solaire :</b> .....	<b>23</b>
<b>I.6.1 Etat de l'art des suiveurs solaires :</b> .....	<b>23</b>
<b>I.6.2 Les type de suiveur solaire :</b> .....	<b>24</b>
<b>I.6.2.1 Suiveur actif :</b> .....	<b>24</b>
<b>I.6.2.1.1 Suiveur solaire mono-axe :</b> .....	<b>24</b>
<b>I.6.2.1.2 Suiveur solaire double-axe :</b> .....	<b>25</b>
<b>Chapitre II : Les différents éléments constitutifs de système de suiveur</b> .....	<b>26</b>
<b>II.1 Introduction :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.2 Un schéma synoptique :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.3 Études des différents composants :</b> .....	<b>28</b>
<b>II.3.1 Capteur de lumière (LDR) :</b> .....	<b>28</b>
<b>II.3.1.1 Leur principe :</b> .....	<b>28</b>
<b>II.3.1.2 Caractéristiques :</b> .....	<b>29</b>
<b>II.3.2 Le circuit de commande</b> .....	<b>30</b>
<b>II.3.2.1 Définition de l'Arduino</b> .....	<b>30</b>
<b>II.3.2.1.1 Composants du notre prototype :</b> .....	<b>30</b>
<b>II.3.2.1.2 Présentation de la Carte ARDUINO UNO :</b> .....	<b>30</b>
<b>II.3.2.1.2 L'en-tête ICSP à 6 broches :</b> .....	<b>31</b>
<b>II.3.2.1.3 Les Caractéristiques de la carte ARDUINO UNO :</b> .....	<b>32</b>
<b>II.3.2.1.4 Le microcontrôleur :</b> .....	<b>32</b>

II.3.2.1.5 L'alimentation électrique :	32
II.3.2.1.6 Entrées/sorties :	32
II.3.2.1.7 Câble USB :	33
II.3.2.1.8 Fils de pin d'arduino :	33
II.3.2.1.9 Programmation :	34
II.3.2.2 Servomoteur :	34
II.3.2.2.1 Définition :	34
II.3.2.2.2 Le principe de fonctionnement interne d'un servomoteur :	36
II.3.2.3. Mini panneau solaire :	37
II.3.2.3.1. Définition :	37
II.3.2.3.2. Caractéristique du panneau.....	37
II.3.2.4. Les Alimentations utilisées :	38
II.4. Conclusion :	38
<b>Chapitre III : Réalisation de suiveur solaire</b>	<b>39</b>
III.1. Introduction :	40
III.2. La première partie (les différents blocs de notre système) :	40
III.2.1. Notre objectif :	40
III.2.2 le fonctionnement de système :	40
III.2.2.1 Bloc des capteurs de lumières (LDR) :	40
III.2.2.2. le bloc de commande :	41
III.2.2.3. Bloc d'alimentation de 5V :	41
III.2.2.4. Bloc des servomoteurs :	41
III.3. La deuxième partie (la simulation) :	42
III.3.1. Logiciel de simulation Fritzing :	42
III.3.2. L'environnement de travail de Fritzing :	42
III.3.3. Simulation de notre système :	42
III.3.3.1 Simulation électronique :	42
III.3.3.1.1 Branchement des LDR :	43
III.3.3.1.2 Branchement des servomoteurs :	43
III.3.3.1.3 Réalisation du circuit électrique :	43
III.4 Partie mécanique :	44
III.4.1 La base :	44
III.4.2 La première partie tournante (droite et gauche) :	45
III.4.3 La deuxième partie tournante (Haut et Bas) :	45
III.4.4 Plate-forme d'installation :	46
III.5 La partie électrique :	46
III.5.1 Teste des photorésistances (LDR) :	47
III.5.2 Le montage des photorésistances :	47
III.5.3 Teste du fonctionnement des servomoteurs :	48
III.6 Montage du système suiveur solaire :	49
III.8 Principe de fonctionnement du système suiveur solaire :	50
III.9 Points importants avant d'installer le panneau solaire fixe :	50
III.9.1. <i>Choix de la direction et de l'angle du panneau solaire</i> :	51

<b>III.9.2. Choix de l'angle d'inclinaison du panneau solaire :</b> .....	51
<b>III.9.3. Installation de panneaux en parallèle ou en série :</b> .....	51
<b>III.9.4. Expérience de sélection de direction :</b> .....	52
<b>III.10. EVALUATION DES RESULTATS :</b> .....	54
<b>III.9 Conclusion :</b> .....	55
<b>Conclusion générale :</b> .....	57
<b>BIBLIOGRAPHIE:</b> .....	58

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis l'avènement de l'ère industrielle, l'homme n'a cessé de consommer ses réserves en énergies fossiles, jusqu'à se rendre compte que l'épuisement de celles-ci n'est qu'une question de siècles, voire d'années. Surtout que nos besoins en énergie croissent exponentiellement. La question énergétique étant au centre des préoccupations actuelles, il faut aujourd'hui trouver un équilibre entre les besoins désormais vitaux en approvisionnement énergétique, la préservation de l'écologie et la maîtrise des ressources à notre disposition. C'est dans ce contexte plus que critique, que notre intérêt pour les énergies renouvelables s'est éveillé. Celles-ci étant propres, très rapidement renouvelables voire inépuisables, elles devraient en théorie répondre à tous les besoins actuels et des générations à venir. Parmi ces sources inépuisables, la lumière du soleil est la plus abondante. Des estimations affirment qu'en une année celui-ci diffuse vers la terre plus de 40000 fois l'énergie consommée par la population mondiale. Autrement dit, l'exploitation correcte de cette source infinie constitue aujourd'hui un enjeu de taille, car les propriétés de cette énergie répondent aux attentes environnementales comme aux attentes industrielles [1].

Le soleil est une source d'énergie inépuisable, qui émet chaque jour sous forme de lumière l'équivalent de 27 années de consommation électrique. Il existe plusieurs moyens d'utiliser l'énergie du soleil, l'une d'entre elles est de transformer sa lumière en électricité grâce à des cellules photosensibles ; c'est ce que l'on appelle l'énergie solaire photovoltaïque [2].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules (PV) en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) [3].

Les modules PV travaillent avec la conversion directe de la lumière à une énergie électrique. La lumière du soleil est un ingrédient nécessaire et efficace. Ils travaillent avec le maximum d'efficacité quand la lumière incidente est perpendiculaire à leurs cellules. Donc, l'efficacité énergétique de ces systèmes dépend du degré d'utilisation et de la conversion du rayonnement solaire. Il y a deux manières pour maximiser le taux d'énergie utile : en optimisant la conversion et le degré d'absorption, et en augmentant le taux de rayonnement d'incidence en employant les systèmes d'orientation mécanique. Ces systèmes appelés suiveurs solaires ou traqueurs solaires [4].

Énergie solaire est disponible, non polluante et gratuite, c'est pourquoi, elle est de plus en plus utilisée, comme alternatives aux combustibles, dans la production d'électricité. L'Algérie possède

l'un des gisements solaires les plus élevés au monde, avec une durée d'ensoleillement sur la totalité du territoire national pouvant atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et le Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2263 KWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays [5].

L'Algérie réserve de multitude investissement dans la technologie photovoltaïque et ses applications à titre d'exemple le projet de HASSI R'MEL. Ce dernier consiste à mettre à profit des concentrateurs solaire Cylindro-parabolique muni des systèmes de poursuite solaire [5].

Notre travail est consacré à augmente le rendement énergétique d'un panneau photovoltaïque et nous avons partagé ce mémoire en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous décrivons l'effet photovoltaïque et son principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre est dédié à la compréhension d'un suiveur solaire.

Dans le troisième chapitre réalisation du suiveur solaire.

# **CHAPITRE I :**

**Principe de fonctionnement  
d'un système photovoltaïque**

## I.1 INTRODUCTION :

De nos jours, l'homme a à sa disposition sur la terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz) parce qu'elles sont faciles à exploiter, et rentables. Cependant ces énergies émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, notamment) qui participent fortement au réchauffement planétaire, qui devient un problème grandissant pour la terre et les êtres vivants.

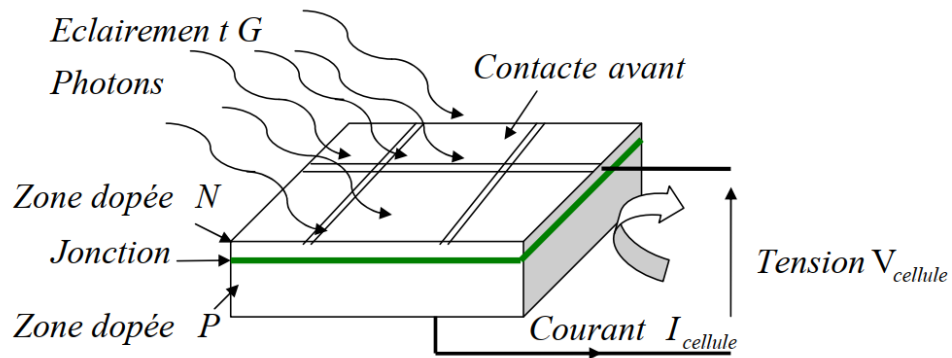
Mais il existe d'autres énergies non polluantes, renouvelables, abondantes partout sur la surface du globe qui pourraient pourtant être utilisées par l'homme. En outre, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire.

De ces énergie la plus raisonnable à exploiter est L'énergie solaire, elle est disponible partout à la surface du globe, en quantité égale dans l'année, et a un bon rendement grâce à la technologie actuelle. Elle est de plus en plus facile à exploiter. Elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. L'énergie photovoltaïque a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable [5]. C'est pour cela que nous avons décidé de l'étudier plus en détail. Mais comment exploiter au mieux cette énergie ? Et quels sont les enjeux liés à son utilisation.

## I.2 L'effet photovoltaïque :

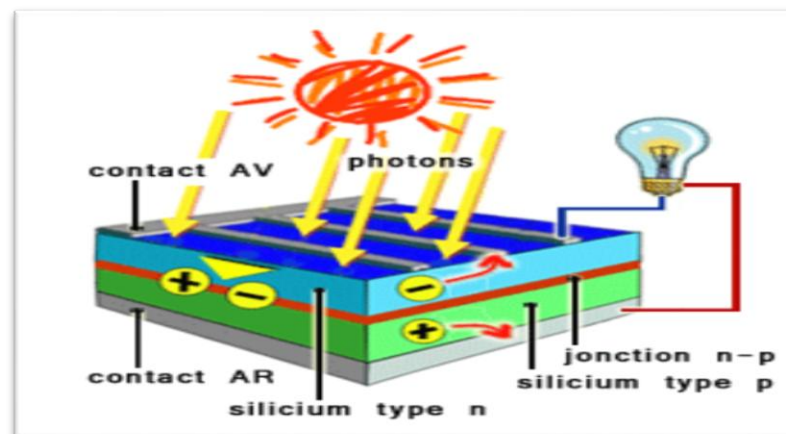
Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [6]. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La figure 1.1 illustre une cellule photovoltaïque (PV) typique où sa constitution est détaillée. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs [4].



**Figure I.1 : Coupe transversale d'une cellule PV typique [4].**

### I.3 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque :

Ce phénomène est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire. En effet, lorsque les photons de la lumière du soleil rentrent en contact avec ces matériaux particuliers, ils transmettent leur énergie aux électrons des semi-conducteurs qui génèrent alors une tension électrique [7].

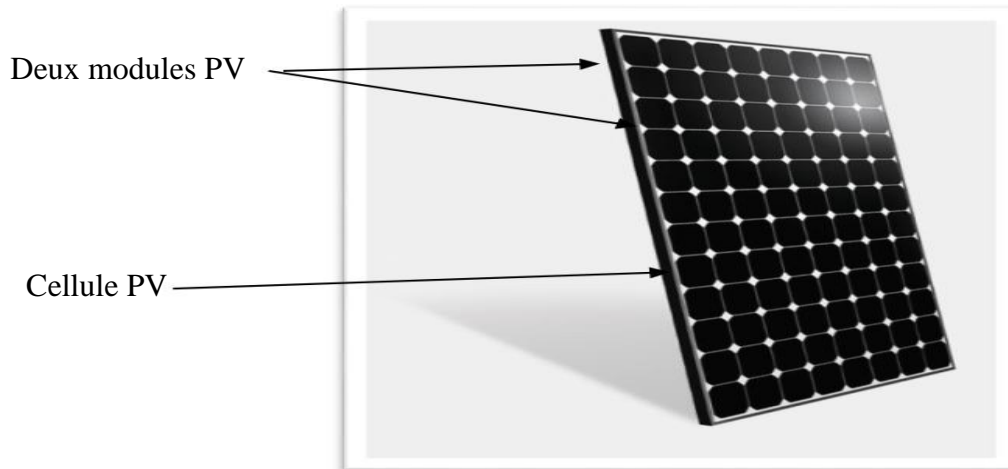


**Figure I.2 : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [7].**

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente. Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $h\nu$  à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [8].

### I.4 Panneaux solaire :

Le panneau solaire est un groupement de plusieurs modules, ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [9].

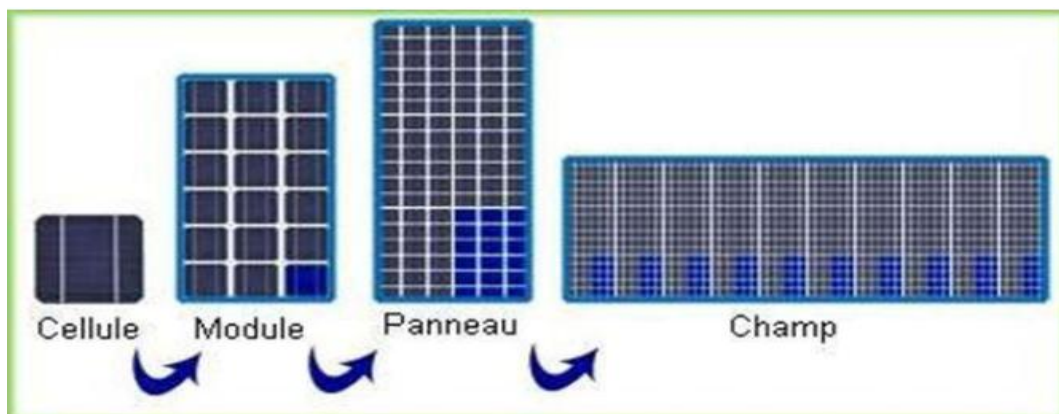


**Figure I.3: Exemple d'un panneau solaire**

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend de :

- La taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.
- Besoins en électricité.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage [9].



**Figure I.4 : Composants d'un champ de modules photovoltaïques [1].**

#### I.4.1 Les rendements :

Des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20% (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple [3].

### I.4.2 Composition d'un module solaire photovoltaïque :

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de cinq éléments:

- Verre solaire fin (2 mm).
- Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle): pour résister aux intempéries et à l'humidité.
- Cellule photovoltaïque.
- Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle) [1].

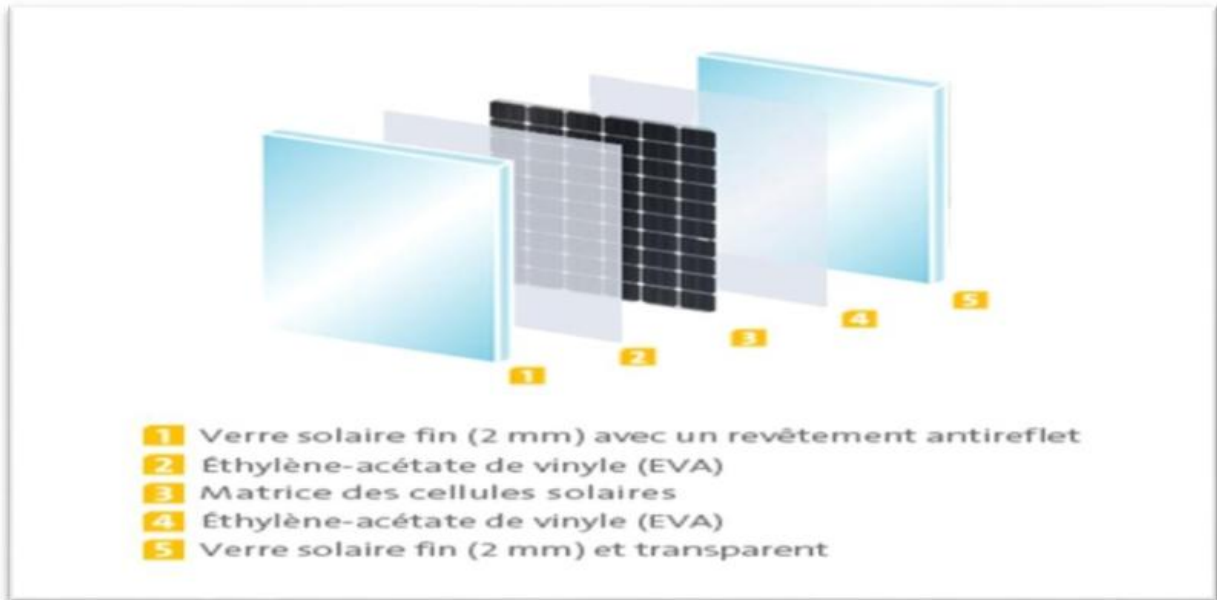


Figure I.5 : Composition d'un module PV [1].

### I.5 Les Différents Types de Panneaux Photovoltaïques :

#### I.5.1 Les Panneaux photovoltaïques monocristallins :

Les panneaux solaires monocristallins sont des panneaux photovoltaïques fabriqués à base de silicium pur. Ils présentent un rendement le plus élevé [18 à 24%]. Les panneaux solaires monocristallins sont notamment recommandés dans les zones à fort ensoleillement [11].



Figure I.6 : Panneau monocristallins [10]

### I.5.2 Les panneaux photovoltaïques poly cristallins :

Aujourd'hui, ce sont les panneaux photovoltaïques les plus utilisés au monde en offrant un meilleur compromis entre prix et performance ils présentent un taux de rendement [14 à 18%]. Alors que les cellules d'un panneau solaire monocristallin sont constituées d'un seul cristal de silicium de grande taille, les cellules du panneau solaire poly cristallin sont issues de la fonte de chutes de silicium monocristallin. Les morceaux sont chauffés, fondus puis refroidis et assemblés pour créer une cellule. L'ensemble des cellules rassemblées forme un panneau poly cristallin [11].



**Figure I.7 : Panneau poly cristallins [11].**

### I.5.3 Les panneaux solaires amorphes :

Enfin, il y a les panneaux photovoltaïques à base de cellules amorphes. Elles sont produites à partir de « *gaz de silicium* ». Ce type de cellules, sont adaptés aux régions à faible ensoleillement. Celui-lui, possède le moins bon rendement [5 à 7%]. Ce type de silicium est moins cher que les siliciums cristallins, ils représentent aujourd'hui environ 10 % du marché des panneaux photovoltaïques. On les différencie grâce à leur couleur gris foncé uniforme [10].



**Figure I.8 : Panneau amorphes [10].**

### I.5.4 Le rendement de la cellule photovoltaïque :

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S} \quad (I - 1)$$

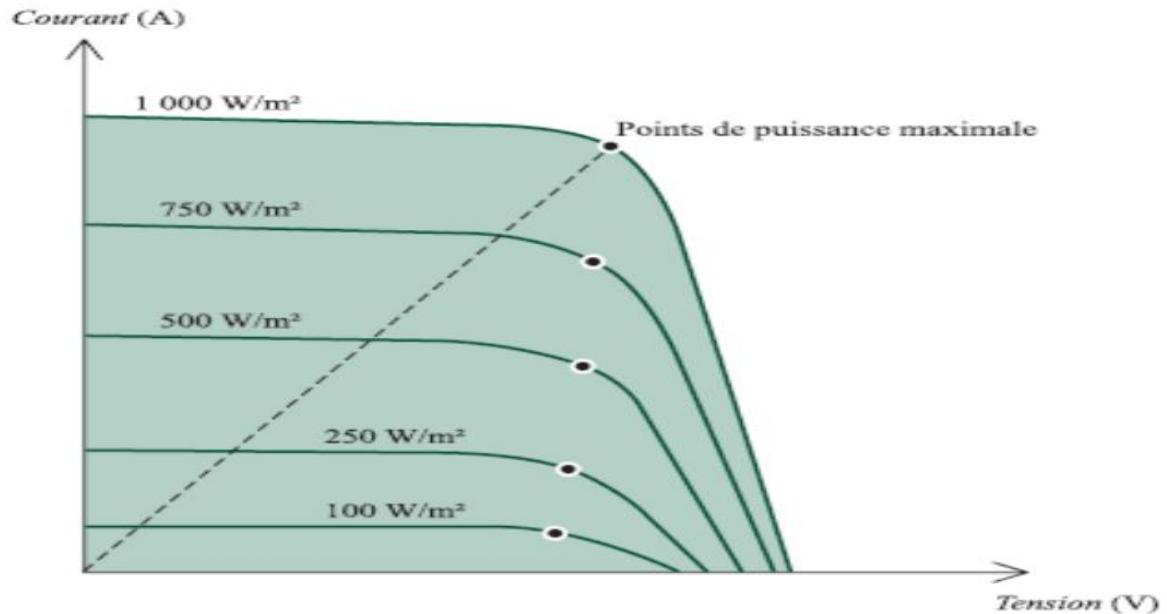
Avec:

- $\eta$  : rendement énergétique.
- $E$  : éclairement ( $\text{w}/\text{m}^2$ ).
- $S$  : surface active de la cellule ( $\text{m}^2$ ).
- $P_m$  : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC) :

Standard Test Condition, c'est-à-dire sous l'ensoleillement de  $1000 \text{ w}/\text{m}^2$ , à la température de  $25^\circ \text{C}$  sous un spectre AM 1,5. Type de rayonnement, quantité d'énergie, température, la surface de la cellule et de ses caractéristiques dimensionnelles, la forme de la cellule et conditions ambiantes de fonctionnement de la cellule (température extérieure, vitesse du vent, etc...). Détermine L'énergie électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque. Le rendement d'une cellule photovoltaïque est généralement faible (10 à 20 %). Les meilleurs rendements peuvent être obtenus avec des techniques expérimentales (technologie multicouches) qui sont coûteuses et difficiles à mettre en œuvre ou avec de nouveaux matériaux comme l'arséniure de gallium qui donne des rendements supérieurs à 25 % en laboratoire). Actuellement le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium qui représente une solution économique.

### I.5.5 Influence de l'éclairement :

L'éclairement reçu sur la surface de la cellule photovoltaïque parmi les facteurs qui déterminent l'énergie produite, la figure représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement avec une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes, le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire par contre la tension ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [12] [13].



**Figure I.9 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement [13].**

### I.5.6 Influence de la température :

L'influence de la température ambiante est très importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. La température est un paramètre essentiel puisque les cellules qui sont exposées aux rayonnements solaires sont susceptibles de s'échauffer. D'autre part, le rayonnement solaire absorbé n'est pas converti totalement en énergie électrique, une partie se dissipe sous forme de chaleur, c'est pour cela que la température de la cellule photovoltaïque est toujours plus élevée que la température ambiante [12] [13].

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (T_{UC} - 20) \quad (I - 2)$$

Avec :

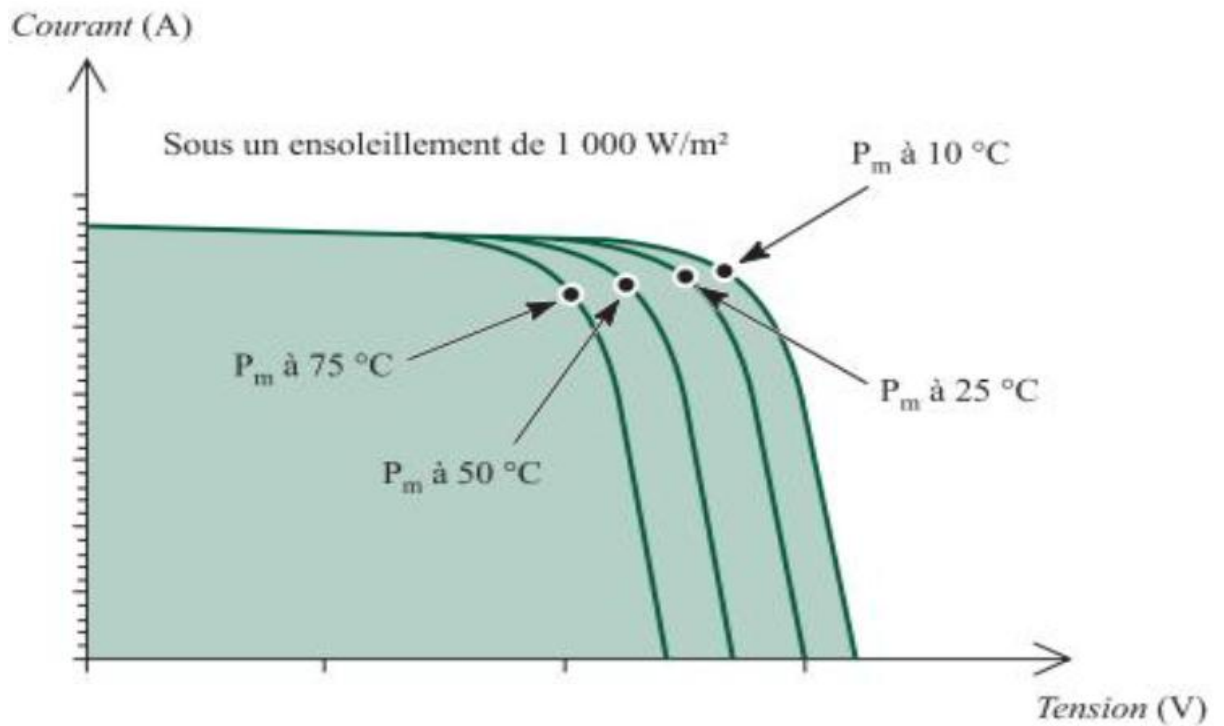
$T_c$  : Température de la cellule (°C)

$T_a$  : Température ambiante (°C)

$E_m$  : Éclairement moyen ( $W/m^2$ )

$T_{UC}$  : Température d'utilisation de la cellule (°C)

Le graphique de la figure (I-11) montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec l'augmentation de la température, plus la température augmente et moins la cellule est performante. D'autre part, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale [13].



**Figure I.10 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température. [13]**

Le comportement global de la cellule en température est une perte de 0,4 à 0,5 %/° C [2].

### I.6 Système de poursuite solaire :

Un traqueur solaire ou suiveur solaire est un système utilisant le principe de l'héliostat. C'est une structure portante qui permet d'orienter les capteurs solaires constamment vers le soleil. Ceci permet d'en augmenter la productivité de manière substantielle. Suivre le soleil d'une manière rigoureuse ne peut se faire que sur deux axes : en azimut (d'Est en Ouest, à mesure de l'avancée de la journée) et en inclinaison des capteurs (selon l'avancée du jour) : suiveur à deux axes. Toutefois, il existe des suiveurs à un seul axe, typiquement en azimut, l'angle d'inclinaison étant fixé selon l'optimum local [14].

#### I.6.1 Etat de l'art des suiveurs solaires :

Les premières applications des suiveurs solaires remontent vers les années 1750 où le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat. La rotation du miroir de l'héliostat est assurée par un mécanisme d'horlogerie. La plus ancienne mention du système se trouve dans des publications datant de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacobs Gravesande [15].

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 principe se rencontre dans diverses installations utilisant l'énergie solaire, notamment les centrales solaires à concentration appelées champs d'héliostats. Un exemple en France est la centrale solaire Thémis qui, après avoir fonctionné de 1983 à 1986, fait l'objet d'une nouvelle expérimentation depuis 2007 [15].

### I.6.2 Les type de suiveur solaire :

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

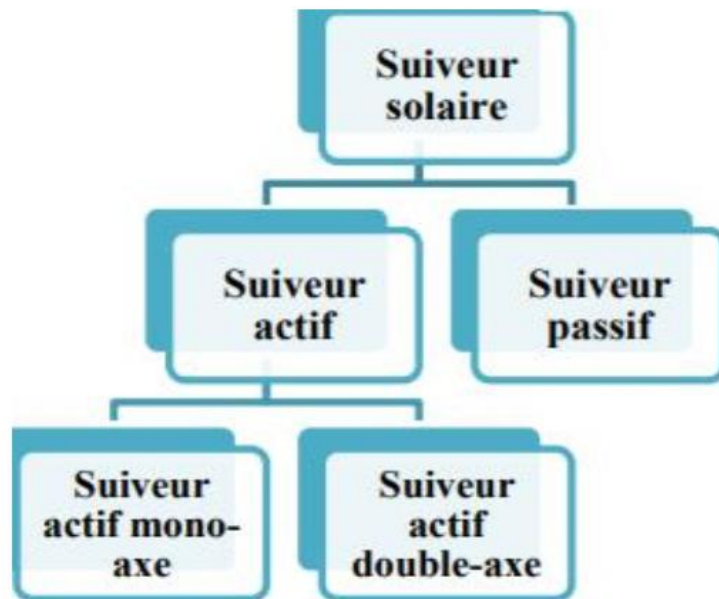


Figure I.11 : Types de suiveur solaire.

#### I.6.2.1 Suiveur actif :

Il détecte la lumière suivant la trajectoire solaire en cherchant à optimiser au maximum l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface. On trouve deux types de suiveur mono-axe et double -axe.

##### I.6.2.1.1 Suiveur solaire mono-axe :

Il permet une rotation selon l'axe d'azimut seulement, c'est-à-dire d'est en ouest, L'angle d'inclinaison du panneau est fixe. Il est placé selon l'angle le plus propice a recevoir un maximum de rayons de soleil, il est le plus souvent utilisé en raison de sa simplicité [3].

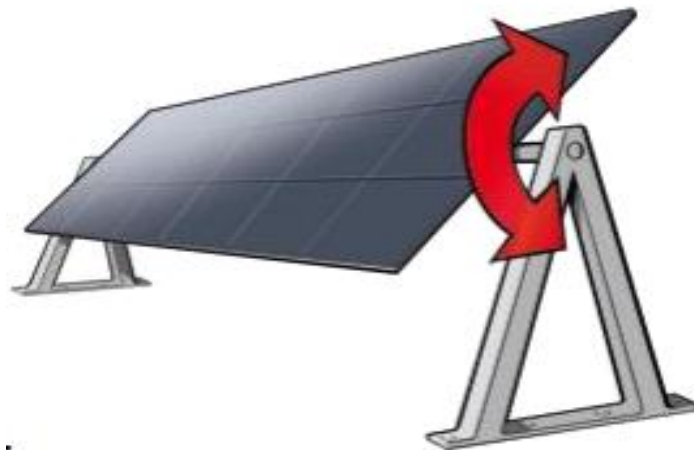


Figure I.12 : Suiveur mono-axe.

### I.6.2.1.2 Suiveur solaire double-axe :

Contrairement au suiveur mono-axe, ce type de suiveur possède deux axes: un horizontal et un autre vertical, qui lui permet de suivre les mouvements en azimut et en inclinaison. Ce type de système fournit de meilleures performances, et est généralement employé pour commander les télescopes astronomiques [16].

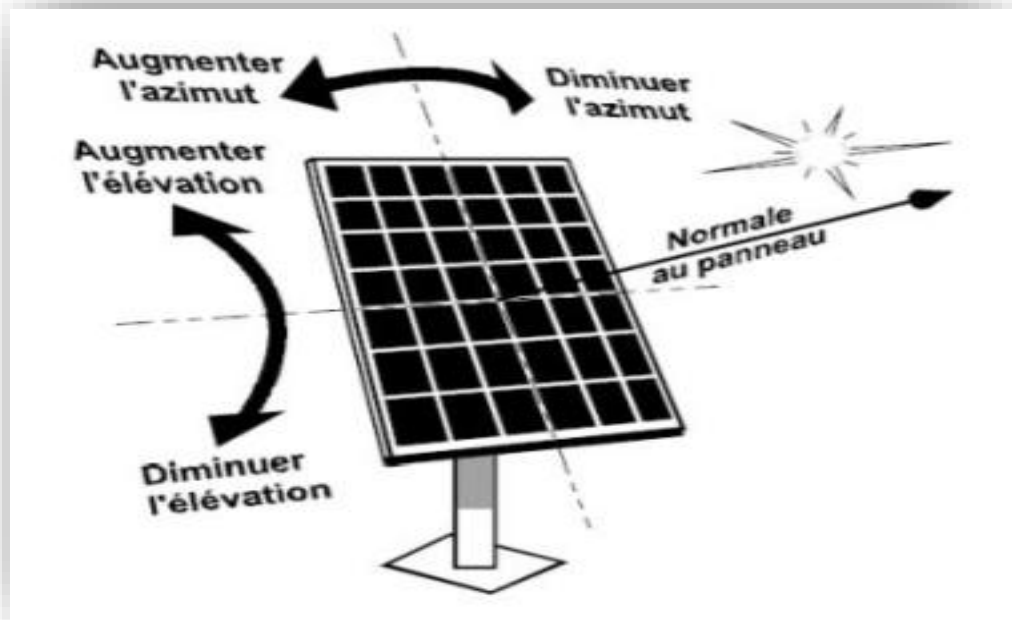


Figure I.13: Suiveur double-axe.

## I. 7 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons détaillé plusieurs notions en relation avec l'énergie photovoltaïque, cette dernière qui joue un rôle très important dans la vie, elle possède de différentes formes, sources et applications ce qui rend comme étant un domaine d'étude très vaste. Aussi, nous avons exposé les différents types de suiveur solaire ainsi que leur rôle.

Dans le deuxième chapitre, nous allons parler sur le côté matériel et les dispositifs utilisés afin de réaliser notre suiveur solaire.

# **Chapitre II :**

**Les différents éléments constitutifs  
de système de suiveur**

## II.1 Introduction :

Après avoir présenté un état de l'art sur les systèmes photovoltaïques, la technique des suiveurs solaire et leurs avantages par rapport aux stations fixes maintenant dans ce chapitre, on présentera cette technique et les différents dispositifs expérimentaux que nous avons utilisé pour réaliser notre suiveur « un suiveur à double axes à base des capteurs de lumières ». Ce système est composé de deux parties ; une partie mécanique qui comporte le panneau solaire et une partie électronique constitué des capteurs de lumières, une carte Arduino et deux servomoteurs.

## II.2 Un schéma synoptique :

Le schéma synoptique général de notre suiveur du soleil est présenté par la figure II .1. Que nous proposons pour améliorer le rendement du panneau photovoltaïque.

Ce système est basé sur la comparaison des tensions délivrer par des capteurs photovoltaïques et d'envoyer ces tensions ver la carte Arduino. Elles vont être converti dans cette dernière en valeur numérique puis on fait la comparaison et gère la commande des deux moteurs à fin de rétablir la position d'équilibre entre les capteurs pour avoir un grand rendement.

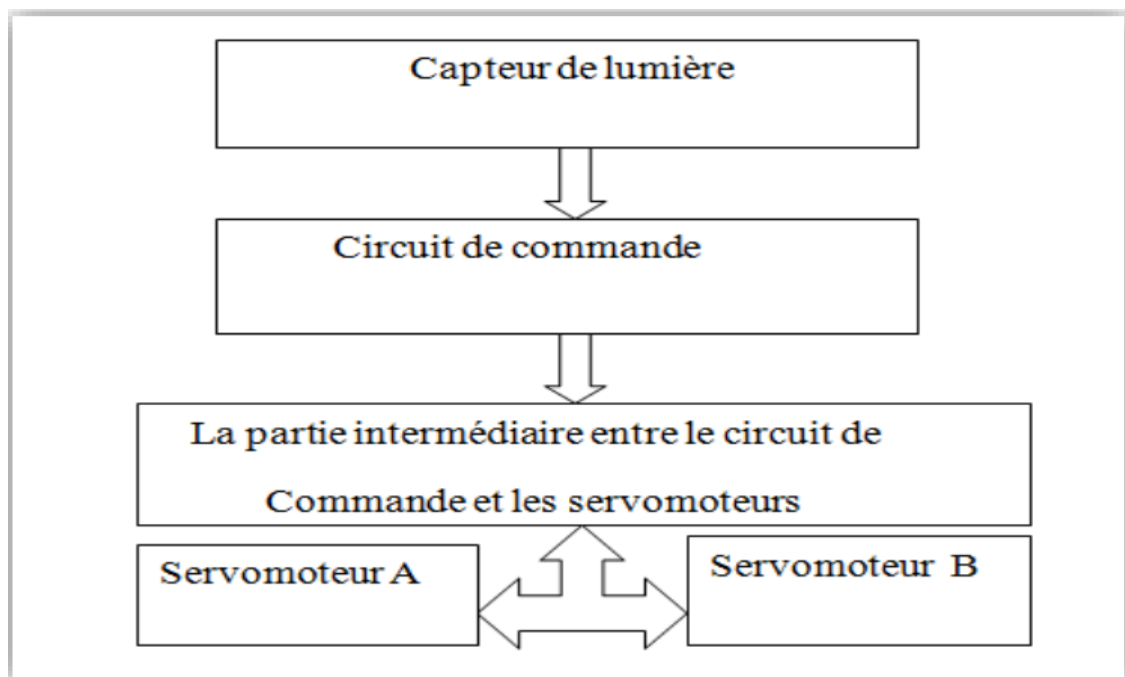


Figure II .1 : Schéma synoptique de notre suiveur du soleil.

## II.3 Études des différents composants :

### II.3.1 Capteur de lumière (LDR) :

Le capteur qu'on a utilisé est la photorésistance ou LDR (*Light Dependent Resistor*). C'est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle elle est exposée [17]. En effet, sa résistance varie en fonction du flux lumineux incident, elle est inversement proportionnelle à la lumière reçue. Le choix s'est porté sur cette dernière vu que son temps de réponse est beaucoup plus court par rapport à la photodiode [18].

De plus, une photorésistance est sensible à la chaleur et réagit différemment en fonction des couleurs. La mesure sera donc légèrement différente s'il fait très chaud ou très froid. De même, la valeur mesurée sera différente en fonction de la couleur de lumière [3].

#### II.3.1.1 Leur principe :

Le capteur LDR est une photorésistance, une cellule photo-électrique sensible à l'intensité lumineuse qu'elle traduit en produisant un petit courant électrique sensible à la quantité de la lumière reçue ; une variation de lumière provoque une variation de signal. La sensibilité du capteur LDR est proportionnelle à la lumière reçue : plus le flux lumineux sera intense la plus le nombre d'électrons disponibles pour assurer une grande conduction [19]. La figure II.4 illustre la courbe caractéristique d'une cellule photorésistance la sensibilité de cette dernière est grande, la résistance peut passer de plus d'un million d'ohm à moins de 1000 ohms quand l'éclairement passe de l'obscurité (<0.1lux) à une valeur de 100 à 1000 lux [20].

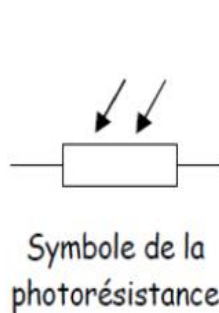


Figure II.2 : Symbole et capteur LDR [1].

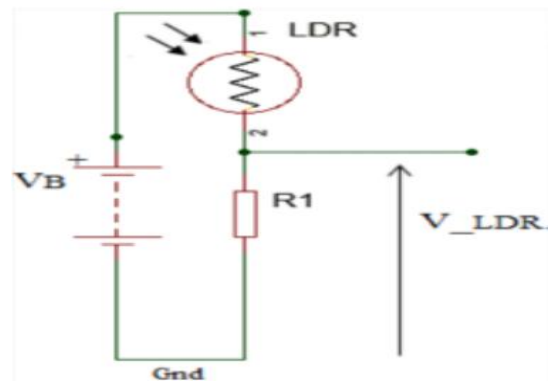


Figure II.3 : Circuit équivalent du capteur LDR utilisé [1].

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

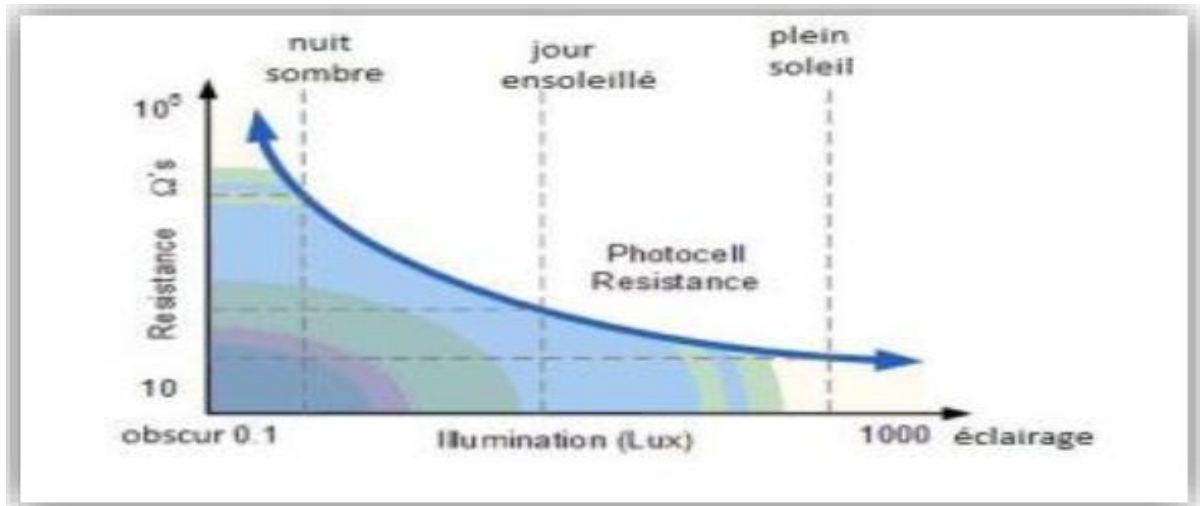
$$V_{out}(LDR) = \frac{V_{in}(B) * R_1}{(R_{LDR} + R_1)} \quad (II.1)$$

Sachant que:

$V_{out}(LDR)$  : est la tension de sortie de la photorésistance (V)

$V_{in}(B)$  : tension de batterie ( tension d'alimentation) (V)

$R_{LDR}$  : résistance de la LDR ( $\Omega$ )



**Figure II.4 : Caractéristiques d'une photorésistance [19].**

### II.3.1.2 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) [11].

### II.3.2 Le 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 [3].

#### II.3.2.1 Définition de l'Arduino

Arduino est une carte électronique programmable destiné pour réaliser des différentes applications et des projets dans des différents domaines comme la robotique. En trouve plusieurs catégories d'Arduino et chaque arduino sa se défier par rapport a l'autre par le nombre de pins d'entre sorties analogiques / numériques au analogiques ; l'arduino MEGA offre un nombre d'entrée/sorties beaucoup plus important(54 contre 14) et un processeur plus puissant et une vaste mémoire et on a aussi arduino UNO 14/6 d'entrée/ sorties numériques et6 entrées analogiques par contre dans l'arduino NANO nombres d'entrées/sorties numériques est 14/16 et possède 8 entrées analogiques enfin l'arduino mini qui possédé aussi 16/6 entrées/sorties numériques et 8 entrées analogiques [18].

Dans notre projet en a utilisé la carte arduino UNO.



**Figure II .5 : présentation (captures + actionneurs) de la carte Arduino.**

Le mot Arduino = 1 carte à microcontrôleur + 1 outil de développement + 1 communauté active Le logiciel et le matériel sont open-source [3].

#### II.3.2.1.1 Composants du notre prototype :

Les composants sont à base électronique, chaque élément est caractérisé selon les conditions d'utilisation.

#### II.3.2.1.2 Présentation de la Carte ARDUINO UNO :

Très simple à utiliser, elle se programme et peut s'utiliser directement en la connectant à un ordinateur sous OS Windows, Mac ou Linux [11].

L'Arduino UNO est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega328. Elle est dotée de 14 broches Entrées/Sorties numériques dont 6 en PWM et 6 configurables en entrées analogiques, d'un

oscillateur à quartz 16 MHz, d'une connexion USB, d'un jack d'alimentation, d'un support ICSP et d'un bouton reset. La carte Arduino UNO est livrée prête à fonctionner, il suffit de la connecter à un ordinateur par le câble USB et de l'alimenter à l'aide d'un adaptateur USB ou de piles [11].

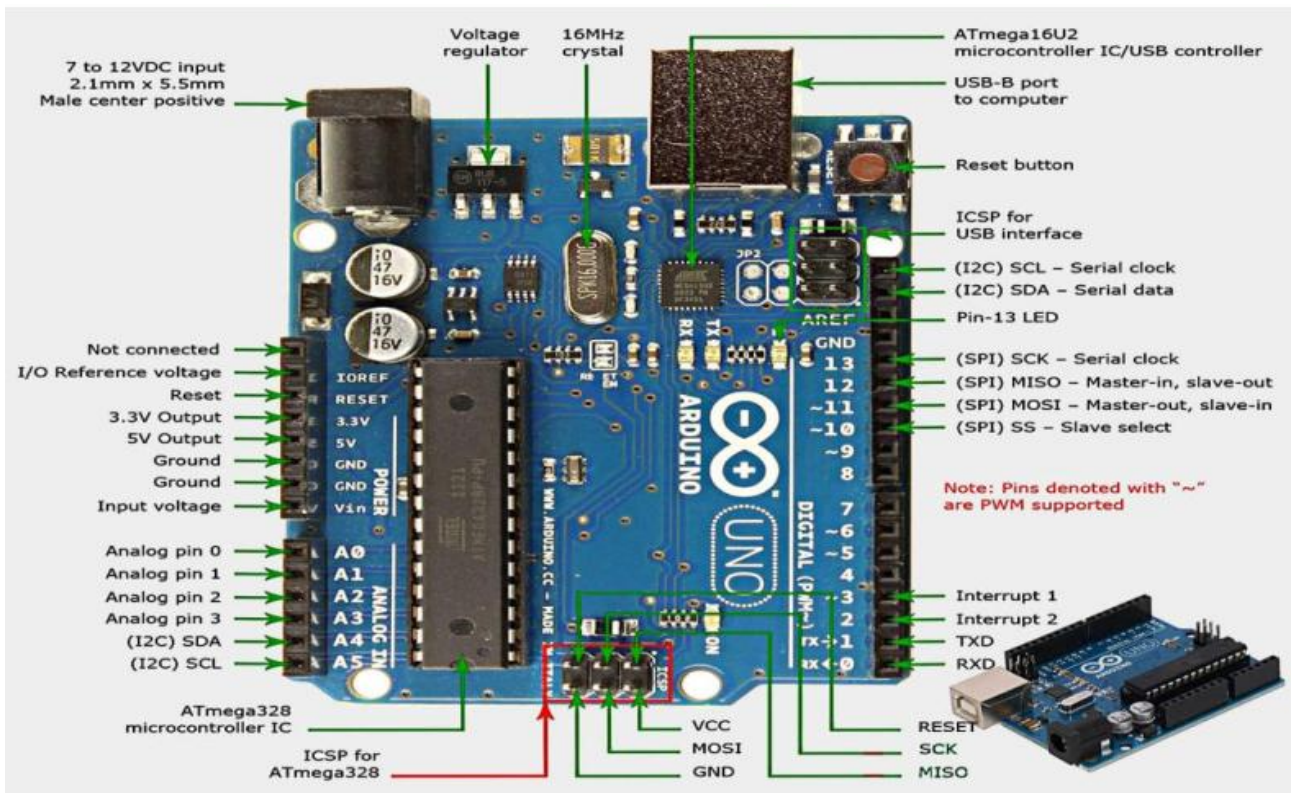


Figure II .6 : La carte Arduino [11].

### II.3.2.1.2 L'en-tête ICSP à 6 broches :

ICSP est un moyen de programmer Arduino, ou un avantage pour utiliser Arduino en tant que programmeur ISP. le travail de l'interface USB ICSP dans Arduino Verrouillez le port USB pour éviter les fuites de données [21].

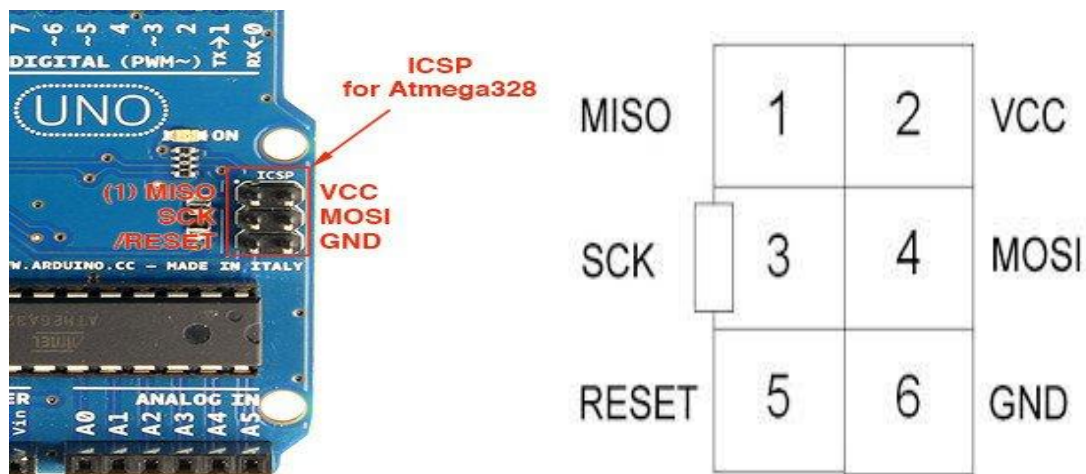


Figure II .7 : Connecteur ICSP en un Arduino UNO [22].

### **II.3.2.1.3 Les Caractéristiques de la carte ARDUINO UNO :**

- Tension d'alimentation interne = 5V.
- tension d'alimentation (recommandée)= 7 à 12V, limites =6 à 20 V.
- Entrées/sorties numériques : 14.
- Courant max par broches E/S = 40 mA.
- Courant max sur sortie 3,3V = 50mA.
- Mémoire Flash 32 KB dont 0.5 KB utilisée par le boot loader Mémoire SRAM 2 KB mémoire EEPROM 1 KB.
- Fréquence horloge = 16 MHz
- Dimensions = 68.6mm x 53.3mm
- L'interface USB /série.

### **II.3.2.1.4 Le microcontrôleur :**

Un microcontrôleur ATMEGA 328T-PU est un petit processeur informatique relié à des entrées et des sorties numériques (0 ou 1) ou analogiques (tension variable). Il est capable de mémoriser et d'exécuter un programme visant à interpréter les entrées pour agir sur les sorties. Il se programme en général à l'aide d'un ordinateur mais peut fonctionner de manière autonome. Ils sont en général programmés en C/C++ et nécessitent des connaissances approfondies en électronique. Mais des différences peuvent apparaître pour des fonctions plus complexes [11].

### **II.3.2.1.5 L'alimentation électrique :**

Commençons par la tension d'alimentation, car sans elle, rien n'est possible. Il existe différentes possibilités. Quand nous travaillons avec Arduino ou que nous le programmons, il est indispensable d'établir une connexion USB avec l'ordinateur. Cette liaison assure deux fonctions :

- Transmettre l'indispensable tension d'alimentation de 5 V ;
- Offrir un canal de communication entre l'ordinateur et la carte Arduino.
- Les deux fonctions sont remplies par le port USB
- La tension d'alimentation doit être comprise entre 7 et 12 V CC (CC = courant continu). Vous trouverez de plus amples informations [11].

### **II.3.2.1.6 Entrées/sorties :**

C'est par ces connexions que le microcontrôleur est relié au monde extérieur.

Une carte Arduino standard est dotée de :

- 6 entrées analogiques.
- 14 entrées/sorties numériques dont 6 peuvent assurer une sortie PWM

Les entrées analogiques lui permettent de mesurer une tension variable (entre 0 et 5 V) qui peut provenir de capteurs ou d'interfaces divers (potentiomètres, etc.). Les entrées/sorties numériques reçoivent ou envoient des signaux « 0 » ou « 1 » traduits par 0 ou 5 V. On décide du comportement de ces connecteurs (entrée ou sortie) en général dans l'initialisation du programme mais il peut être aussi changé dans le corps du programme [11].

#### II.3.2.1.7 Câble USB :

Le câble USB est utilisé pour l'alimentation de la carte Arduino et la connexion avec l'ordinateur.

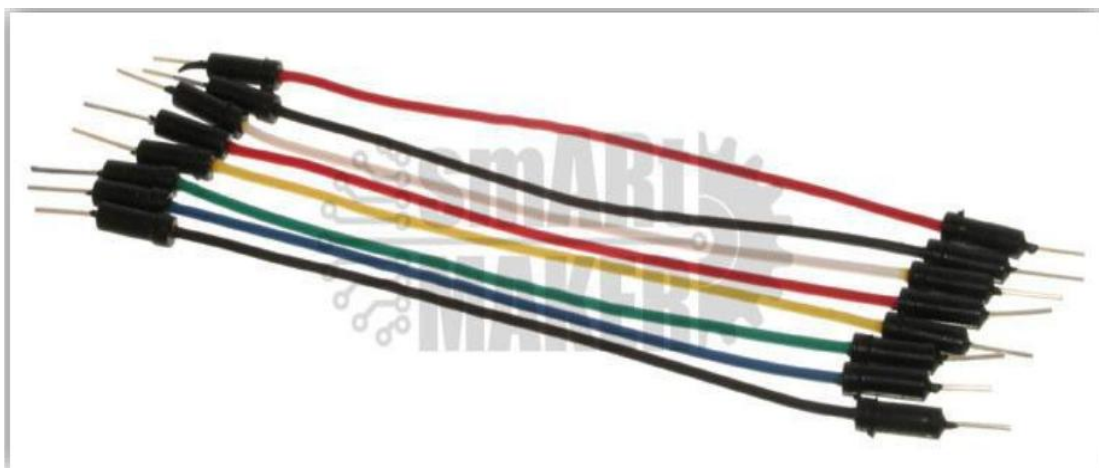


**Figure II.8 : Câble USB type A/B (Arduino UNO)[23].**

Le câble USB permet à la fois d'alimenter un projet Arduino, de programmer la carte (via Arduino IDE) mais aussi d'utiliser le Moniteur Série [24].

#### II.3.2.1.8 Fils de pin d'arduino :

Ces fils sont utilisés pour relier et connecter les différentes pins d'arduino à la plaque d'essai et sont illustrés à la figure II.10.



**Figure II.9 : Fils de pins utilisés pour arduino [19].**

### II.3.2.1.9 Programmation :

La carte Arduino UNO est une carte programmable, elle peut être programmée avec le logiciel Arduino qui représenté dans Figure II .11. Nous avons préféré de photographier l’interface du logiciel Arduino dans laquelle nous avons simulé notre programme.

```

solar_tracker

/*
  TESTE DO SEGUIDOR COM SENSORES DE LOCALIZAÇÃO DO SOL
  este teste foi retirado do dominio publico e foi adaptado à função do seguidor

  as ligações do relé aos motores devem seguir esta ordem:
  Negativo M-S - relé 1 (-)
  Positivo M-S - relé 2 (+)
  Positivo E-O - relé 3 (+)
  Negativo E-O - relé 4 (-)

  Este programa inclui um botão para ser acionado manualmente para
  o seguidor entrar em posição neutra.
*/

// LDR pin connections
// name = analogpin:
int ldr1l = 0; //LDR top left   ///?????/// Use the names A0, A1, A2, and A3 when talking about analog inputs
int ldr1r = 1; //LDR top right  ///?????/// Use the names A0, A1, A2, and A3 when talking about analog inputs
int ldr2l = 2; //LDR down left  ///?????/// Use the names A0, A1, A2, and A3 when talking about analog inputs
int ldr2r = 3; //LDR down right ///?????/// Use the names A0, A1, A2, and A3 when talking about analog inputs

//digital pins
///?????/// Use "const int NS1 = 2;" in place of "#define NS1 2" to allow the compiler to better check for errors
#define NS1 4 // NS1 = Norte-Sul + numero do relé + pin
#define NS2 5 // NS2 = Norte-Sul + numero do relé + pin
#define EO3 6 // EO3 = Este-Oeste + numero do relé + pin
#define EO4 7 // NS4 = Este Oeste + numero do relé + pin

//Botao para colocar o seguidor em posição neutra

```

Figure II .10 : Interface du Partie de programmation dan logiciel Arduino.

### II.3.2.2 Servomoteur :

#### II.3.2.2.1 Définition :

Un servomoteur est un système qui a pour but de produire un mouvement précis en réponse à une commande externe, C'est un actionneur (système produisant une action) qui rassemble différents domaines :

l'électronique, la mécanique et l'automatique. Un servomoteur est composé d'un :

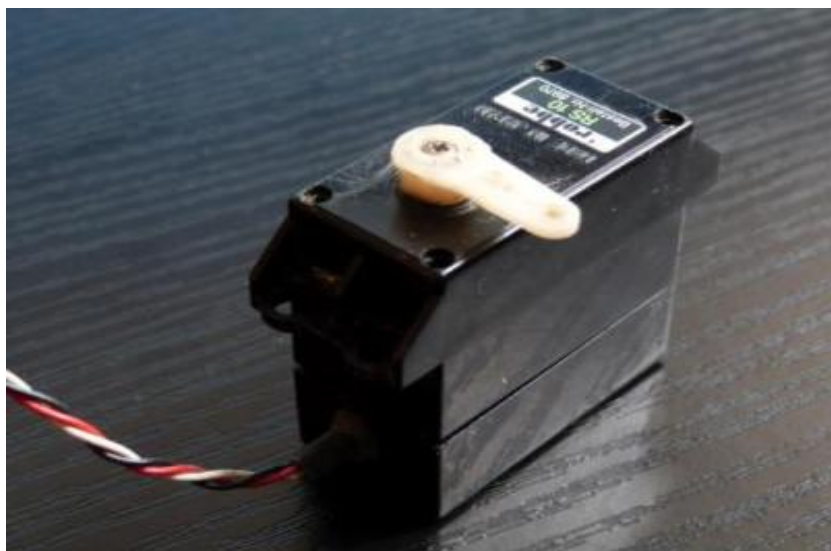
- moteur à courant continu.
- axe de rotation.
- capteur de position de l'angle d'orientation de l'axe (très souvent un potentiomètre)
- carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu .

Un servomoteur est capable d'atteindre des positions prédéterminées dans les instructions qui lui on était donné, puis de les maintenir. Le servomoteur à l'avantage d'être asservi en position angulaire, cela signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera la consigne d'instruction que vous lui avez envoyée à son entrée. Si, un obstacle sur la route essaye de faire changer les coordonnées de la trajectoire du servomoteur, ce dernier conservera la position programmée. Pour un ajustement précis de la position, le moteur et son réglage sont équipés d'un système de mesures qui détermine la position habituelle [1].



**Figure II.11 : Servomoteur chinois 9 g.**

Il existe plusieurs types de servomoteurs de taille, de poids et de toutes puissances différents. En général, la sortie varie entre 0 et 180° (standard).



**Figure II.12 : Servomoteur Artimon FEDOROV [1].**

### II.3.2.2 Le principe de fonctionnement interne d'un servomoteur :

Les servomoteurs contiennent un petit moteur connecté via des engrenages à un axe de sortie. L'axe de sortie qui pilote le bras du servomoteur est aussi connecté à un potentiomètre afin de fournir une rétroaction (feedback) de la position à un circuit de contrôle interne. La partie électrique d'un servomoteur ne dispose que de 3 fils codés par couleur, pour des servomoteurs type modélisme 5 fils pour des servomoteurs de grosse puissance comme Mastodonte 9944 et Mammouth 38055, qui permettent d'alimenter le moteur et de lui transmettre des ordres de positions sous forme d'un signal codé en largeur d'impulsion plus communément appelés **PWM** ou **RCO**. Cela signifie que c'est la durée des impulsions qui détermine l'angle absolu de l'axe de sortie et donc la position du bras de commande du servomoteur. Le signal est répété périodiquement, en général toutes les 20 millisecondes, ce qui permet à l'électronique de contrôler et de corriger continuellement la position angulaire de l'axe de sortie, cette dernière est mesurée par le potentiomètre. Lorsque le moteur tourne, l'axe du servomoteur change de position, ce qui modifie la résistance du potentiomètre. Le rôle de l'électronique est de commander le moteur pour que la position de l'axe de sortie soit conforme à la consigne reçue : c'est un asservissement

- Une impulsion de 1 milliseconde correspondant à un angle de  $0^\circ$ .
- Une impulsion de 2 millisecondes correspond à UN angle de  $180^\circ$ .
- En envoyant une impulsion d'une longueur intermédiaire, on obtient des angles différents,  $90^\circ$  avec une impulsion de 1,5-milliseconde par exemple [1].

**PWM** : La modulation de largeur d'impulsions.

**RCO** : Rapport Cyclique d'Ouverture.

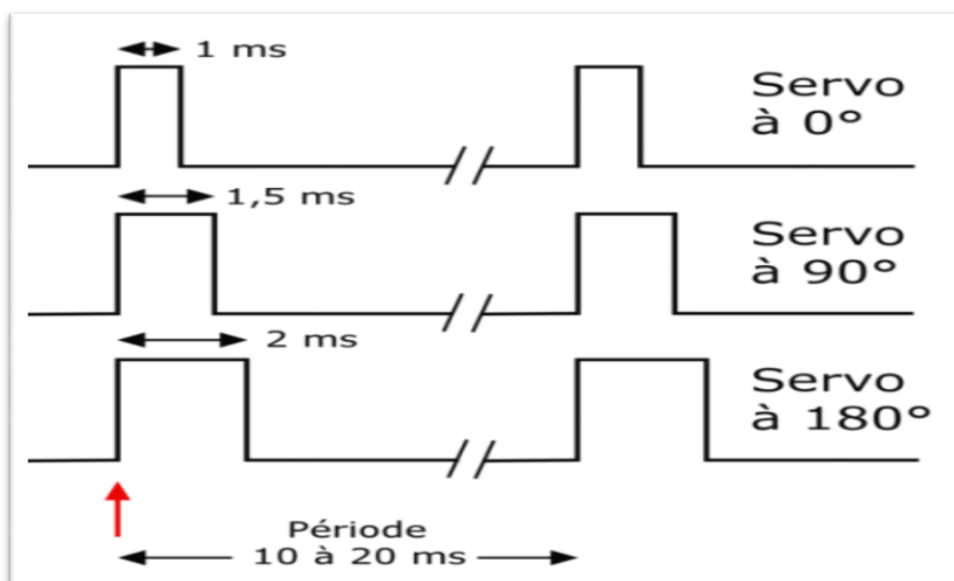


Figure II.13 : Lustration du signal de contrôle d'un servomoteur [7].

### II.3.2.3. Mini panneau solaire :

#### II.3.2.3.1. Définition :

Le panneau solaire est destiné à récupérer l'énergie du rayonnement solaire pour la transformer en énergie électrique (Figure II.5).



**Figure II.14 : Panneau solaire.**

#### II.3.2.3.2. Caractéristique du panneau

Modèle : ZW-11069

Marque : Zhiwang

Taille : 110X69X3mm

Puissance de crête : 1,06 W

Tension maximale : 5,0 V

Courant maximum : 0,21 A

Tension ouverte : 5,5 V

Courant court : 0,22 A

Poids : 0.1KG

Taux de conversion élevé, rendement élevé

Excellent effet de lumière faible

Matériau : Silicium poly cristallin (voir chapitre I)

Faible cout

**II.3.2.4. Les Alimentations utilisées :**

Chaque Le dispositif électronique a une Tension d'alimentation (v) et sa propre Source d'alimentation, qui sont résumées dans le Tableau n° 1.

Tableau n° 1 : les alimentations utilisées

<b>Le dispositif électronique</b>	<b>Tension d'alimentation (v)</b>	<b>Source d'alimentation</b>
<b>La carte Arduino UNO</b>	<b>5v</b>	<b>Ordinateur</b>
<b>Les deux servomoteurs</b>	<b>5v</b>	<b>La carte Arduino</b>

**II.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents dispositifs utilisées dans ce projet pour assurer un bon fonctionnement de système ainsi qu'une fiabilité énorme. Dans le chapitre qui suit, nous allons voir les différentes détails et étapes de réalisation de notre suiveur.

# **Chapitre III :**

## **Réalisation de suiveur solaire**

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une vue d'ensemble du dispositif expérimental que nous avons réalisé. Ce système est constitué d'une partie mécanique qui sert à supporter le panneau et le diriger vers le rayonnement perpendiculaire du soleil et également une partie électronique constituée des capteurs solaires, une carte microcontrôleur « Arduino » et des servomoteurs. Après avoir présenté tous les dispositifs de notre système maintenant nous sommes arrivées à la dernière tâche qui la plus importante dans ce mémoire, la conception et la réalisation de suiveur solaire, on a divisée notre chapitre en trois grandes phases : Une partie qui s'intéresse sur les différents blocs de système, la simulation et la dernière phase sur la réalisation.

### III.2. La première partie (les différents blocs de notre système) :

#### III.2.1. Notre objectif :

Notre projet vise à étudier et réaliser un modèle de microcosme permettant de suivre l'énergie solaire sur deux axes principaux, la direction de cette dernière vers l'est, l'ouest, le nord et le sud afin d'obtenir un maximum d'énergie solaire pendant la journée, et ce système est piloté par une carte arduino UNO.

#### III.2.2 le fonctionnement de système :

Notre projet est basé sur quatre blocs :

##### III.2.2.1 Bloc des capteurs de lumières (LDR) :

Comme nous avons déjà expliqué dans le chapitre II, le capteur de lumière ou la photorésistance est une résistance variable en fonction de flux lumineux et la variation de la lumière provoque un signal. Les quatre capteurs (LDR) sont branchés aux entrées analogiques (A0, A1, A2, A3) de circuit de commande qui est l'Arduino comme montrer dans la figure III.1.

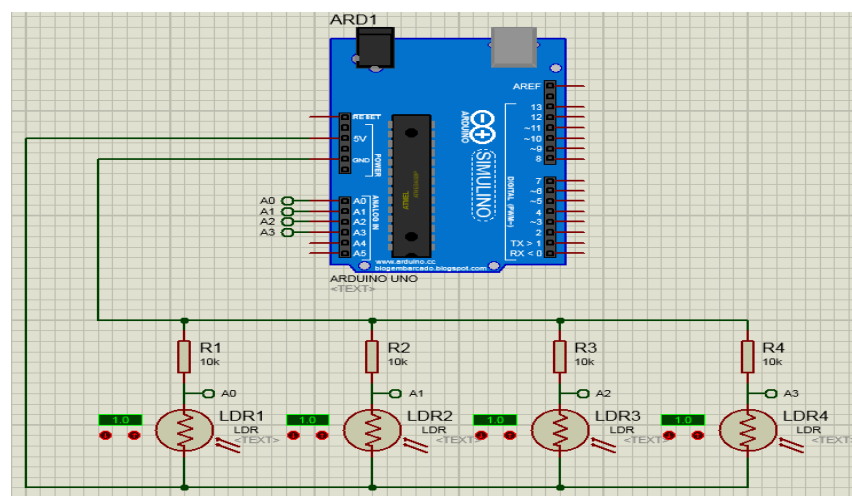


Figure III.1 : Simulation par logiciel PROTEUS du branchement électrique des quatre LDRs à l'Arduino.

### III.2.2.2. le bloc de commande :

Ce bloc est constitué de la carte Arduino qui est porte un programme (suite d'instructions) qui sert à gérer les deux modes selon les conditions de système.

### III.2.2.3. Bloc d'alimentation de 5V :

Ce bloc sert particulièrement à alimenter les deux servomoteurs à partir de la broche  $V_{cc}$  (5 V).

### III.2.2.4. Bloc des servomoteurs :

Pour que notre suiveur peut s'orienter il est besoin de deux moteurs, dans notre système en a choisi les servomoteurs qui sont des moteurs à courant continu ayant un couple et une vitesse bien déterminer (les caractéristiques de ce servomoteur sont cités dans le chapitre II). La commande des deux servomoteurs est effectuée à l'aide d'un programme exécuté au niveau de la carte Arduino qui reçoit des signaux électriques émis par les quatre photorésistances ou les deux potes ntiomètres. Au niveau des sorties actives de la carte les signaux agissent directement sur les deux servomoteurs ce qui provoque le mouvement de suiveur selon les deux axes (horizontale et verticale).

Dans notre projet nous avons utilisé deux servomoteurs de type SG90, qui sont branchés comme suit avec la carte Arduino : Le premier est branché à la broche D9, et le deuxième à la broche D10 et  $V_{cc}$  ensuite vers GND (Figure III 2).

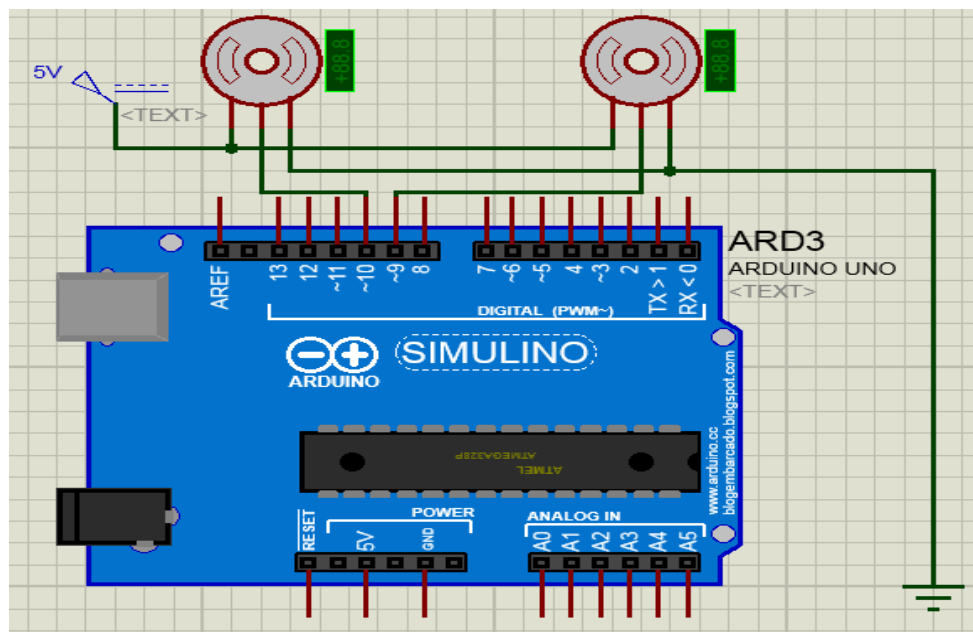


Figure III.2 : Simulation par logiciel Protes du branchement électrique des deux servomoteurs.

### III.3. La deuxième partie (la simulation) :

Après avoir étudié les différents blocs dans la première partie de ce chapitre, nous passons à la simulation de notre système suiveur solaire bi-axial donc on va donner une vue globale sur le logiciel de simulation et de programmation.

#### III.3.1. Logiciel de simulation Fritzing :

Fritzing est une initiative de matérielle « open source » qui rend l'électronique accessible à tous en tant que matériau créatif et il propose un outil logiciel, un site web communautaire et des services dans l'esprit de traitement et Arduino, favorisant un écosystème créatif qui permet aux utilisateurs de documenter leurs prototypes, de les partager avec d'autres [25].

#### III.3.2. L'environnement de travail de Fritzing :

Le logiciel Fritzing, constitue d'une fenêtre principale, et d'un ensemble de barres d'outils. Outre le menu classique permettant la gestion des fichiers, de l'affichage, et des options des projets. La figure III.3 représente l'interface de logiciel Fritzing.

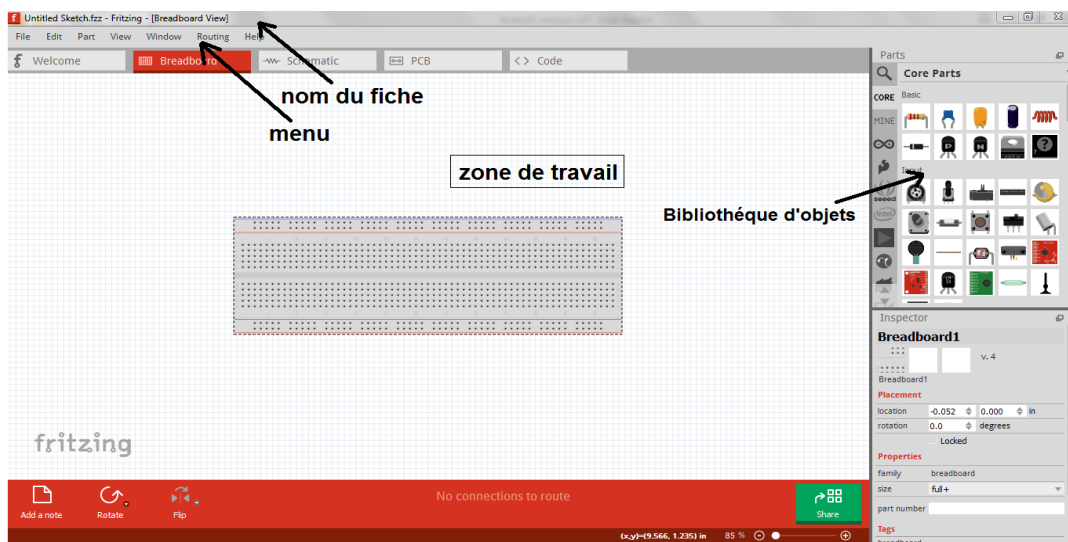


Figure III.3 : L'interface de logiciel Fritzing.

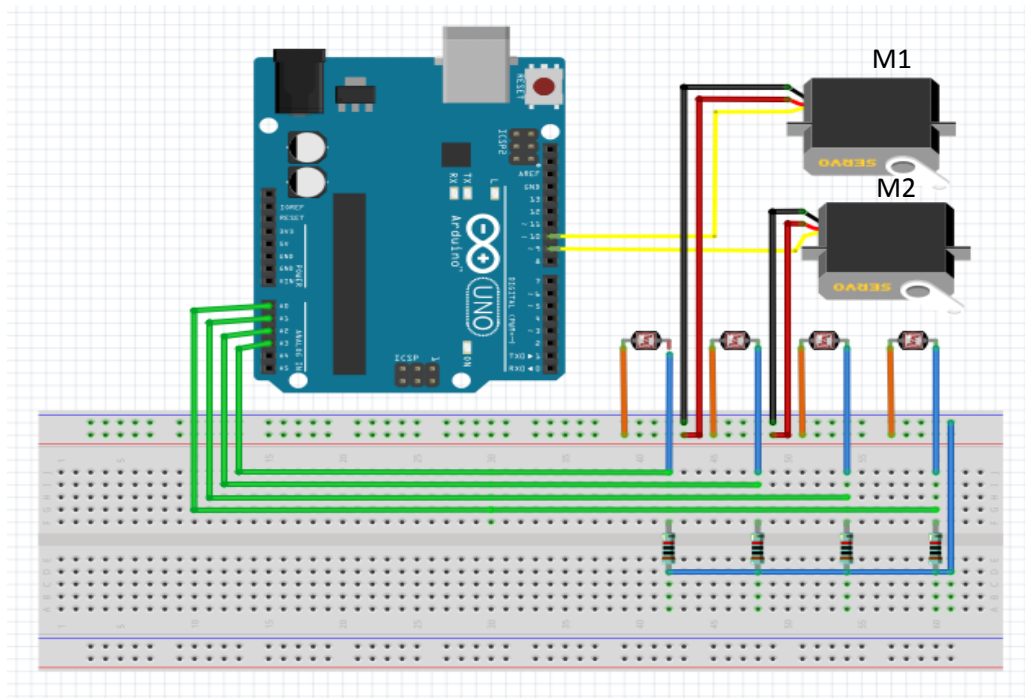
#### III.3.3. Simulation de notre système :

Avant de passer à la partie de réalisation de notre projet nous commençons tout d'abord par une simulation sur le logiciel Fritzing afin de tester le fonctionnement de notre système.

##### III.3.3.1 Simulation électronique :

Dans un premier temps et pour éviter les problèmes électriques et les erreurs, nous simulons nos expériences pour faciliter le travail.





**Figure III.6 : Circuit électrique de suiveur.**

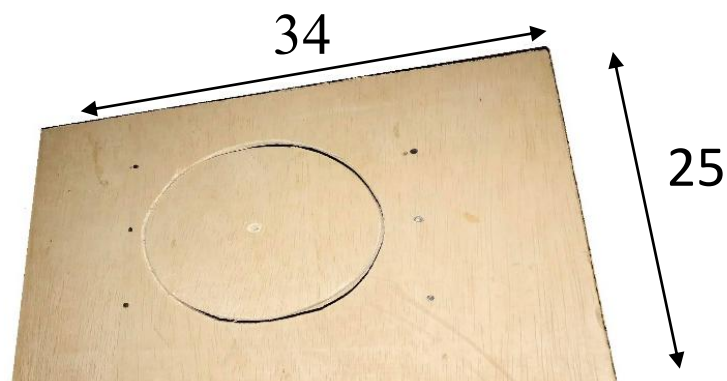
#### **III.4 Partie mécanique :**

Cette partie consiste à réaliser le support de panneau solaire c'est pour cela on a utilisé plusieurs plaques en bois avec différentes démentions.

Notre projet est constitué des plaques suivantes :

##### **III.4.1 La base :**

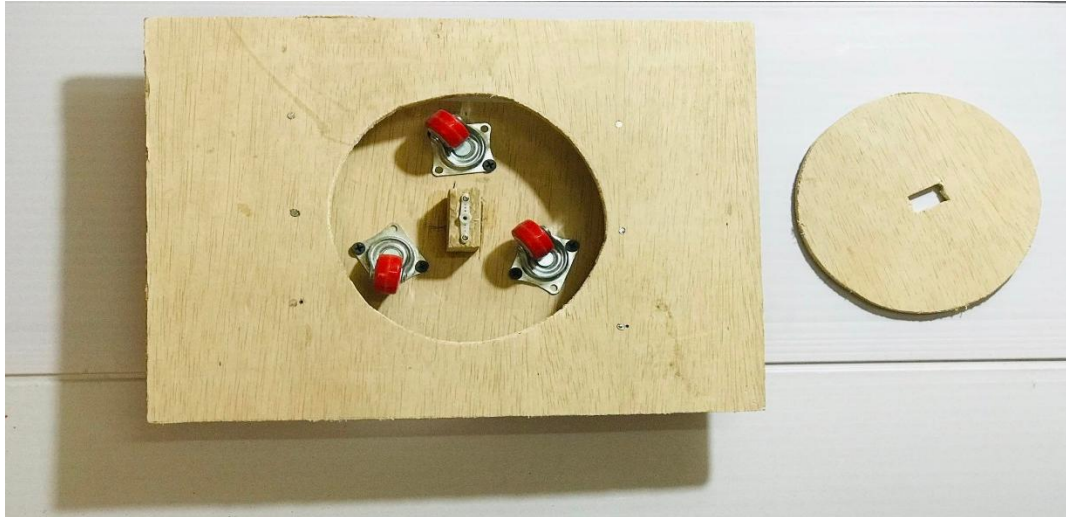
C'est une plaque en bois, de 34cm de longueur et 25 cm de largeur cette pièce représente la base de notre projet (suiveur solaire) c'est la première plaque de notre maquette ou on va poser notre suiveur et toute la partie électrique responsable sur leur fonctionnement.



**Figure III.7 : La base de suiveur solaire.**

### III.4.2 La première partie tournante (droite et gauche) :

Cette pièce est constituée d'un disque à un diamètre de 15 cm. Le servomoteur est installé dessus et posé sur le socle sur des roues qui sont fixées à l'envers pour faciliter l'écoulement et le déplacement de ce dernier.



**Figure III.8 : Panneaux en bois, le socle fixe et le disque tournant.**

### III.4.3 La deuxième partie tournante (Haut et Bas) :

Cette partie est composée de deux arbres installés sur le plateau tournant précédent et ils permettent d'obtenir les mouvements de montée et de descente par le deuxième servomoteur installé sur l'un d'eux (Figure III.9).



**Figure III.9 : La partie responsable du mouvement de haut en bas.**

#### III.4.4 Plate-forme d'installation :

Cette plate-forme est une planche de bois de 16 de longueur et de 13 de largeur, et son rôle est de porter les panneaux solaires pour faciliter l'installation comme montré dans la figure III.10.

Cette dernière est fixée sur les deux colonnes en bois précédentes est présenté à la Figure III.11.



Figure III.10 : Plate-forme d'installation.

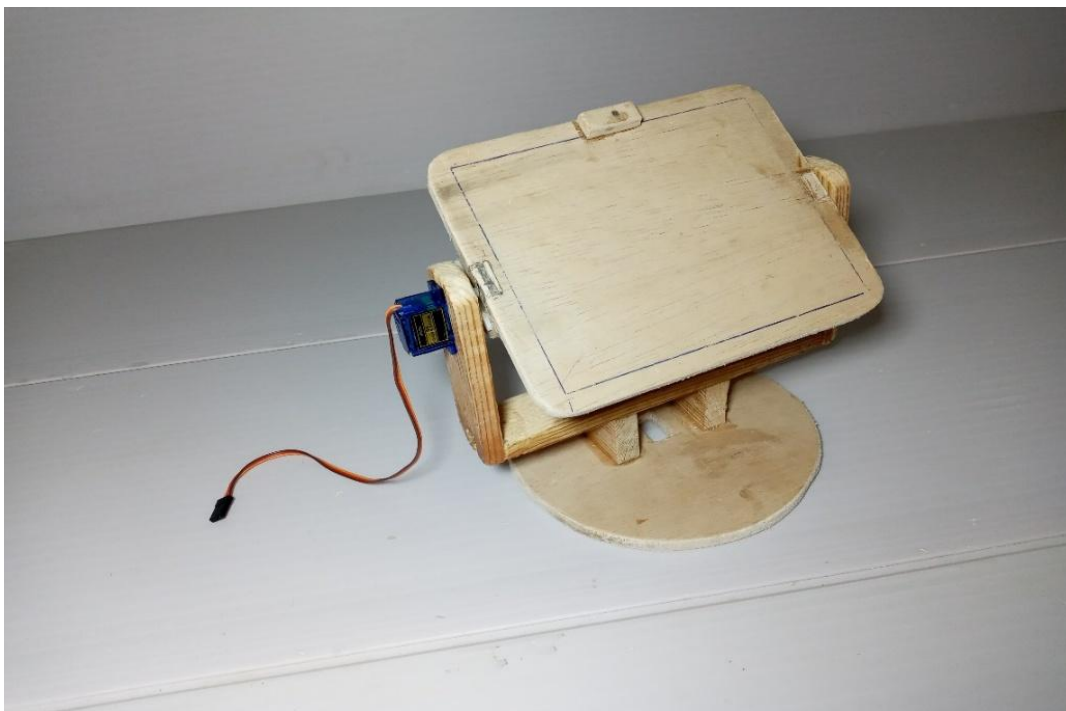


Figure III.11 : Installation sur les deux poteaux en bois précédents.

#### III.5 La partie électrique :

Dans cette partie nous avons réalisé et testé notre circuit électrique qui contient les différents blocs cités dans le début de ce chapitre.

### III.5.1 Teste des photorésistances (LDR) :

La variation de la résistance du LDR par rapport l'éclairage est illustrée à la Figure III.12.

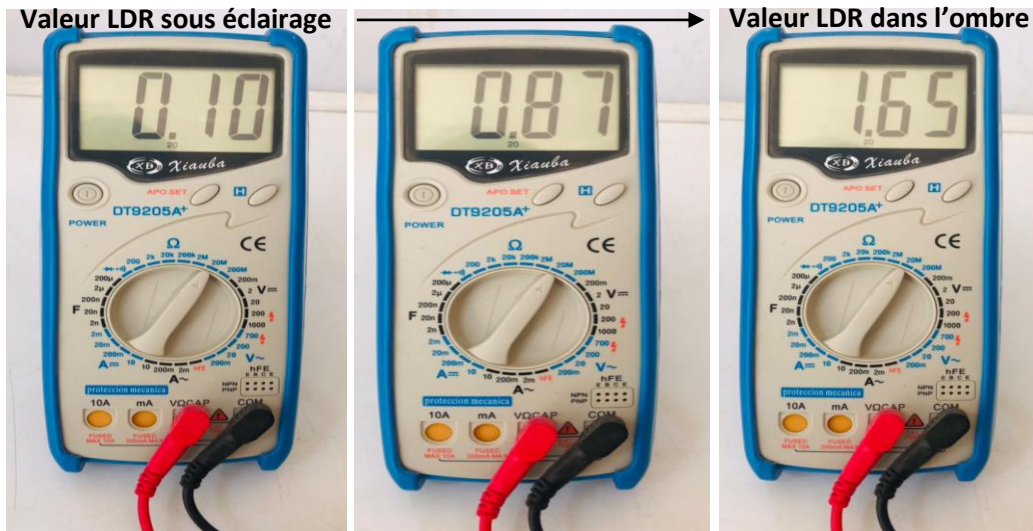


Figure III.12 : La variation de la résistance du LDR par rapport l'éclairage.

### III.5.2 Le montage des photorésistances :

Après avoir mesuré les résistances et vérifié leur intégrité, nous les avons installées sur une carte électronique basée sur le dessin précédent, puis nous avons ajouté le format qui correspond à ce capteur en formant le signe + à l'aide de pièces en plastique comme indiqué sur la Figure III.13 et la Figure III.14 et la Figure III.15, respectivement.

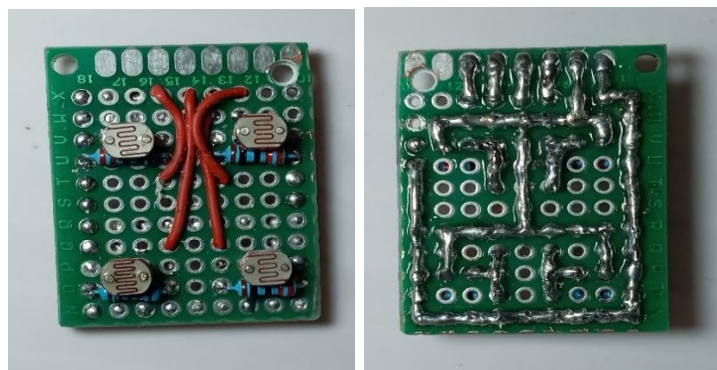


Figure III.13 : Procédé de soudage.

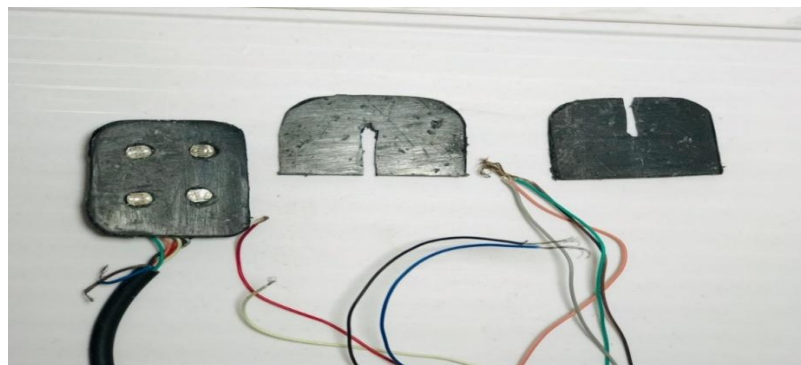
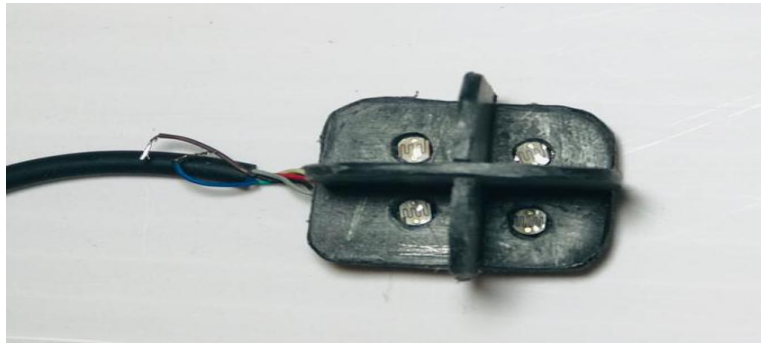


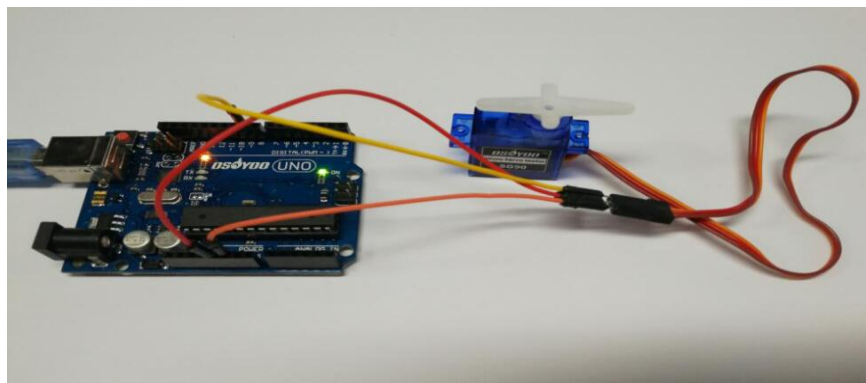
Figure III.14 : Processus d'assemblage de pièces en plastique.



**Figure III.15 : Capteur de lumière à quatre voies (droite, gauche, haut, bas).**

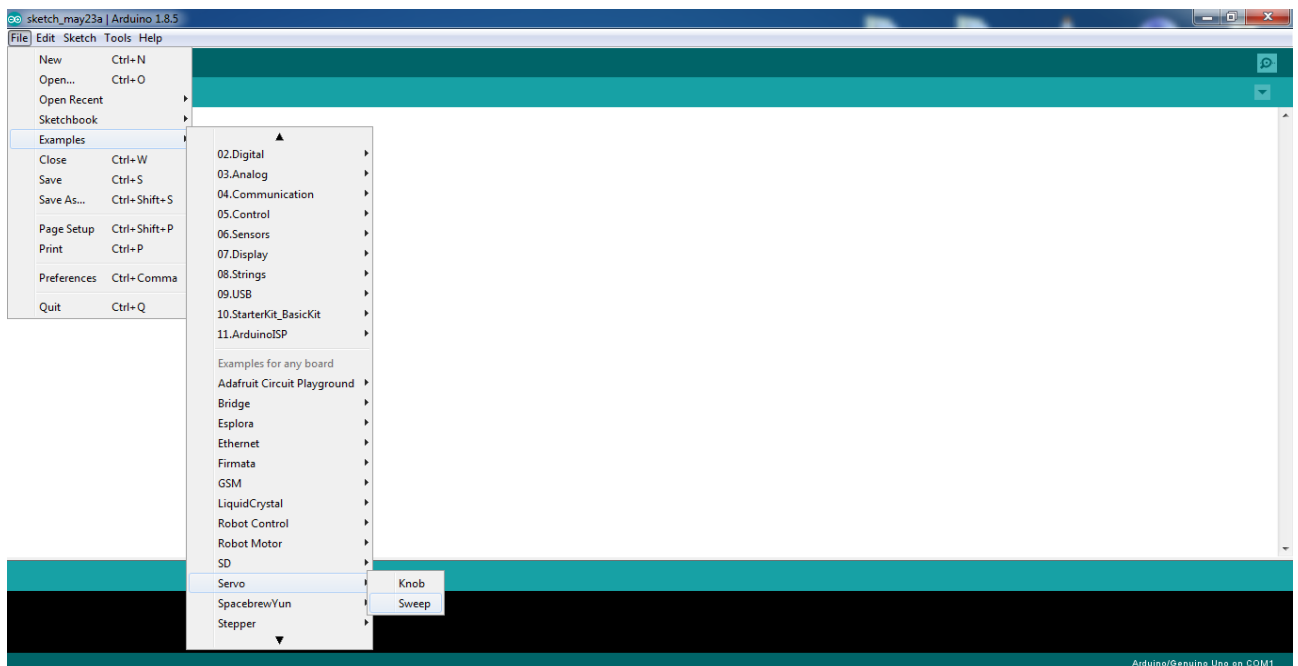
### III.5.3 Teste du fonctionnement des servomoteurs :

On réalise le montage suivant (figure III.16).



**Figure III.16 : Montage du circuit électrique de servomoteur.**

Pour tester le fonctionnement de servomoteur, on injecte le programme de teste qui se situe dans la bibliothèque des exemples Arduino > Fichier > Exemples > Servo > Sweep est présenté à la Figure III.17 et est présenté à la Figure III.18.



**Figure III.17 : Les étapes à suivre pour tester les servomoteurs.**

```
Sweep | Arduino 1.8.5
File Edit Sketch Tools Help
Sweep
/* Sweep
  by BARRAGAN <http://barraganstudio.com>
  This example code is in the public domain.

  modified 8 Nov 2013
  by Scott Fitzgerald
  http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Sweep
  */

#include <Servo.h>

Servo myservo;  // create servo object to control a servo
// twelve servo objects can be created on most boards

int pos = 0;    // variable to store the servo position

void setup() {
  myservo.attach(9); // attaches the servo on pin 9 to the servo object
}

void loop() {
  for (pos = 0; pos <= 180; pos += 1) { // goes from 0 degrees to 180 degrees
    // in steps of 1 degree
    myservo.write(pos);              // tell servo to go to position in variable 'pos'
    delay(15);                       // waits 15ms for the servo to reach the position
  }
  for (pos = 180; pos >= 0; pos -= 1) { // goes from 180 degrees to 0 degrees
    myservo.write(pos);              // tell servo to go to position in variable 'pos'
    delay(15);                       // waits 15ms for the servo to reach the position
  }
}

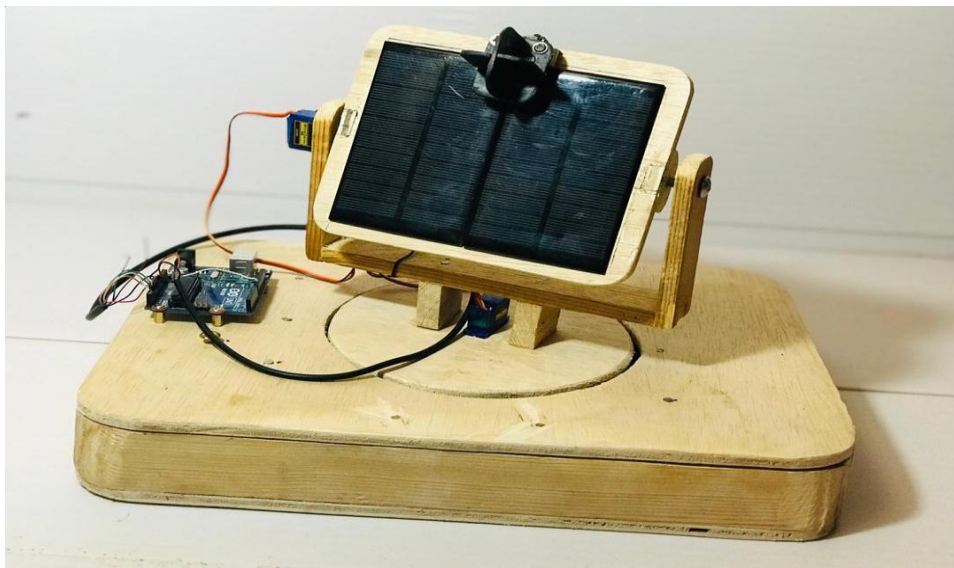
Arduino/Genuino Uno on COM1
```

**Figure III.18 : Le programme pour tester les servomoteurs.**

« Le servomoteur tourne de 0° à 180° ce qui assure son bon fonctionnement »

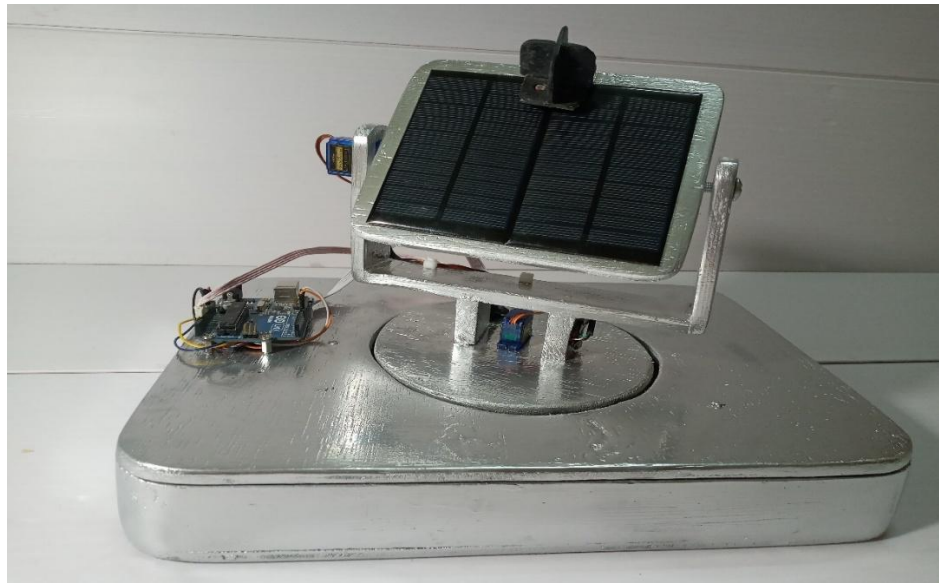
### III.6 Montage du système suiveur solaire :

Avant de commencer le processus de peinture et le reste de l'organisation de notre projet, nous installons toutes les parties en bois et électriques, puis vérifions l'intégrité de notre système de suiveur solaire est présenté à la Figure III.19.



**Figure III.19 : Montage réel partiel du système suiveur solaire.**

Nous concluons notre travail en choisissant la couleur qui convient à notre projet et en organisant les connexions électriques avec un soin parfait.



**Figure III.20 : Aperçu du prototype.**

### **III.8 Principe de fonctionnement du système suiveur solaire :**

Le système vise à orienter en temps réel les capteurs vers le soleil pour placer le panneau dans une position optimale par rapport à l'incidence du rayonnement solaire (perpendiculaire au rayonnement si possible) ; car tout au long de la journée et de l'année, la position du soleil varie constamment et d'une manière différente selon l'altitude et l'azimut (d'Est en Ouest à mesure de l'avancée de la journée, en hauteur selon la saison à l'avancée de la journée). Le principe consiste à remarquer que la lumière reçue par les photorésistances est identique dès que le capteur est orienté dans l'axe de la lumière. Il faut donc mesurer la lumière reçue par chaque photorésistance en mesurant la tension à leurs bornes. Cette mesure est réalisée grâce à la connexion des ports pins A<sub>0</sub> à A<sub>4</sub> de la carte Arduino. Nous avons choisi l'utilisation de photorésistances écartées l'une de l'autre et déterminer l'orientation du soleil en calculant la différence d'éclairage, si par exemple la LDR haute reçoit plus de lumière que la LDR bas donc le servomoteur d'azimut va tourner en direction de haute pour égaliser tout ça dans l'axe vertical. Le même principe s'applique sur l'axe horizontal.

### **III.9 Points importants avant d'installer le panneau solaire fixe :**

L'installation des panneaux solaires dépend de points importants que nous devons connaître avant de les installer :

### III.9.1. Choix de la direction et de l'angle du panneau solaire :

Dans la plupart des régions du monde arabe, qui se situent principalement au nord de l'équateur, il est préférable d'orienter les cellules solaires vers le soleil du sud. Comme le montre la Figure III.21.



**Figure III.21 : Position du panneau solaire fixe prise de l'université.**

### III.9.2. Choix de l'angle d'inclinaison du panneau solaire :

Si l'on s'en réfère uniquement à la théorie, l'inclinaison parfaite de vos futurs panneaux solaires doit être comprise entre  $30^\circ$  et  $35^\circ$  par rapport à une ligne horizontale. Car comme vous le savez, le soleil voit son angle par rapport à l'horizon fluctuer au fil des saisons. En hiver, il faudrait que vos panneaux soient inclinés à  $60^\circ$  environ, contre  $45^\circ$  au printemps et  $20^\circ$  en hiver. Par conséquent, le plus simple, c'est de faire une moyenne entre toutes ces inclinaisons. Cela donne  $30^\circ$  environ ! Et cela tombe bien [26].

### III.9.3. Installation de panneaux en parallèle ou en série :

L'installation de panneaux en parallèle conduit à maintenir la tension mais augmente l'intensité du courant, tandis que L'installation en série augmente la valeur de la tension et conduit à maintenir la stabilité du courant.

### III.9.4. Expérience de sélection de direction :

Nous avons fait diverses expériences sur le panneau solaire fixe et suivi l'évolution du courant et de la tension à différentes périodes, comme le montrent les figures 22 à 24.

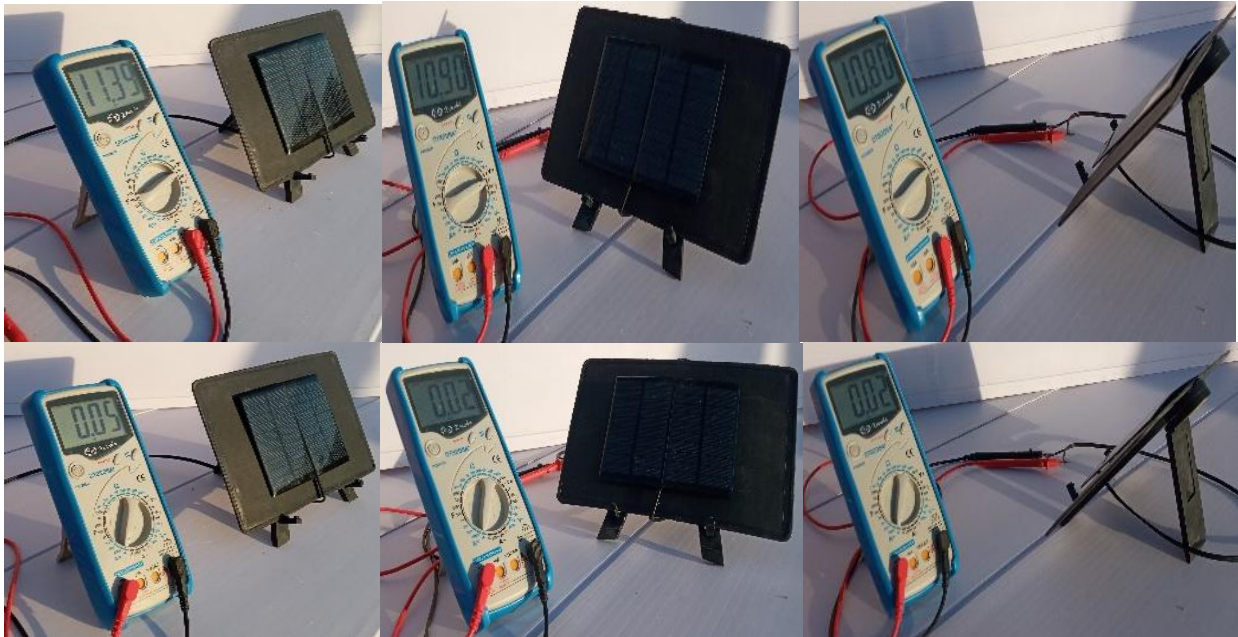
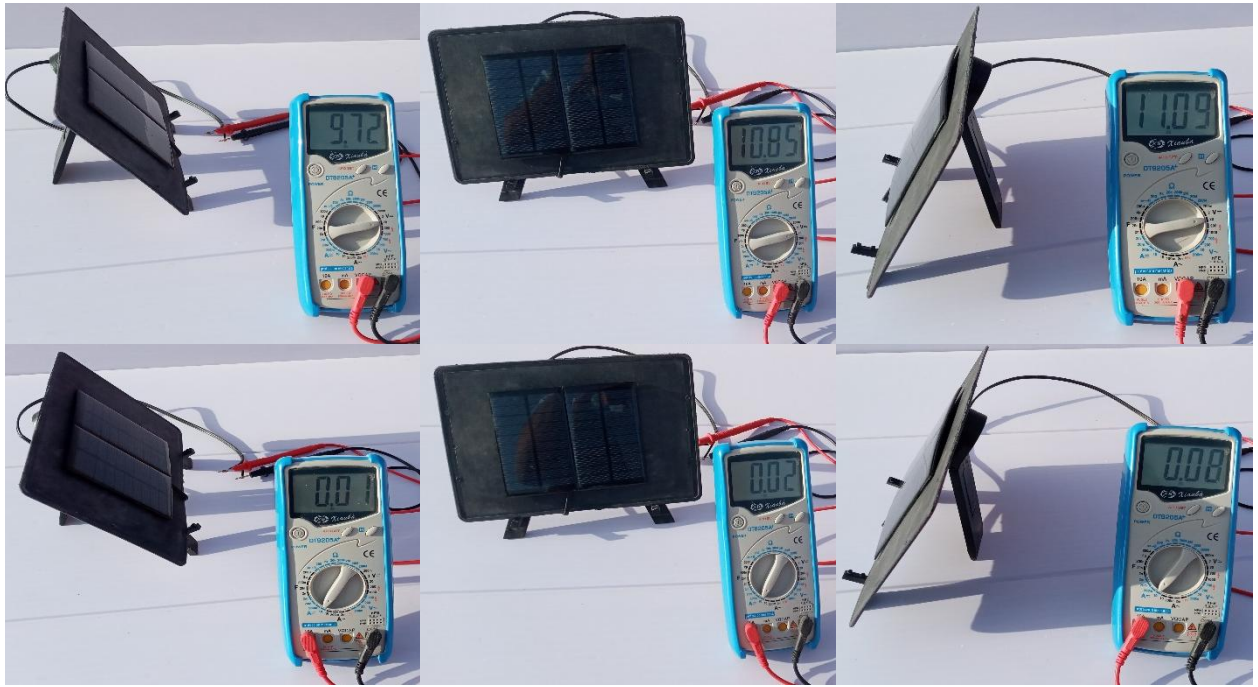


Figure III.22: Mesure au matin.



Figure III.23: Mesure au midi.



**Figure III.24: Mesure au soir.**

Table montrant le suivi des changements dans les propriétés électriques du panneau solaire à différentes périodes de temps

**Tableau n° 2 : Mesures électriques de panneaux solaires fixes.**

Direction	Horaires 27/05/2022	V (Voltage généré)	I (Courant court circuit)	P (Puissance générée)	N (Rendement du panneau)	M (Rendement moyen de la journée)
Est	6:00	11.39 V	0.05 A	0.56 W	26%	25%
	12:00	10.89 V	0.09 A	0.98 W	46%	
	18:00	9.72 V	0.01 A	0.09 W	04%	
Sud	6:00	10.90 V	0.02 A	0.21 W	10%	36%
	12:00	11.09 V	0.17 A	1.88 W	88%	
	18:00	10.85 V	0.02 A	0.21 W	10%	
Ouest	6:00	10.80 V	0.02 A	0.21 W	10%	31%
	12:00	10.08 V	0.09 A	0.90 W	42%	
	18:00	11.09 V	0.08 A	0.88 W	41%	

Enfin, nous avons conclu que la meilleure direction pour installer le panneau est le sud.

### III.10. EVALUATION DES RESULTATS :

Nous surveillons l'énergie solaire pendant différentes périodes tout au long de la journée et de deux manières différentes (panneau fixe et panneau avec suiveur), les méthodes illustrées aux figures 25 et 26, respectivement.

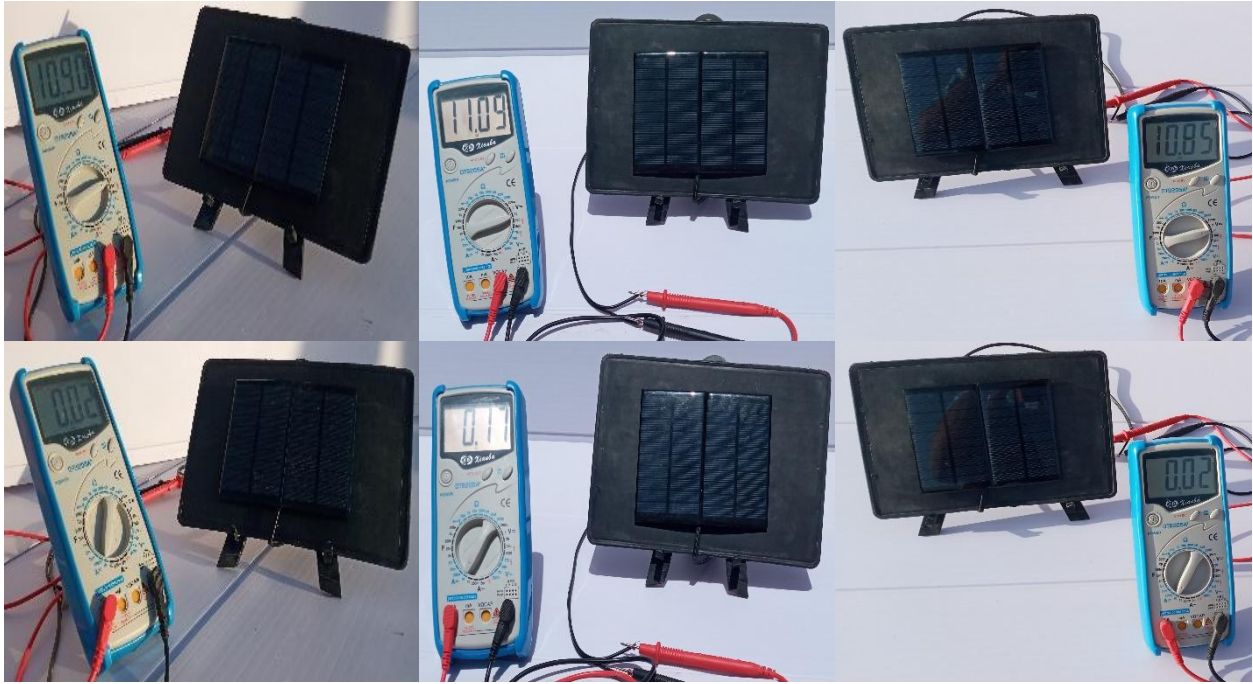


Figure III.25: panneau fixe (orienté vers le sud).

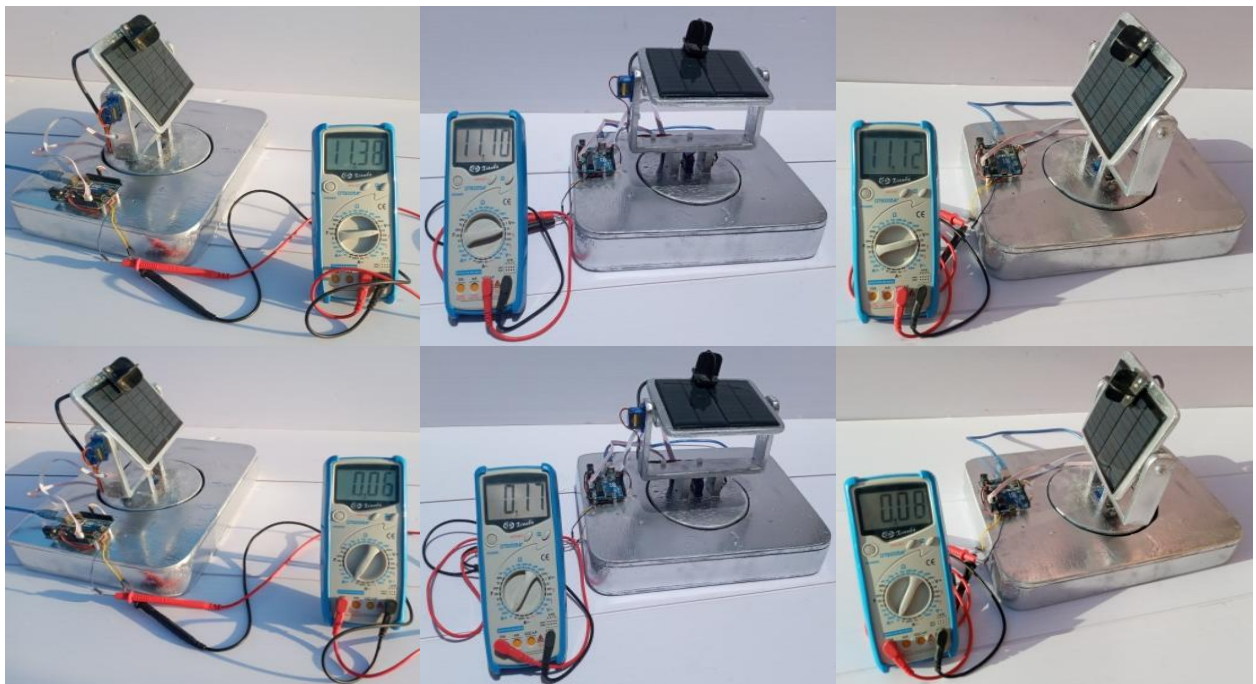


Figure III.26: panneau avec suiveur.

tableau représente la comparaison des propriétés électriques du panneau fixe et du panneau suiveur solaire à différentes périodes.

Tableau n° 3 : Mesures électriques des panneaux solaires fixes et des panneau suiveur solaire.

Cas	Date	Horaires	V (Voltage généré)	I (Courant court circuit)	P (Puissance générée)	N (Rendement du panneau)	M (Rendement moyen de la journée)
<b>Fixe</b> (orienté vers le sud)	27/05/2022	06 :00	10.90V	0.02A	0.21W	10%	36%
		12 :00	11.09V	0.17A	1.88W	88%	
		18 :00	10.85V	0.02A	0.21W	10%	
<b>Suiveur</b>	28/05/2022	06 :00	11.38V	0.06A	0.68W	32%	53%
		12 :00	11.10V	0.17A	1.88W	88%	
		18 :00	11.12V	0.08A	0.88W	41%	

Où le rendement est calculé comme suit :

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S} = \frac{P_m}{p_c} \quad (III - 1)$$

Avec:

- $\eta$  : rendement énergétique.
- E : éclairement ( $w/m^2$ ).
- S : surface active de la cellule ( $m^2$ ).
- $p_c$  : Puissance de crête.
- $P_m$  : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC)

Le tableau ci-dessus montre les mesures réelles prises à partir de notre prototype pendant deux jours de test et d'interprétation des résultats.

Les résultats ont montré que bien que le système de suiveur soit plus efficace que le panneau fixe car il absorbe plus de lumière pendant la journée.

### III.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la construction de notre prototype qui consiste en un système de suiveur solaire commandé par microcontrôleur "Carte Arduino". Après avoir passé différentes étapes de développement du prototype, le système s'est avéré fonctionner correctement, suivre la trajectoire du soleil et fonctionner automatiquement.

Pour conclure, nous pouvons dire que nous avons réussi à atteindre l'objectif principal de ce projet, qui est de construire et d'exploiter un suiveur solaire, en adaptant les trajectoires du soleil pour récupérer le maximum d'énergie possible et augmenter l'efficacité du panneau solaire.

# **Conclusion**

## **Générale**

## **Conclusion générale :**

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude et la réalisation d'un suiveur solaire à double axes à base d'une carte Arduino UNO en utilisant des composants électroniques à savoir des LDR, des servomoteurs gérés par un microcontrôleur ATMEGA. Le but de travail réside dans la mise en œuvre d'une solution technique permettant de transformer un panneau PV fixe en un panneau PV mobile afin d'améliorer son rendement. Notre solution consiste à associer un système suiveur solaire qui assure la poursuite du soleil durant la journée grâce aux capteurs LDR et les deux servomoteurs. La première partie de notre projet consiste d'étudier le système photovoltaïque et leur principe de fonctionnement. Dans la deuxième partie nous avons identifié le système suiveur, ainsi que les différents types des systèmes de poursuite. La dernière partie consiste la programmation et la réalisation du notre suiveur solaire. Ce projet de fin d'études était pour nous l'occasion précieuse de faire multidisciplinaire, associant l'instrumentation, l'électronique, l'automatique, la mécanique, la programmation et les énergies renouvelable. Elle nous a apporté de nouvelles connaissances dans le domaine de l'énergie solaire qui est en plein essor.

**BIBLIOGRAPHIE:**

- [1] ABBAS Nassima « Conception et réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino nano », Mémoire de Master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2018.
- [2] ARBOUZ Brahim, BENHAMADA Ali « Conception et réalisation d'un dispositif mobile de l'énergie solaire photovoltaïque » Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, Soutenu publiquement le 07/07/2019.
- [3] Azzi Omar, « Réalisation d'un système de Suiveur à base arduino » Université Mohamed Khider Biskra, Mémoire soutenu le 14/09/2020.
- [4] Boughoufala Mohamed « Conception et réalisation d'un système de Suiveur Solaire pour des systèmes photovoltaïques » Université des Sciences et de la Technologie d'Oron MOHAMED BOUDIAF, Soutenu le : 08/02/2011
- [5] Z. Bouzid, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien Photovoltaïque : Application pour un site isolé », Thèse de Doctorat, Université AbouBekrBelkaid de Tlemcen, 2014.
- [6] M. Angel Cid Pastor 'Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques'/septembre 2007.
- [7] Arras Aida « Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si» Soutenu publiquement le 25 /06/2018.
- [8] Zerrouki Zolikha & Mlle BEREKSI REGUIG Rym « Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome », université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen,2017.
- [9] <http://www.aros-solar.com/> , le 23/02/2022;11:30.
- [10] <https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/panneau-solaire-photovoltaique-fonctionnementet-description-les-differents-types-de-panneaux-solaires-photovoltaiques-1>, le 05-05-2022; 20:10.
- [11] 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.
- [12] Labouret, A. and M. Viloz, Installations photovoltaïques-5e éd. : Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau. 2012 : Dunod.
- [13] Brigand, S.J.c.t., Techniques de construction, Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque. 2008.

- [14] Arafa KADDOURI « conception et réalisation d'un suiveur solaire a deux axes » Soutenu le 29 Juin 2015 .
- [15] Thomas B. Greenslade, Jr., "Héliostats">, Jules-Célestin Jamin- "Cours de Physique à l'Ecole Polytechnique. Tome 3 - Fès. 2"Gauthi  
- Villars & Fils (Paris) - 1885-1906.
- [16] Dahmane Boursliia, « étude et réalisation d'un suiveur de soleil a base d'une carte Arduino méga », Master professionnel, UMMTO, 2015.
- [17] Optoelectronic detectors, Dr. Heiner Ryssel, Indian Institute of Technology, Madras 9thINDO –German Winter Academy 2010.
- [18] KAHILA SAID, BOUAKLINE IBTISSAM « Etude conception et réalisation d'un suiveur solaire biaxiale » UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJ DE BOUIRA 2018/2019
- [19] 7 février 2013 principe des photorésistances,23. dzblogspot.com/photorésistance, juillet 2019.
- [20] M. Angel Cid Pastor 'Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques/septembre 2007.
- [21] <http://dailylearningnotes.blogspot.com/2010/03/arduino-components-icsp-6-pin-header.html>, le 08/06/2022; 23:10.
- [22] <https://www.quora.com/What-is-the-work-of-ICSP-USB-interface-in-Arduino>, le 08/06/2022; 22:43.
- [23] <http://shop.mchobby.be/cables-usb,juillet 2019>, le 02/03 /2022 ; 15 :10,
- [24] <https://shop.mchobby.be/fr/cable-et-connecteur-usb/68-cable-usb-type-a-b-arduino-uno-3232100000681.html>, le 02/03 /2022 ; 15 :30,
- [25] <https://fritzing.org/>, le 22/05/2022; 16:32.
- [26] <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/optimisation-inclinaison-panneaux-solaires.html>, le 19/05/2022;09:45.