

République algérienne démocratique et  
populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la  
recherche scientifique  
Université de M'sila



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

## Mémoire

De fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme Master

Option : Energétique

Thème

***Réalisation d'un suiveur solaire à base d'Arduino***

*Présenté par :*

**BENSAOUCHA Seyf**

**DJLOUD Snoussi**

*Dirigé par :*

**pr.lhaddaden**

*Année Universitaire : 2019/2020*

## Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu ALLAH, tout puissant, de

Nous avons donné le courage et la volonté pour bien mener ce modeste travail.

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre professeur Mm.Ihaddadène

Pour leur patience et, surtout, pour leur confiance, leurs observations et leurs conseils.

Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques, ainsi que le personnel et les enseignants du département génie mécanique de l'université de m'sila

A tous mes enseignants qui m'ont initié aux valeurs authentiques

Merci à vous tous

## **Dédicace**

Mon père a le meilleur ami de la vie

La plus belle créature que Dieu a créé sur terre..

À cet source de tendresse, de patience et de générosité..

À ma mère

À tous mes frères et sœurs

À toute ma famille

À tous mes amis et collègues

À tous les étudiants de la promotion 2019/2020

Option : énergétique

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer .....

# TABLE DES MATIERS

Liste des figures

Nomenclature

**Introduction General.....01**

**Chapitre I: Généralités sur l'énergie solaire**

**I.1. Introduction ..... 03**

**I.2. Soleil ..... 03**

**I.3. Rayonnement solaire .....03**

I.3.1. Rayonnement extraterrestre .....03

I.3.2. Irradiation solaire incidente .....04

I.3.2.1. Composantes du Rayonnement solaire incident .....04

I.3.2.1.1. Rayonnement direct .....04

I.3.2.1.2. Rayonnement diffus .....04

I.3.2.1.3. Rayonnement réfléchi .....05

I.3.3. Indice de clarté  $K_T$  .....05

I.3.4. Durée d'insolation .....05

**I.4. Mouvement de la Terre .....05**

**I.5. Coordonnées géographiques terrestres .....06**

I.5.1. Latitude ( $\varphi$ ) .....06

I.5.2. Longitude (L) .....06

I.5.3. Altitude .....07

**I.6. Position du soleil .....07**

I.6.1. Système de coordonnées horaires .....07

I.6.1.1. Déclinaison du soleil ( $\delta$ ) .....07

I.6.1.2. Angle horaire du soleil ( $\omega$ ) .....08

I.6.2. Coordonnées horizontales .....09

I.6.2.1. Hauteur du soleil (H) .....09

I.6.2.2. Azimut du soleil ( $\alpha$ ) .....10

**I.7. Energie solaire .....10**

**I.8. Modes d'exploitation de l'énergie solaire .....11**

I.8.1. Electricité solaire thermodynamique .....11

I.8.2. Energie solaire thermique .....11

I.8.3. Electricité photovoltaïque .....12

**I.9. Instruments de mesure du rayonnement solaire .....13**

I.9.1. Héliographe .....13

I.9.2. Pyranomètre .....13

I.9.3. Pyréliomètre .....14

**I.10. Conclusion .....15**

## **Chapitre II: Suiveurs solaires**

<b>II.1. Introduction</b> .....	<b>17</b>
<b>II.2. Suiveurs solaires</b> .....	<b>17</b>
<b>II.3. Types de suiveurs solaires</b> .....	<b>17</b>
II.3.1. Trackers solaires passifs .....	18
II.3.2. Trackers solaires actifs .....	18
II.3.2.1. Tracker en boucle ouverte .....	19
II.3.2.2. Tracker en boucle fermée .....	19
II.3.3. Suiveur solaire mono-axe .....	20
II.3.3.1. Suiveurs à axe horizontal .....	21
II.3.3.2. Suiveurs à axe vertical incliné .....	22
II.3.4. Suiveurs solaires à double axes .....	22
<b>II.4. Avantages et inconvénients de suiveurs solaires</b> .....	<b>23</b>
<b>II.5. Conclusion</b> .....	<b>24</b>

## **Chapitre III: Réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino**

<b>III.1. Introduction</b> .....	<b>26</b>
<b>III.2. Description des composants électroniques utilisés</b> .....	<b>26</b>
III.2.1. Carte Arduino Uno .....	26
III.2.1.1. Constitution de la carte Arduino Uno .....	27
III.2.2. Capteurs de lumière LDR .....	30
III.2.3. Servomoteurs .....	31
III.2.3.1. Fonctionnement interne du servomoteur .....	32
III.2.4. Câblages .....	33
III.2.4.1. Câble USB .....	33
III.2.4.2. Fils de Pin d'Arduino .....	33
III.2.5. Plaque d'essai .....	34
<b>III.3. Description des composants mécaniques utilisés</b> .....	<b>34</b>
<b>III.4. Réalisation du suiveur solaire</b> .....	<b>35</b>
III.4.1. Assemblage mécanique .....	36
III.4.2. Programmation .....	36
III.4.3. Assemblage électronique .....	38
<b>III.5. Conclusion</b> .....	<b>39</b>
<b>Conclusion general</b> .....	<b>41</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>43</b>

## LISTE DE FIGURES

Figure (I.1)	Rayonnements solaires extraterrestre et incident .....	04
Figure (I.2)	Composantes du rayonnement solaire incident .....	05
Figure (I.3)	Mouvements de la Terre .....	06
Figure (I.4)	Latitude ( $\varphi$ ) .....	07
Figure (I.5)	Latitude ( $\varphi$ ) .....	07
Figure (I.6)	Déclinaison du soleil ( $\delta$ ).....	08
Figure (I.7)	Angle horaire ( $\omega$ ) .....	09
Figure (I.8)	Coordonnées horizontales du soleil ( $H, \alpha$ ) .....	10
Figure (I.9)	Signe de l'angle d'azimut ( $\alpha$ ) .....	10
Figure (I.10)	Centrale solaire thermique .....	11
Figure (I.11)	Chauffe-eau solaire .....	12
Figure (I.12)	Panneaux photovoltaïques .....	12
Figure (I.13)	Héliographe de Campbell-Stokes .....	13
Figure (I.14)	Pyranomètre à thermopile .....	14
Figure (I.15)	Pyrhéliomètre .....	14
Figure II.1	: Classification des suiveurs solaires .....	18
Figure II.2	: Suiveur passif .....	19
Figure II.3	: Stratégie de la commande en boucle ouverte .....	20
Figure II.4	: Stratégie de la commande en boucle fermée .....	21
Figure II.5	: Suiveur à 1 axe horizontal .....	21
Figure II.6	: Suiveur à axe vertical incliné .....	22
Figure II.7	: Suiveur à double axes .....	22
Figure III.1	: Projet Arduino .....	26
Figure III.2	: Constitution de la carte Arduino UNO .....	27
Figure III.3	: Interface de la plateforme Arduino .....	29
Figure III.4	: Boutons de l'interface de la plateforme Arduino .....	29
Figure III.5	: Capteur de lumière LDR .....	30
Figure III.6	: Servomoteur utilisé (chinois "9 grammes") .....	31
Figure III.7	: Vue éclatée d'un servomoteur .....	32
Figure III.8	: Signal de contrôle .....	33
Figure III.9	: Câble USB de type A/B .....	33
Figure III.10	: Fils de pin d'Arduino .....	34
Figure III.11	: Plaque d'essai sans soudure .....	34
Figure III.12	: Partie mécanique du dispositif réalisé .....	35
Figure III.13	: Schéma fonctionnel du dispositif réalisé .....	35
Figure III.14	: Partie mécanique du suiveur .....	36
Figure III.15	: Organigramme général de la poursuite solaire à base d'Arduino Uno.	37

Figure III.16 : Organigramme de la poursuite solaire à deux axes .....	37
Figure III.17 : Circuit de puissance .....	38
Figure III.18 : Suiveur solaire réalisé .....	39

# Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité</b>
$\lambda$	longitude du lieu	[°]
$z$	Altitude du lieu	[km]
$\psi$	Latitude du lieu	[°]
$\delta$	Déclinaison solaire	[°]
$n$	Numéro du jour de l'année	[ ]
$\omega$	Angle horaire	[°]
TSV	Temps solaire vrai	[h]
$h$	Hauteur angulaire du soleil	[°]
$\omega_l$	Angle horaire au lever ou coucher de soleil	[°]
$a$	Azimut	[°]
TSM	Temps solaire moyen	[h]
TU	Temps universelle	[h]
ET	Équation du temps	[h]
TL	Temps légal	[h]
C	Décalage horaire	[h]
$\gamma_s$	Angle d'azimut	[°]
S	Éclairement solaire direct	[W/m <sup>2</sup> ]
d	Éclairement solaire diffus	[W/m <sup>2</sup> ]
G	Éclairement global	[W/m <sup>2</sup> ]
$\theta$	Angle d'orientation de capteur	[°]
$\beta$	Angle d'inclinaison de capteur	[°]
I	Courant fourni par la cellule	[A]
$I_{ph}$	Photo-courant dépendant de l'éclairement	[A]
$I_p$	Courant dérivé par la résistance parallèle.	[A]
$I_d$	Courant traversant la diode	[A]

# **INTRODUCTION GENERAL**

## INTRODUCTION GENERAL

---

Le soleil est la plus importante source d'énergies renouvelables qu'on peut exploiter pour produire de l'électricité grâce à la technologie photovoltaïque ou bien à l'aide de concentrateurs solaires.

Le soleil n'est pas fixe dans le ciel et ce, durant la journée ou au cours de l'année. Pour cela, les collecteurs solaires munis de systèmes de poursuite de la trajectoire du soleil (suiveurs solaires) sont mieux placés que les collecteurs fixes. En effet, la position idéale des collecteurs est que le rayonnement doit tomber verticalement sur la surface du collecteur afin de maximiser la quantité de rayonnement reçu.

L'idée de poursuivre la trajectoire du soleil n'est pas récente, mais elle remonte loin dans le temps. En effet, les premières applications des Trackers solaires datent des années 1750.

Les suiveurs solaires peuvent être mono-ou bi axiales, mis en mouvement selon différentes stratégies (commande physique, électrique ou hydraulique).

Notre mémoire intitulé 'Réalisation d'un suiveur solaire à base d'Arduino' est un projet pratique que nous avons abordé à travers trois chapitres décrits comme suit :

Le premier chapitre apporte des généralités sur l'énergie solaire,

Dans le deuxième chapitre on a abordé les suiveurs solaires et leur principe de fonctionnement,

Le dernier chapitre présente la procédure adoptée afin de réaliser un suiveur solaire à base d'une carte Arduino.

Enfin, une conclusion générale clôturera ce mémoire.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur l'énergie solaire**

## I.1. Introduction

L'exploitation de l'énergie solaire et l'optimisation de sa collecte par les collecteurs solaires (photovoltaïques ou thermiques) exige une connaissance exacte de la distribution de l'irradiation solaire, qui est fonction de plusieurs paramètres à savoir ; les paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques. Ce chapitre présente certaines notions fondamentales sur notre étoile (le soleil), des rappels sur l'énergie solaire, ainsi que les différents modes d'exploitation de cette énergie.

## I.2. Soleil

Le soleil est l'étoile du Système solaire la plus proche de la terre qui se situe aux environs de 150 millions de km de celle-ci. D'une masse d'environ  $1.9891 \times 10^{30}$  kg, le soleil est composé principalement d'hydrogène (75% de la masse ou 92% du volume) et d'hélium (25% de la masse ou 8% du volume). Il représente à lui seul environ 99.854% de la masse du Système solaire. Sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre.

Le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie estimées à  $1.5 \times 10^{18}$  kWh par an. L'énergie solaire permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques. [1]

## I.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'énergie émise sous forme d'ondes électromagnétiques, dans toutes les directions de l'espace suite à la réaction de fusion de l'hydrogène contenu dans le soleil. Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violets à l'infra-rouge en passant par le visible ou il émet avec le maximum d'intensité.

Les rayonnements émis par le soleil se propagent à la vitesse de la lumière C; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère. [2]

Le rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre varie au cours de la journée, en fonction des saisons et dépend de la nébulosité, de l'angle d'incidence et de la réflexion des surfaces.

### I.3.1. Rayonnement extraterrestre

Le rayonnement solaire extraterrestre est le rayonnement reçu au sommet de l'atmosphère, il couvre un très large domaine de longueur d'ondes et ne dépend d'aucun paramètre météorologique, mais il est fonction de quelques paramètres astronomiques et géographiques tel que: la latitude du lieu ( $\varphi$ ), la déclinaison solaire( $\delta$ ), et l'angle horaire au coucher du soleil ( $\omega_0$ ).

L'énergie hors atmosphère reçue sur un plan horizontal au cours de la journée est donnée par l'équation suivante:

$$H_0 = (24 \cdot 3600 / \pi \cdot 10^6) g_n^e [\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0 + (\pi / 180) \omega_0 \sin \delta \sin \varphi] \quad (\text{I-1})$$

Où,

$$g_n^e = G_{sc} [1 + 0.033 \cos(360 n / 365)] \quad (\text{I-2})$$

$g_n^e$  est le rayonnement extraterrestre reçu sur un plan normal au rayonnement solaire le  $n^{\text{ième}}$  jour de l'année, exprimé en  $W/m^2$ ,

$G_{sc}$  est la constante solaire estimée à  $1367 W/m^2$ .

**I.3.2. Irradiation solaire incidente**

L'énergie solaire interceptée à la surface de l'atmosphère terrestre est égale à 1 367 W/m<sup>2</sup> (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties du rayonnement solaire sont réfléchies, absorbées ou diffusées, ce qui réduit significativement la valeur de cette énergie (rayonnement) à la surface de la terre (voir la Figure I.1). La diminution de l'intensité du rayonnement solaire est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le Soleil est fonction de plusieurs facteurs tels que l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du Soleil.

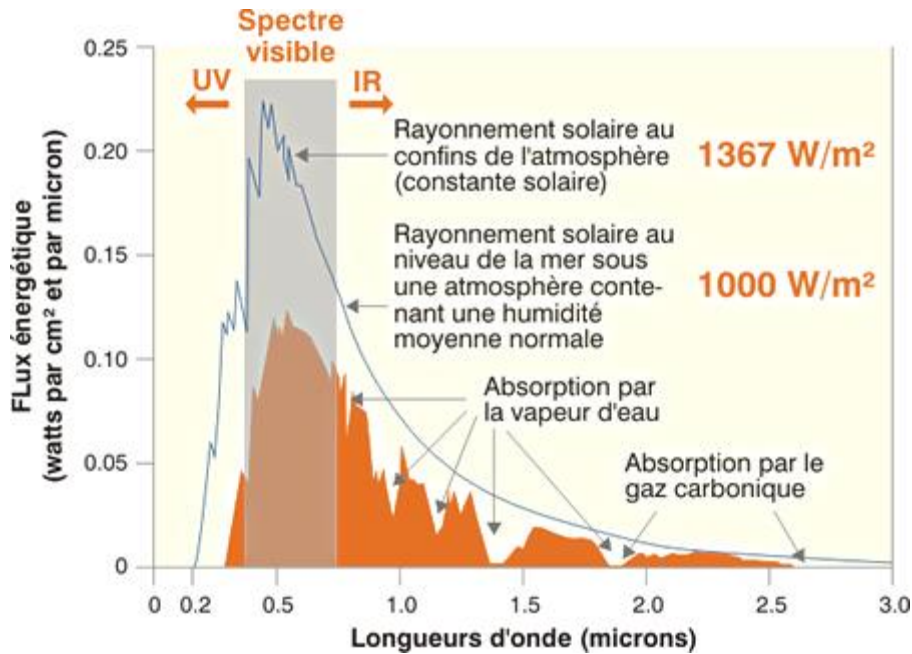


Figure I.1 : Rayonnements solaires extraterrestre et incident. [3]

Le rayonnement total reçu sur une surface, appelé irradiation solaire incidente (ou encore éclairage énergétique global) est la quantité d'énergie reçue par celle-ci. Ainsi, dans les meilleures conditions, l'irradiation solaire incidente sur Terre varie de 900 à 1000 W/m<sup>2</sup>. L'irradiation solaire incidente qui s'exprime en J/m<sup>2</sup> ou kWh/m<sup>2</sup> est définie par la somme de trois composantes à savoir ; l'irradiation directe, diffuse et réfléchi. Elle dépend de nombreux facteurs, dont principalement la couverture nuageuse, la durée du jour, l'instant considéré dans la journée, l'orientation et l'inclinaison de la surface, la latitude du lieu, et son degré de pollution. La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et dans le temps de l'irradiation solaire incidente.

**I.3.2.1. Composantes du Rayonnement solaire incident**

**I.3.2.1.1. Rayonnement direct**

Le rayonnement direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages (Figure I.2).

**I.3.2.1.2. Rayonnement diffus**

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension, en d'autres termes ; le rayonnement diffus est le rayonnement reçu par la Terre de la voûte céleste, hors rayonnement direct. Le rayonnement

solaire diffus peut atteindre 50 % du rayonnement global reçu, lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, 100 % pour un ciel entièrement couvert et il n'est nul que la nuit (Figure I.2).

### I.3.2.1.3. Rayonnement réfléchi

Ce rayonnement correspond au rayonnement réfléchi par l'environnement extérieur, en particulier le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé "albedo" (Figure I.2).

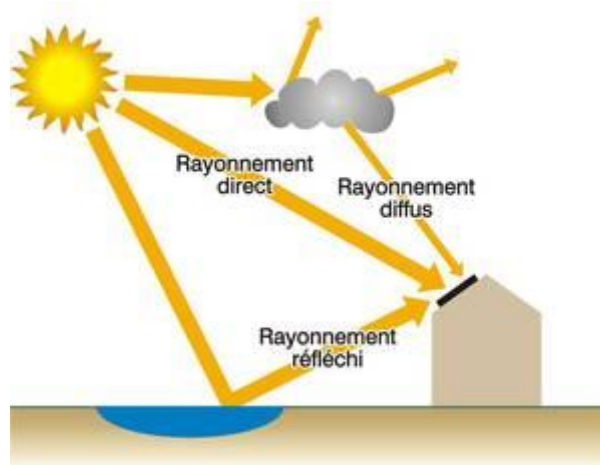


Figure I.2 : Composantes du rayonnement solaire incident. [3]

### I.3.3. Indice de clarté $K_T$

Le rapport entre le rayonnement incident et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté. L'indice de clarté,  $K_T$ , est défini par :

$$K_T = H/H_0 \quad (I-3)$$

Où:

H est l'irradiation solaire reçue sur un plan horizontal.

Selon la définition donnée plus haut, on peut définir l'indice de clarté  $K_T$  journalier, mensuel et annuel. Cet indice, qui décrit l'état du ciel, varie selon les endroits et les saisons, généralement entre 0,3 (pour les régions de saisons pluvieuses) et 0,8 (pour des saisons sèches et ensoleillées) [4]

### I.3.4. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages. [5]

En absence permanente de nuages, la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour. Elle est définie par:

$$S_0 = 2 * \omega_0 / 15 \quad (I-4)$$

Avec :

$\omega_0$ : L'angle horaire au coucher de soleil (°),

$S_0$ : La durée du jour (h).

## I.4. Mouvements de la Terre

La Terre est dotée d'un mouvement de rotation, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, autour de son axe, qui relie le pôle Nord au pôle Sud. Cette rotation est effectuée en

moyenne en 23 h 56 min et 4,1 s. L'axe de rotation de la Terre est incliné sur l'écliptique en moyenne de  $23^{\circ} 26'$  ; cette inclinaison est responsable des saisons.

Ce mouvement ne doit pas être confondu avec la révolution de la Terre, mouvement de translation elliptique de la Terre autour du Soleil qui s'effectue également dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en 365,2422 jours (voir la Figure I.3).

Lorsque le Soleil reste longtemps levé et culmine haut dans le ciel, il chauffe davantage le sol (saison chaude). En revanche, lorsqu'il reste bas au-dessus de l'horizon et que la durée de la journée est courte, son apport thermique est plus limité (saison froide). Les variations saisonnières sont ainsi expliquées essentiellement par l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'orbite terrestre (associée à la rotation de la Terre autour du Soleil et à la rotation de la Terre autour de son axe).

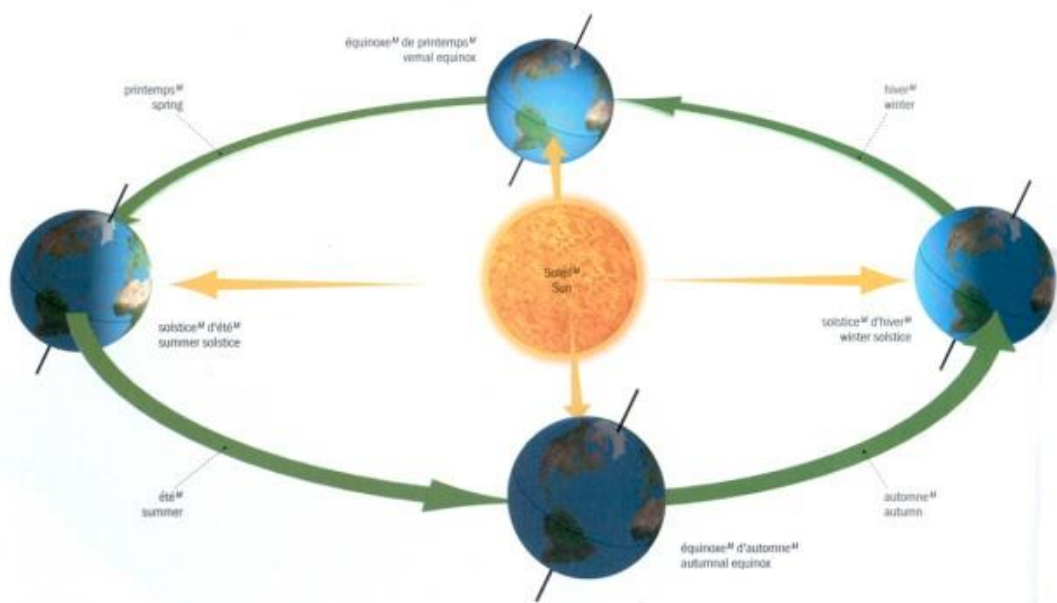


Figure I.3 : Mouvements de la Terre. [6]

## I.5. Coordonnées géographiques terrestres

Par coordonnées géographiques (repères géographiques) d'un lieu sur la [Terre](#), on entend un système de trois coordonnées qui sont le plus souvent : la [latitude](#), la [longitude](#) et l'[altitude](#) (ou l'élévation) par rapport au [niveau moyen de la mer](#) (élévation orthométrique) ou par rapport à une surface de référence, en général ellipsoïde (élévation ellipsoïdale). [7] Donc, ce système de référence sert à repérer des emplacements sur la Terre.

### I.5.1. Latitude ( $\varphi$ )

Une latitude donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie entre 0 et  $90^{\circ}$ , positivement vers le pôle Nord et négativement vers le pôle Sud (Figure I.4). D'un point de vue mathématique, la latitude d'un point est l'angle au centre que forme la normale (verticale) en ce point avec le plan équatorial (voir la Figure I.4).

### I.5.2. Longitude (L)

La longitude (Figure I.5) représente le positionnement est-ouest d'un point sur Terre (ou sur une autre sphère), exprimée en valeur angulaire par rapport à la longitude de référence qui est le [méridien de Greenwich](#). Le [méridien](#) est la ligne épousant la courbure terrestre, reliant tous les points de même longitude du pôle Nord au pôle Sud et coupant l'équateur à angle droit. La

longitude est comptée de 0° à 180°, positivement vers l'est et négativement vers l'ouest. Par convention, le méridien de Greenwich (référence) a la longitude 0°.

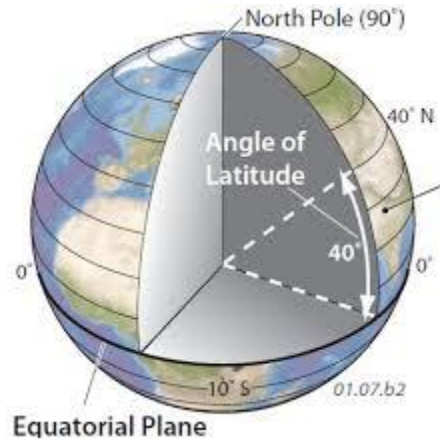


Figure I.4 : Latitude ( $\varphi$ ). [8]



Figure I.5 : Longitude ( $\varphi$ ). [9]

### I.5.3. Altitude

L'altitude est l'élévation verticale d'un lieu par rapport à un niveau de base. En d'autres termes ; c'est sa distance à une surface de niveau de référence ; le plus souvent le niveau de la mer (ou niveau zéro) est pris comme surface de référence. L'altitude est mesurée en mètre (m).

### I.6. Position du soleil

La position apparente du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées à savoir ; le système de coordonnées horaires et celui de coordonnées horizontales.

#### I.6.1. Système de coordonnées horaires

Les coordonnées horaires sont liées à l'heure de l'observation, et n'ont aucune relation avec la position de l'observateur sur la terre. Elles ont comme plan de référence le plan de l'équateur. Les coordonnées horaires sont au nombre de deux ; la déclinaison et l'angle horaire du soleil.

##### I.6.1.1. Déclinaison du soleil ( $\delta$ )

La déclinaison est l'angle que fait la direction d'observation du soleil avec sa projection sur le plan équatorial (voir la Figure I.6). Elle est exprimée en degrés (°). Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. En considérant la déclinaison  $\delta$  comme

constante sur une journée, l'équation de Copernic fournit la relation qui relie ces deux grandeurs: [4]

$$\delta = 23,45 [\sin (2\pi *(284+ n)/365)] \tag{I-5}$$

Où,

n: est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

La déclinaison solaire varie de  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver à  $+23^{\circ}27'$  au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes [10], et cette variation entraîne des variations de la hauteur du soleil pour un même site.

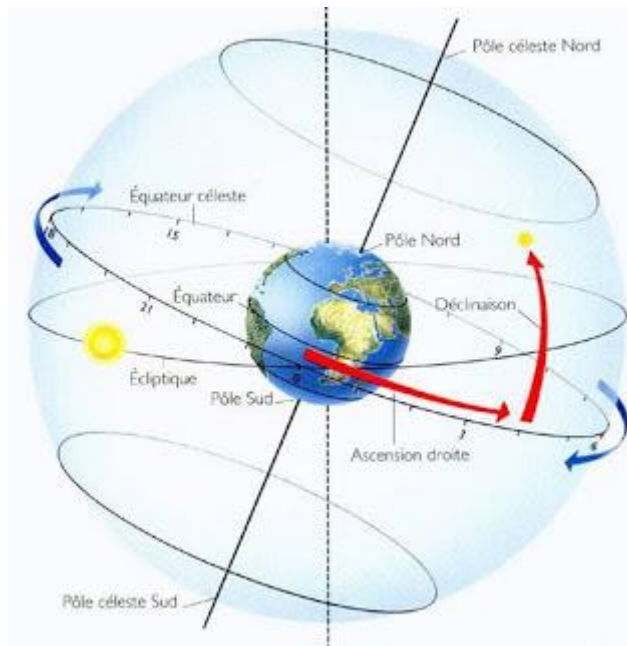


Figure I.6 : Déclinaison du soleil ( $\delta$ ). [11]

En juin, l'hémisphère nord se trouve rapprochée du soleil; qui est plus haut sur l'horizon pour une même heure qu'en décembre et la durée du jour est plus grande. L'irradiation journalière est ainsi augmentée par rapport à celle en décembre.

### I.6.1.2. Angle horaire du soleil ( $\omega$ )

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi vrai qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu (zénith). Autrement dit, c'est l'angle ou l'arc compté sur l'équateur dans le sens rétrograde à partir du plan vertical du lieu passant par le sud jusqu'au plan méridien passant par le centre du soleil. Il mesure la course du soleil dans le ciel (Figure I.7)

L'angle horaire définit le temps solaire vrai TSV, à midi TSV,  $\omega=0$  [12]. Exprimé en degrés d'angle, sa valeur est nulle à midi solaire, elle est négative le matin, positive l'après-midi et augmente de  $15^{\circ}$  par heure (le soleil fait un tour de  $360^{\circ}$  en 24 heures).

L'angle horaire  $\omega$  ( $^{\circ}$ ) est donné par la formule suivante : [13]

$$\omega = 15*(TSV-12) \tag{I-6}$$

Où,

TSV : est le temps solaire vrai en heure, il se calcul par l'équation suivante [14]:

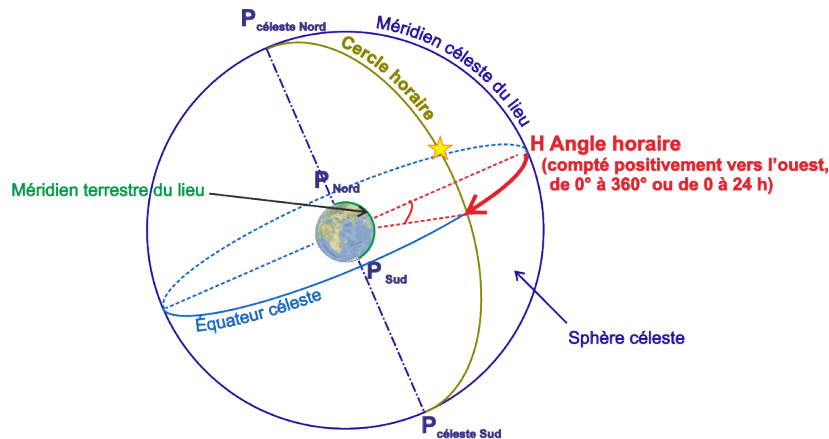


Figure I.7: Angle horaire ( $\omega$ ). [15]

$$TSV = TU + L/15 + ET \tag{I-7}$$

TU : est le temps universel du méridien de Greenwich (GMT),

L : longitude du lieu en degrés,

Et : l'équation du temps, elle est donnée en degrés par la formule suivante :

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \tag{I-8}$$

$$B = (n-81) * 360 / 364 \tag{I-9}$$

### I.6.2. Coordonnées horizontales

Le système de coordonnées horizontales, également appelé système local ou système de coordonnées alt-azimutales, est un système de coordonnées célestes utilisé en astronomie par un observateur au sol. Le système sépare le ciel en deux hémisphères : l'un situé au-dessus de l'observateur et l'autre situé au-dessous, caché par le sol. Le grand cercle séparant les deux hémisphères situe le plan horizontal, à partir duquel sont établis une altitude et un azimut, qui forment les deux principales coordonnées de ce système. [16]

#### I.6.2.1. Hauteur du soleil (H)

La hauteur angulaire du soleil, communément appelée hauteur du soleil ou élévation du soleil, est l'angle compris entre la direction apparente du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu considéré (Figure I.8). Sa valeur est nulle au lever ou au coucher du soleil. Elle varie au cours de la journée en fonction de la déclinaison  $\delta$ , de l'angle horaire  $\omega$ , et de la latitude  $\varphi$  selon la formule suivante :

$$\sin H = \cos \delta * \cos \omega * \cos \varphi + \sin(\delta) * \sin(\varphi) \tag{I-10}$$

Il s'agit de la formule fondamentale, permettant de connaître, quels que soient le jour, l'heure et le lieu, la hauteur du soleil par rapport à l'horizon.

La hauteur maximale du soleil (à midi solaire) est donnée par la formule suivante:

$$H_{\max} = \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta \tag{I-11}$$

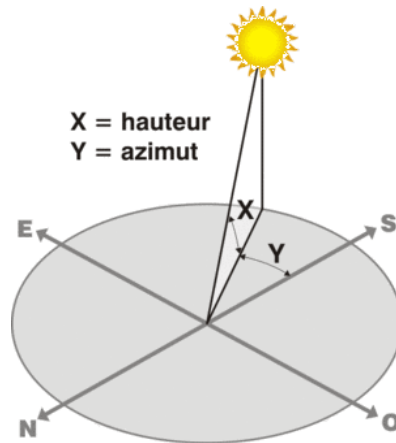


Figure I.8 : Coordonnées horizontales du soleil (H,  $\alpha$ ). [17]

**I.6.2.2. Azimut du soleil ( $\alpha$ )**

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud ou nord (Figure I.8). Il est mesuré commençant par le nord ou par le sud soit vers l'est soit vers l'ouest à travers un axe de 360° (l'azimut est compris entre  $-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ). [13]

Dans l'hémisphère nord, l'origine des azimuts correspond à la direction du sud. L'angle d'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est (voir la Figure I.9).

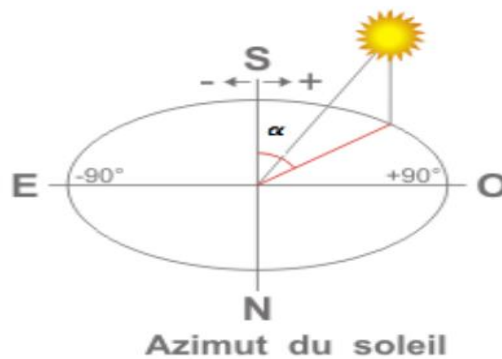


Figure I.9: Signe de l'angle d'azimut  
formule suivante :

l'angle d'azimut ( $\alpha$ ). [18]  
est calculé d'après la

$$\sin \alpha = (\cos \delta \cdot \sin \omega) / \cos H \tag{I-12}$$

**I.7. Energie solaire**

L'énergie solaire est une source d'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Elle est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, est gratuite, inépuisable et disponible partout dans le monde au moins à l'échelle des temps humains.

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

Indirectement, l'énergie solaire est aussi à l'origine de la plupart des énergies renouvelables et des hydrocarbures fossiles. Elle est en effet responsable de la mise en mouvement des masses d'eau (énergies marines) et d'air (énergie éolienne), du cycle de l'eau (énergie hydraulique) et

de la photosynthèse (biomasse et hydrocarbures). Seuls trois types d'énergie ne découlent pas de l'énergie solaire :

- l'énergie marémotrice ;
- l'énergie géothermique ;
- l'énergie nucléaire.

## I.8. Modes d'exploitation de l'énergie solaire

Il existe principalement trois grandes voies d'exploitation de l'énergie solaire, soit elle est convertie directement en électricité grâce à la technologie photovoltaïque, ou bien indirectement à l'aide des concentrateurs solaires, soit elle est convertie en chaleur grâce aux collecteurs thermiques à basse température.

### I.8.1. Electricité solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique est l'un des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité (Figure I.10) ou alimenter en énergie des procédés industriels nécessitant des hautes températures. [12]

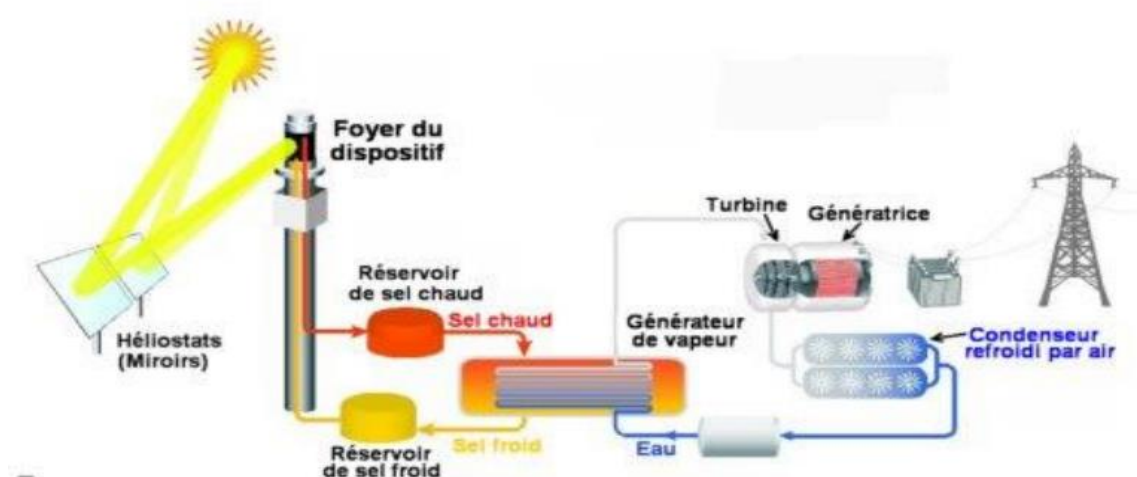


Figure I.10 : Centrale solaire thermodynamique. [19]

### I.8.2. Energie solaire thermique

Le solaire thermique permet de récupérer la chaleur du rayonnement par la mise en œuvre de capteurs solaires qui transforment l'énergie solaire en chaleur transmise à son tour à un fluide caloporteur (de l'air, de l'eau, etc.). Ce fluide restitue la chaleur dans un ballon de stockage d'eau chaude par l'intermédiaire d'un échangeur. L'eau chaude ainsi produite et stockée dans le ballon tampon, peut être utilisée de jour comme de nuit (voir la Figure I.11).

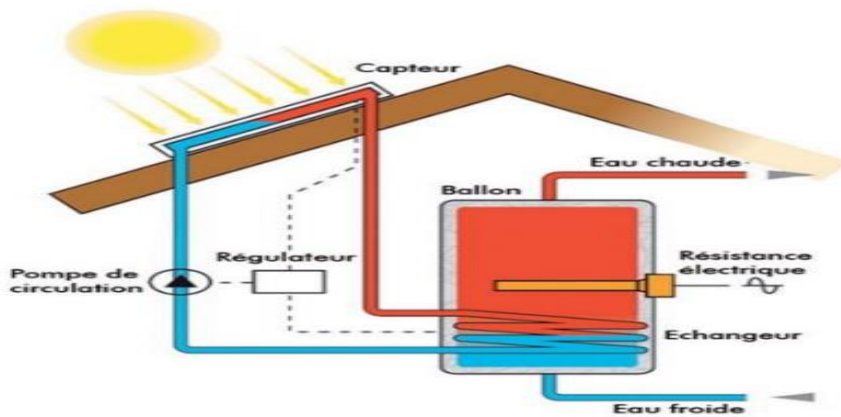


Figure I.11 : Chauffe-eau solaire. [20]

### I.8.3. Electricité photovoltaïque

Les cellules solaires transforment les rayons du soleil en énergie électrique, sans déchets, sans bruit, et sans pollution. Cette technique s'appelle « photovoltaïque ». Elle représente un élément important de l'approvisionnement en énergie du futur (voir la Figure I.12).

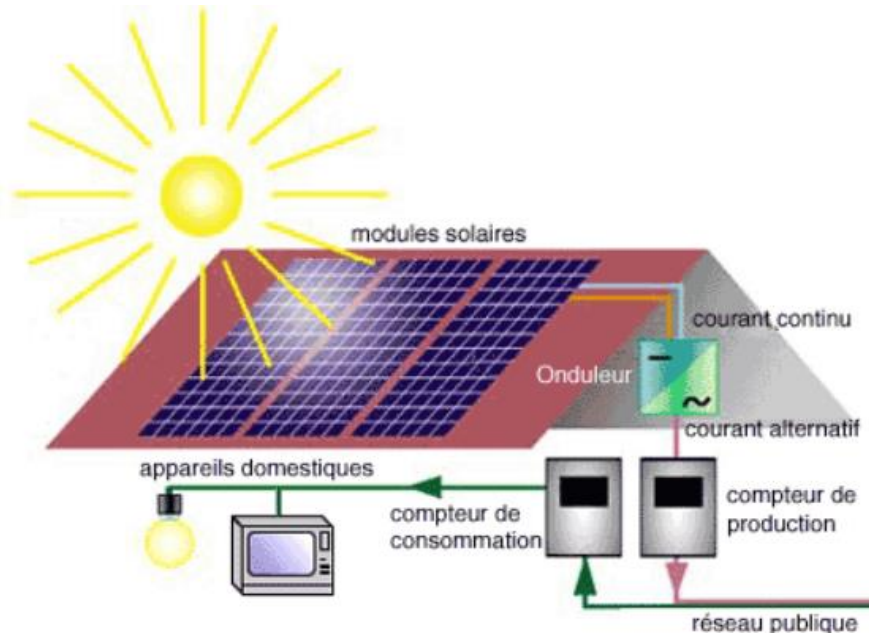


Figure I.12 : Panneaux photovoltaïques. [21]

Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module ou capteur solaire photovoltaïque et ces modules regroupés entre eux forment une installation solaire.

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. En fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage. L'électricité produite est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et de transport électrique.

## I.9. Instruments de mesure du rayonnement solaire

Les appareils diffèrent selon qu'ils mesurent l'intensité du rayonnement solaire (irradiation solaire) ou la durée d'insolation.

### I.9.1. Héliographe

L'héliographe est un instrument météorologique qui permet de mesurer la durée de l'insolation journalière en un point de la surface de la planète. Cet instrument est composé d'une boule de verre qui concentre le rayonnement solaire en un point d'un papier thermosensible qui va alors se décolorer ou brûler. Ce papier imprimé d'une échelle de temps est positionné sur un support concave, à l'arrière de la sphère (voir la Figure I.12). À la fin d'une journée, il suffit de sommer les intervalles de temps durant lesquels le rayonnement solaire a laissé des traces sur le papier pour en déduire la durée d'ensoleillement. Notons toutefois que le seuil de sensibilité du papier est de  $120 \text{ W/m}^2$ . Pour obtenir des mesures les plus proches de la réalité possible, il faut veiller à installer l'héliographe dans un endroit où celui-ci ne sera pas perturbé par l'ombre d'un objet (immeuble, etc.).

L'héliographe décrit ci-dessus est le l'héliographe de Campbell-Stokes (le plus ancien des héliographes).

Actuellement, il existe d'autres héliographes tel que l'héliographe moderne à cellules photovoltaïques.



Figure I.13 : Héliographe de Campbell-Stokes. [22]

### I.9.2. Pyranomètre

Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure du rayonnement globale en [météorologie](#). Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré. Avec cet instrument, il est possible de mesurer non seulement le rayonnement global, mais aussi le rayonnement solaire réfléchi (albédomètre) et le rayonnement diffus au moyen d'une bande d'occultation (voir la Figure I.13).



Figure I.14 : Pyranomètre à thermopile. [23]

Un courant électrique, proportionnel à l'éclairement reçu, est fourni par une thermopile protégée par deux hémisphères en verre et par un disque métallique recouvert de peinture blanche (Figure I.13). Le verre est transparent aux longueurs d'onde comprises dans la bande spectrale ( $0.3 - 2.5\mu m$ ) selon le filtre utilisé. L'appareil placé horizontalement grâce à un niveau à bulle, donne valeur de l'éclairement globale G. [24]

### I.9.3. Pyrhéliomètre

Un pyrhéliomètre est un instrument destiné à mesurer le rayonnement direct, C.à.d. le rayonnement solaire provenant de l'angle solide limité au disque solaire parvenant sur une surface unité perpendiculaire à l'axe de cet angle solide (voir la Figure I.14). L'appareil est orienté de façon que sa surface réceptrice soit normale aux rayons solaires.



Figure I.15 : Pyrhéliomètre. [24]

Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi pointé vers le Soleil. Ainsi cet instrument ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil, à l'exclusion de celui issu du ciel ou de la Terre. La lumière du Soleil pénètre dans l'instrument par une fenêtre et est ensuite dirigée sur la thermopile qui convertit la chaleur en un signal électrique qui est enregistré. Celui-ci est ensuite converti en une mesure équivalente exprimée en watts par mètre carré.

**I.9. Conclusion**

Le soleil est l'étoile indispensable à la vie sur terre. La quantité d'énergie reçue par la terre varie en fonction de sa position par rapport au soleil ainsi qu'en fonction de l'emplacement du lieu sur la Terre. En effet, en saison froide la terre reçoit moins d'énergie qu'en saison chaude. Les régions situées aux latitudes élevées reçoivent moins d'énergies que ceux sur l'équateur.

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par les collecteurs solaires.

Les appareils de mesure diffèrent selon qu'ils mesurent l'intensité du rayonnement solaire (irradiation solaire) ou la durée d'insolation ainsi, on trouve les héliographes pour la durée d'insolation et les pyranomètre pour la puissance du rayonnement.

# **Chapitre II:**

## **Suiveurs solaires**

## Chapitre II:

---

### II.1. Introduction

Comme on le sait, la conversion de l'énergie solaire dépend fortement de la quantité de rayonnement solaire interceptée par le collecteur solaire. Cette quantité est influencée par plusieurs facteurs parmi lesquels la position de la surface réceptrice par rapport au rayonnement solaire. En effet, la position idéale des collecteurs est que le rayonnement doit tomber verticalement sur la surface du collecteur afin de maximiser la quantité de rayonnement reçu.

Le soleil n'est pas fixe dans le ciel et ce, durant la journée ou au cours de l'année. Pour cela, les collecteurs solaires munis de systèmes de poursuite de la trajectoire du soleil (suiveurs solaires) sont mieux placés que les collecteurs fixes. Ce chapitre est consacré à l'étude de ces suiveurs solaires.

### II.2. Suiveurs solaires

Un suiveur solaire (Solar tracking), est un dispositif mobile permettant de suivre le soleil selon le principe de l'héliostat ou du tourne sol. Cette structure portante motorisée oriente en temps réel les collecteurs solaires vers le soleil afin d'en augmenter leur productivité de 25 à 50 %, [25] car tout au long de la journée et de l'année (selon les saisons) la position du soleil varie constamment et d'une manière différente selon la latitude.

L'idée de poursuivre la trajectoire du soleil n'est pas récente, mais elle remonte loin dans le temps. En effet, les premières applications des Trackers solaires datent des années 1750.

Pour les systèmes photovoltaïques à écran plat, les trackers sont utilisés pour minimiser l'angle d'incidence entre la lumière solaire entrante et un panneau photovoltaïque. Dans les applications photovoltaïques à concentrateur (CPV) et à énergie solaire concentrée (CSP), les trackers sont utilisés pour activer les composants optiques des systèmes CPV et CSP. [26]

### II.3. Types de suiveurs solaires

On peut classer les suiveurs solaires 'trackers solaires' selon deux critères à savoir ; la stratégie de mise en mouvement (commande) et le degré de liberté du suiveur (voir la Figure II.1).

Selon la stratégie de commande, on peut classer les suiveurs en suiveurs à base active et passive. Les suiveurs à base active peuvent être classés à leur tour en suiveurs commandés en boucle ouverte et fermée.

Selon le degré de liberté du suiveur, on peut trouver dans cette catégorie, les suiveurs à un axe de rotation et les suiveurs à deux axes.

## Chapitre II:

---

La taille de l'installation, les conditions météorologiques locales, le degré de latitude et les exigences électriques sont tous des facteurs importants pouvant influencer sur le type de suivi solaire le mieux adapté à une installation solaire spécifique.

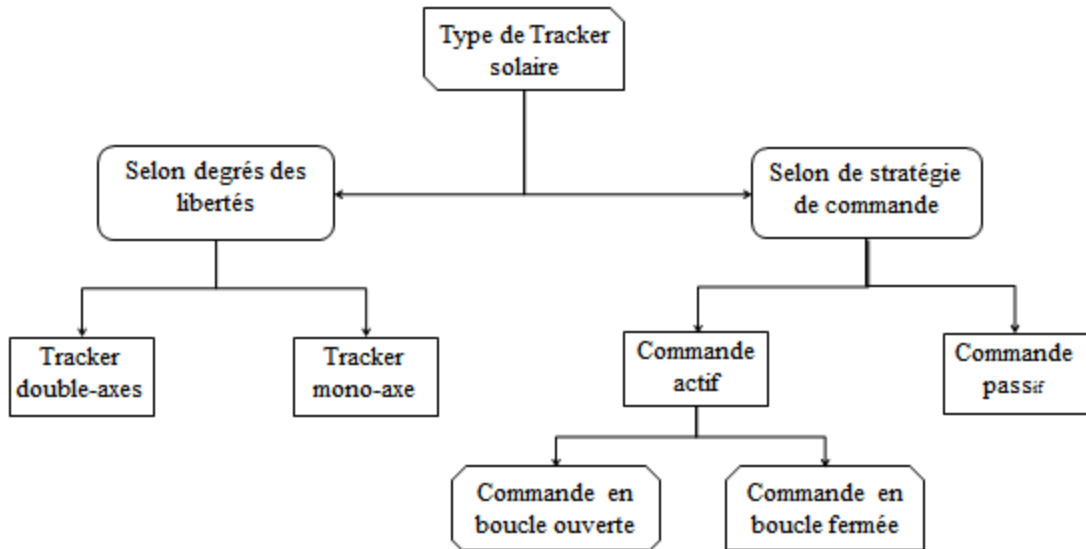


Figure II.1 : Classification des suiveurs solaires. [27]

### II.3.1. Trackers solaires passifs

Le premier type des suiveurs passifs est constitué dans son architecture de deux tubes en cuivre montés sur les côtés Est et Ouest du panneau PV (voir la Figure II.2). Le tube en cuivre est rempli de fluide chimique capable de se vaporiser à basse température.

En effet, lors de l'exposition au soleil, la température d'un côté du panneau solaire augmente, ce qui conduit à la vaporisation du fluide dans le tube en cuivre [28]. La partie du fluide vaporisé occupe ainsi, 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 panneau PV en le faisant tourner vers la source des rayons solaires. Ce type de suiveur ne consomme aucune énergie pour le repositionnement du panneau.

### II.3.2. Trackers solaires actifs

Les suiveurs solaires actifs utilisent des commandes électriques ou hydrauliques pour déplacer le tracker. Selon la commande utilisée, ils peuvent être classés en tracker en boucle ouverte ou fermée. Ces trackers présentent une meilleure précision de suivi et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les ajuster.

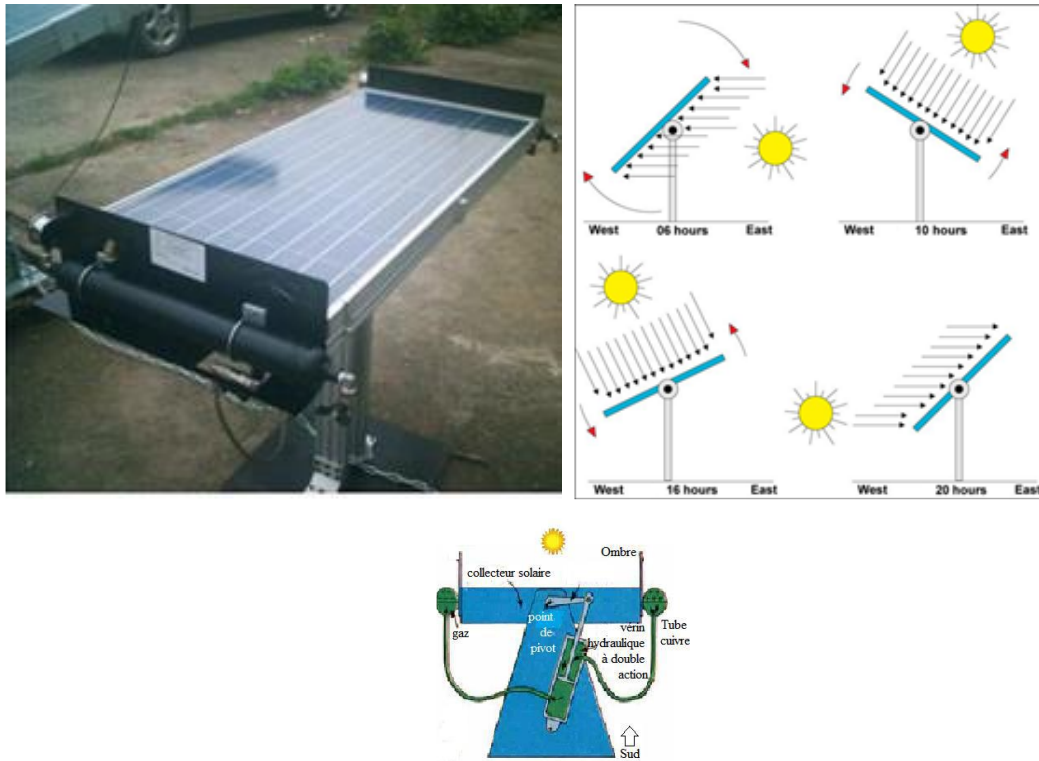


Figure II.2 : Suiveur passif. [27,28]

### II.3.2.1. Tracker en boucle ouverte

Les Trackers en boucle ouverte déterminent la position du soleil en utilisant des algorithmes commandés par ordinateurs ou par des systèmes de synchronisation (Figure II.3). Elles n'emploient aucune sensibilisation mais déterminent la position du soleil par des données pré enregistrées pour un emplacement particulier. [29]

Cette technique repose sur le calcul de la position du soleil en se basant sur les équations géométriques et astronomiques. Le système nécessite comme entrées, lors de son installation, la latitude et la longitude du site, la date du jour et l'heure. Ces données permettent de calculer l'angle d'inclinaison du panneau par rapport au plan horizontal (mouvement vertical) et l'angle d'orientation horizontale du panneau par rapport au sud (ou Azimut)). La comparaison des deux derniers angles avec leurs précédents est nécessaire afin d'ajuster la nouvelle position du moteur horizontal (angle d'azimut) et du moteur vertical (angle d'inclinaison).

### II.3.2.2. Tracker en boucle fermée

Les trackers en boucle fermée se basent sur le principe de la détection de la lumière dans le ciel, et ainsi, suivre instantanément la trajectoire du soleil en utilisant des capteurs de lumière, des photocellules. Leur principe de fonctionnement est basé sur la différence de potentiel reçue par chaque capteur de lumière.

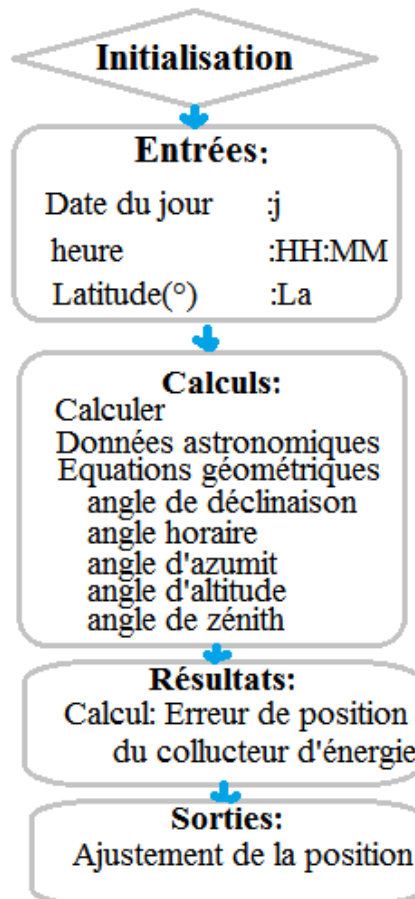


Figure II.3 : Stratégie de la commande en boucle ouverte. [27]

Quand la différence n'est pas nulle, alors le panneau n'est pas aligné correctement et une différence de potentiel est générée pour commander le moteur vers la position dont la différence soit nulle. Quand la différence est nulle alors aucun courant ne circule dans le moteur et le panneau devra être arrêté. [29]

La Figure II.4 montre la stratégie de la commande fermée qui se base sur la mesure de l'erreur de poursuite réelle pour contrôler les actionneurs du tracker. Dans ce type de techniques, la poursuite s'effectue indépendamment de la zone dans laquelle le système sera situé.

### II.3.3. Suiveur solaire mono-axe

Comme son nom l'indique, le suiveur solaire tourne autour d'un axe simple (Sud-Est). Le trajet suivi par cet axe est souvent en azimut, c'est-à-dire le panneau solaire fera face à l'Est le matin et à l'Ouest l'après-midi. L'angle d'inclinaison du panneau est fixe, il est placé selon l'angle le plus propice à recevoir le maximum de rayons du soleil durant toute l'année (latitude du lieu) ou bien, il est ajusté au début de chaque saison. Ainsi, l'angle d'inclinaison du panneau reste constant mais son azimut varie au cours de la journée. Le système de poursuite mono-axial est la solution la plus simple et la plus utilisée, mais la moins précise. A cette catégorie appartiennent les suiveurs à axe horizontal et les suiveurs à axe vertical.

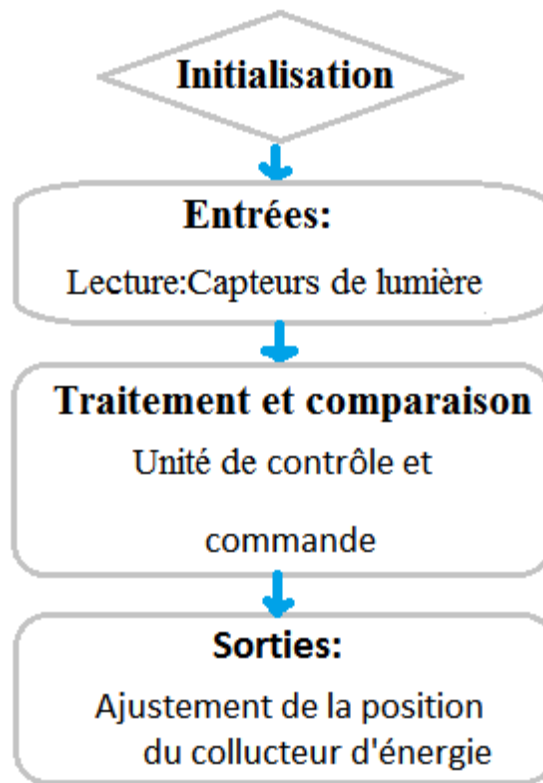


Figure II.4 : Stratégie de la commande en boucle fermée. [27]

### II.3.3.1. Suiveurs à axe horizontal

Malgré leur conception simple, ce type de suiveurs n'apporte que très peu de gain par rapport aux systèmes fixes. Il est plus intéressant d'utiliser les suiveurs à axe vertical qu'à axe horizontal surtout dans les régions aux latitudes élevées (Figure II.5).

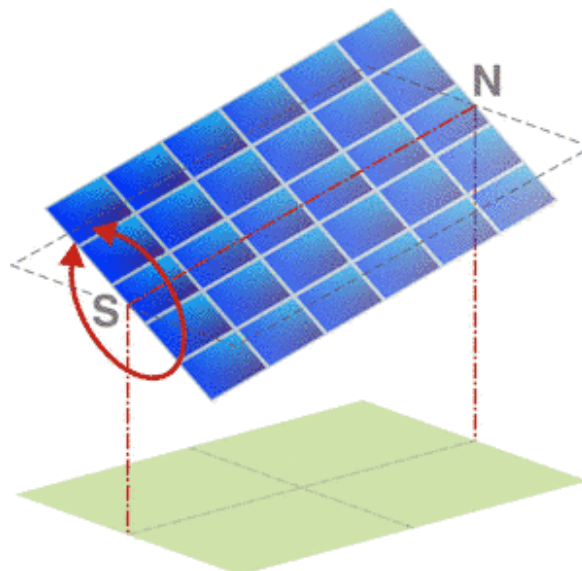


Figure II.5: Suiveur à 1 axe horizontal. [30]

## Chapitre II:

---

### II.3.3.2. Suiveurs à axe vertical incliné

Ce type de suiveur permet un gain d'environ 20% pour un GCR de 25%. Il est souvent moins imposant que les suiveurs à 2 axes, moins coûteux et permet d'installer plus de puissance sur un terrain donné comparé aux 2 axes. [30] Ce type de suiveurs est illustré sur la Figure II.6.

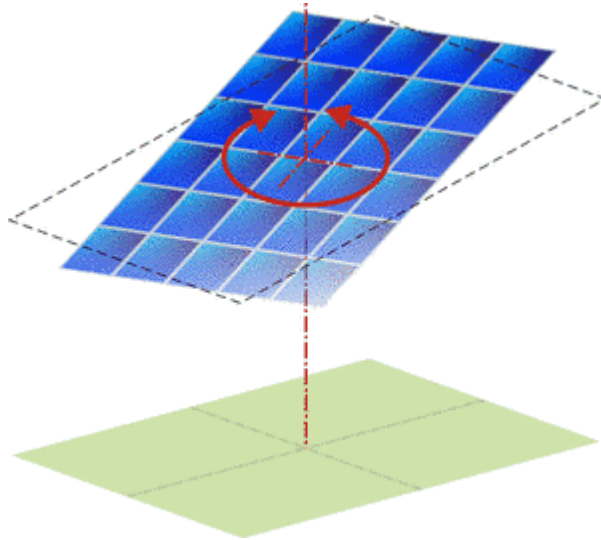


Figure II.6: Suiveur à axe vertical incliné. [30]

### II.3.4. Suiveurs solaires à double axes

Contrairement au précédent, ce suiveur solaire possède deux axes de rotation (Est-Ouest/ et Nord-Sud), ce qui lui permet de suivre les mouvements du soleil en azimut et en inclinaison au cours de la journée (Figure II.7). Ainsi, le capteur, doté du suiveur à double axes, reste constamment dirigé vers le soleil. Ce type de suiveurs est très imposant et fournit de meilleures performances par rapport au suiveur mono-axe.

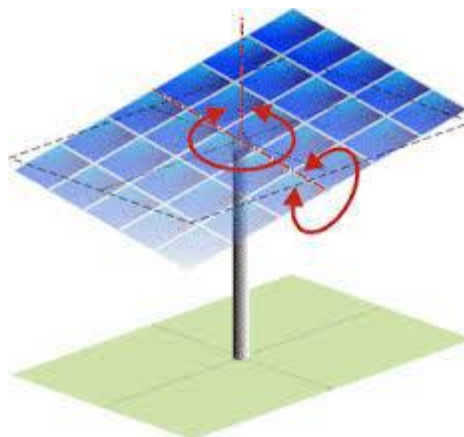


Figure II.7: Suiveur à double axes. [30]

### II.4. Avantages et inconvénients de suiveurs solaires

Tout produit a des avantages et des inconvénients, c'est le cas aussi des suiveurs solaires. En effet, les systèmes de suivi solaires sont utilisés pour orienter les capteurs continuellement vers le soleil. Ainsi, ces derniers sont plus exposés au soleil que les capteurs fixes. Ils peuvent aider à minimiser l'investissement en augmentant le rendement des capteurs qui peuvent fonctionner même en présence des nuages. Cependant, en cas de pannes du suiveur, l'intervention est difficile ou délicate [8-31].

Les progrès de la technologie et de la fiabilité des composants électroniques et mécaniques ont considérablement réduit les problèmes de maintenance à long terme des suiveurs solaires.

Les systèmes de suivi sont légèrement plus chers que leurs homologues fixes, en raison de la technologie plus complexe et des pièces mobiles nécessaires à leur fonctionnement.

Les suiveurs solaires sont généralement conçus pour les climats avec peu ou pas de neige, ce qui en fait une solution plus viable dans les climats plus chauds. Le rayonnement fixe s'adapte plus facilement aux conditions environnementales difficiles que les systèmes de suivi. En effet, pour des raisons de sécurité, les panneaux solaires doivent être parallèles au sol lors de vents forts

### II.5. Conclusion

Un tracker solaire, traqueur solaire ou suiveur de Soleil est un dispositif inventé afin de suivre la trajectoire du soleil et ainsi permettre aux collecteurs solaires de se pointer vers le soleil, ce qui a pour effet, d'augmenter leur capacité de collecter plus de rayonnement solaire (plus d'énergie à convertir).

Les suiveurs solaires peuvent être mono-ou bi axiaux, mis en mouvement selon différentes stratégies (commande physique, électrique ou hydraulique).

## **Chapitre III**

# **Réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino**

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente la procédure adoptée afin de réaliser un suiveur solaire à base d'une carte Arduino. Ce dernier comprend le corps du suiveur (partie mécanique) et la commande de mise en mouvement (partie électronique).

Le suiveur solaire réalisé, se base principalement sur un automate capable de suivre une source lumineuse en s'orientant de façon optimale en direction des rayons lumineux et ce, suivant deux axes de rotation (vertical et horizontal) grâce à deux moteurs commandés par la carte Arduino (le microcontrôleur).

### III.2. Description des composants électroniques utilisés

#### III.2.1. Carte Arduino Uno

Arduino est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation.

La carte Arduino est une petite carte électronique (5,33 x 6,85 cm), équipée d'un microcontrôleur qui permet, à partir d'événements détectés (lumière du soleil dans notre cas) par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs (Figure III.1). La carte Arduino est donc une interface programmable, très simple à utiliser. Elle peut se connecter à un ordinateur sous OS Windows, Mac ou Linux.



Figure III.1 : Projet Arduino. [32]

Arduino est un projet open source. En effet, les plans de la carte, les schémas, etc. sont accessibles et libres de droits. La grande communauté d'utilisateurs et de concepteurs permet à chacun de trouver les réponses à ses questions et apporte un travail énorme de documentation au projet.

L'Arduino est utilisé dans plusieurs applications comme l'électrotechnique industrielle, la domotique, le pilotage de robots, etc.

Les projets Arduino peuvent être autonomes, comme ils peuvent communiquer avec d'autres logiciels installés sur ordinateur tel que Flash, Processing ou MaxMPS, Matlab.

## Chapitre III: Réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino

### III.2.1.1. Constitution de la carte Arduino Uno

La carte Arduino, comme mentionnée précédemment, est composée de deux parties principales à savoir : le matériel et le logiciel. Concernant le matériel (voir la Figure III.2), cette carte est basée sur un microcontrôleur ATmega 328 qui reçoit le programme et le stocke dans sa mémoire puis l'exécute. Son prix est relativement bas pour l'étendue possible des applications.

La carte Arduino contient aussi une mémoire morte de 1 kilo. Elle est dotée de 14 broches entrées/sorties digitales (dont 6 peuvent être utilisées en tant que sortie PWM), 6 entrées analogiques et un oscillateur en quartz à 16 MHz, une connexion USB et possède un bouton de remise à zéro (reset) et une prise jack d'alimentation. La carte peut être alimentée en 5V par le port USB ou bien par une alimentation externe qui est comprise entre 7V et 12V. Cette tension doit être continue et peut être par exemple fournie par une pile de 9V.

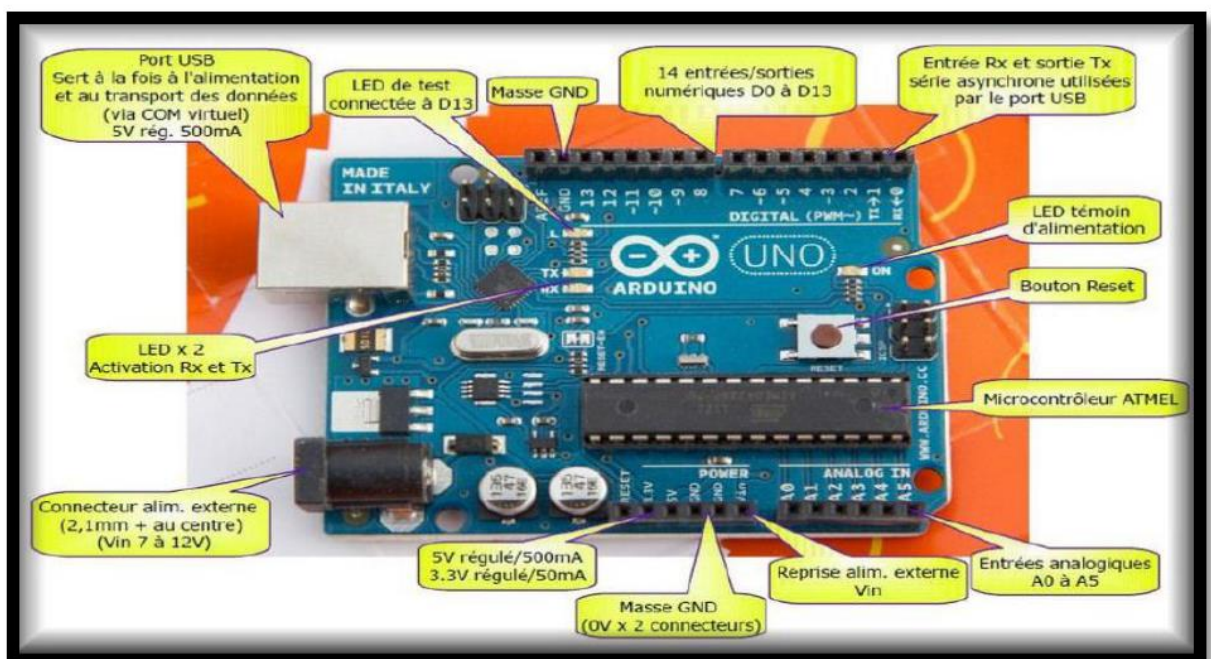


Figure III.2: Constitution de la carte Arduino UNO. [32]

Les LED de taille petite (de l'ordre du millimètre) sont au nombre de quatre (04). Trois alignés au milieu de la carte et un LED témoin d'alimentation à gauche.

Parmi les LED alignés, le LED en haut du cadre connecté à une broche du microcontrôleur et qui sert à tester le matériel.

Les deux LED du bas du cadre servent à visualiser l'activité sur la voie série (une pour l'émission et l'autre pour la réception). Le téléchargement du programme dans le microcontrôleur se faisant par cette voie, on peut les voir clignoter lors du chargement.

## Chapitre III: Réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino

Le Tableau III.1 présente les caractéristiques techniques de la carte Arduino utilisée dans notre projet.

**Tableau III.1:** Caractéristiques techniques de la carte Arduino UNO.

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

### Remarques :

-La carte Arduino Uno est livrée prête à fonctionner, il suffit de la connecter à un ordinateur par câble USB et de l'alimenter à l'aide d'un adaptateur USB ou de piles,

-Les entrées analogiques 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.

-Les sorties numériques sont reliées aux actionneurs qui agissent sur le monde physique telle une petite lampe qui produit de la lumière, un moteur qui actionne un bras articulé... etc.

La plateforme IDE ARDUINO qui est la partie logicielle fonctionnant sur PC, permet de mettre au point et de transférer le programme qui sera par la suite exécutée par la carte Arduino. Son interface se présente comme suit :

## Chapitre III: Réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino



Figure III.3 : Interface de la plateforme Arduino. [32]

Où,

La barre 1 représente les options de configuration du logiciel,

La barre 2 présente les boutons nécessaires pour la programmation des cartes Arduino (voir la Figure III.4),

Le casier 3 est réservé au programme à créer,

Le casier 4 est le débogueur (affichage des erreurs de programmation).



Figure III.4 : Boutons de l'interface de la plateforme Arduino. [32]

Les boutons illustrés sur la Figure III.4 servent à :

Le bouton 1 permet de vérifier le programme à exécuter, il actionne un module qui cherche les erreurs du programme,

Le bouton 2 sert à créer de nouveau fichier,

Le bouton 3 sert à sauvegarder le programme en cours,

Le bouton 4 permet de faire des liaisons en série,

Le bouton 5 permet de stopper la vérification du programme à exécuter,

Le bouton 6 sert à charger un programme existant,

## Chapitre III: Réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino

Le bouton 7 compile et envoie le programme vers la carte.

Comme mentionné précédemment, la carte Arduino utilisée dans notre projet nous a coûté 3500 DA

### III.2.2. Capteurs de lumière LDR

La photorésistance **LDR** (**L**ight **D**épendent **R**ésistor ou résistance dépendant de la lumière) est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle il est exposé. D'ailleurs, sa résistance est inversement proportionnelle au flux lumineux incident.

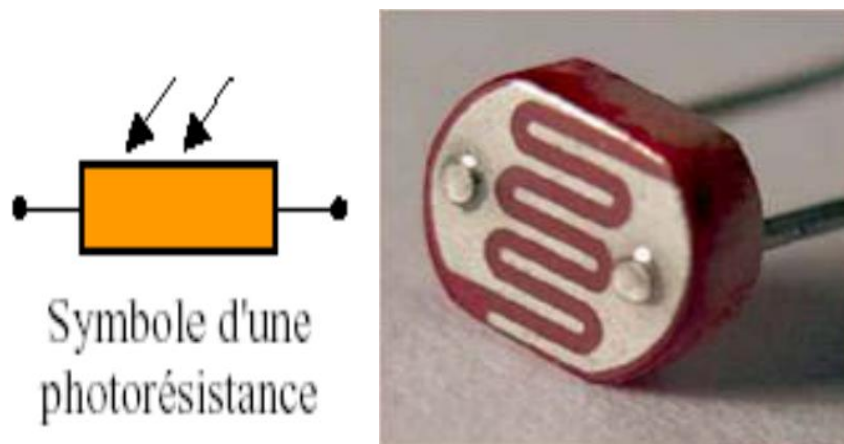


Figure III.5 : Capteur de lumière LDR.

Les matériaux utilisés dans la fabrication des LDR sont généralement du Sulfure ou du Sélénure de Cadmium qui se comportent comme des semi-conducteurs, ce qui leur confère un temps de réponse de 120 millisecondes pour un éclaircissement de 10 lux (valeur pour des conditions d'ensoleillement faible). [33]

Ce capteur de mesure de l'intensité lumineuse (LDR) est fortement concurrencé par la photodiode. Dans notre projet on a choisi d'utiliser la LDR (Voir la Figure III.5), vu son plus court temps de réponse.

Le Tableau III.2 représente les valeurs typiques de fonctionnement de la photorésistance solaire utilisée. [33]

Tableau III.2 : Caractéristiques de la LDR utilisée

Caractéristique	Valeur
Résistance à la lumière	minimum = 20 kOhms
Résistance d'obscurité	20MOhms
Temps de chute	55ms
Temps de croissance	45ms
Matériau de la résistance	sulfure de cadmium (CdS)
Nombre de broches	2
Résistance à la lumière maximum	100kOhms
Température d'utilisation maximum	75°C

### III.2.3. Servomoteurs

Les servomoteurs sont des moteurs un peu spécifiques, qui peuvent produire un mouvement précis en réponse à une commande externe (actionneurs). Les servomoteurs peuvent tourner avec une liberté d'environ 180° et garder de manière relativement précise l'angle de rotation que l'on souhaite obtenir.

Les servomoteurs sont couramment rencontrés en :

- modélisme afin de contrôler les systèmes mécaniques tels que ; les gouvernes d'avion, accélérateur de moteur thermique, etc.,

- robotique pour fabriquer des minirobots, des actionneurs ou des indicateurs rotatifs.

[34]

Le servomoteur est constitué d'éléments visibles suivants (voir la Figure III.6):

- fils,

- axe de rotation sur lequel est monté un accessoire en plastique ou en métal,

- boîtier qui le protège. Ce dernier contient (voir la Figure III.7) :

- Un moteur à courant continu,

- Des engrenages pour former un réducteur,

- Un capteur de position de l'angle d'orientation de l'axe (bien souvent, un potentiomètre),

- Une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu.

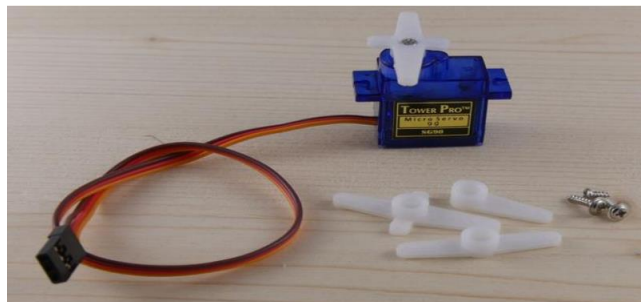


Figure III.6 : Servomoteur utilisé (chinois "9 grammes")

Il existe divers types de servomoteurs, de tailles, de poids et de couples (forces) différents. Dans notre cas, on a utilisé deux servomoteurs identiques de puissance (10 kg) MG996R. Chaque servomoteur contient trois fils, un pour l'alimentation, l'autre pour la masse (GND) et le dernier pour le signal d'entrée (la commande).

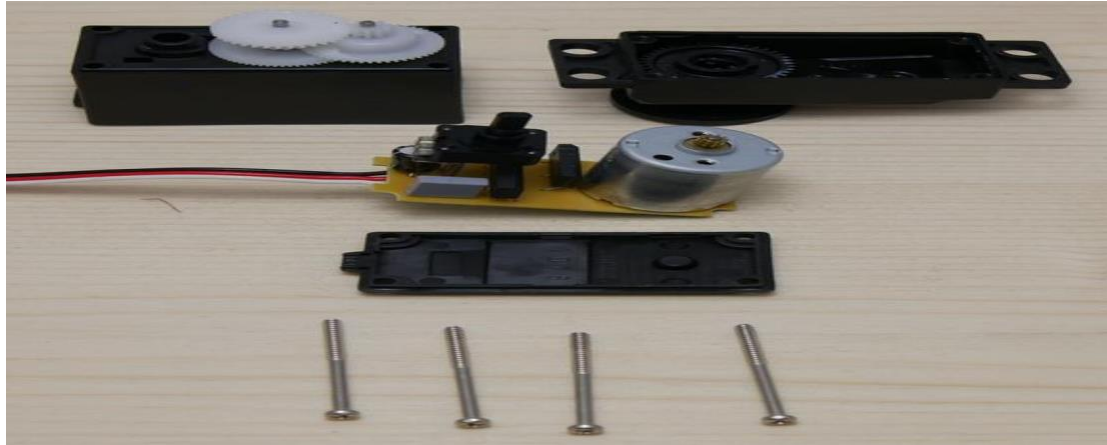


Figure III.7: Vue éclatée d'un servomoteur. [35]

Le Tableau III.3 représente les caractéristiques de fonctionnement des servomoteurs utilisés la photorésistance solaire utilisée.

Tableau III.3 : Caractéristiques du servomoteur utilisé

Caractéristique	Valeur	
Nombres de broches	3 fils	
	Marron	Masse
	Rouge	Vcc
	Orange	Commande
Dimension	240 x 20 x 36,5mm	
Poids	60g	
Tension d'alimentation Min	4.8V à 6V	
Tension d'alimentation Max	6V	
Vitesse	0.16s/60° sous 4.8V - 0.13s/60° sous 6.0V	
Couple	11kg/cm sous 4.8V – 13kg/cm sous 6.0V	

### III.2.3.1. Fonctionnement interne du servomoteur

Les servomoteurs sont commandés par l'intermédiaire d'un câble électrique qui leurs transmet des consignes de position sous forme d'un signal codé en largeurs d'impulsions communément appelé PWM. Cela signifie que c'est la durée des impulsions qui détermine l'angle absolu de l'axe de sortie et donc la position de bras de commande du servomoteur. En effet, un petit circuit électronique permet de contrôler le moteur à courant continu en fonction de la position d'un potentiomètre intégré au servomoteur. La sortie du moteur à courant continu est reliée mécaniquement à une série d'engrenages qui augmente la force (le couple) du servomoteur en réduisant la vitesse de rotation de celui-ci.

Quand le moteur tourne, les engrenages s'animent, le bras bouge et entraîne avec lui le potentiomètre. Le circuit électronique ajuste continuellement la vitesse du moteur pour que le potentiomètre (et par extension le bras) reste toujours au même endroit. Pour que le servomoteur

## Chapitre III: Réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino

reste à une position donnée, il faut transmettre toutes les 20 millisecondes (soit à une fréquence de 50Hz) une impulsion d'une longueur comprise entre 1 et 2 millisecondes (voir la Figure III.8).

- Une impulsion de 1 milliseconde correspond 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, par exemple l'angle  $90^\circ$  est obtenu avec une impulsion de 1.5 milliseconde.

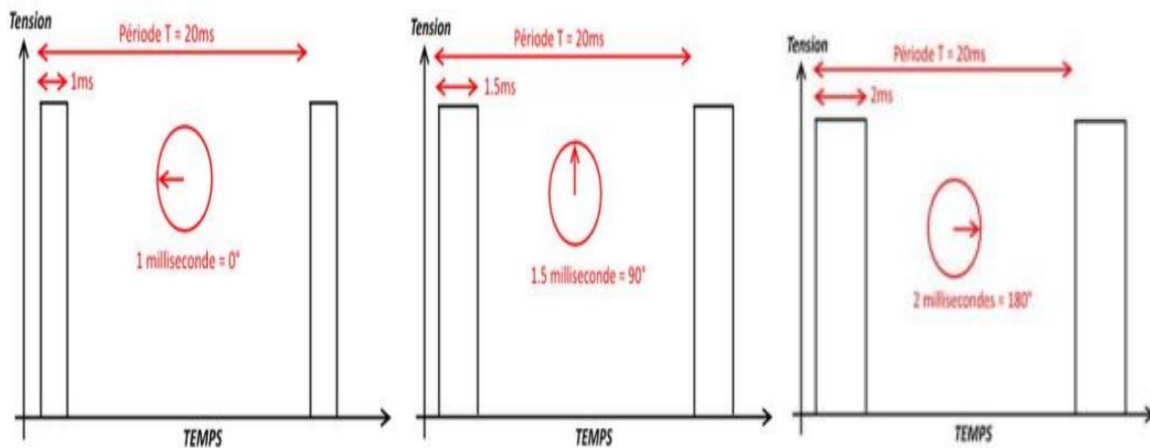


Figure III.8 : Signal de contrôle. [36]

### III.2.4. Câblages

#### III.2.4.1. Câble USB

Le câble USB permet à la fois d'alimenter un projet Arduino, de programmer la carte (via Arduino IDE), mais aussi d'utiliser le Moniteur Série. [37]



Figure III.9 : Câble USB de type A/B. [37]

#### III.2.4.2. Fils de Pin d'Arduino

Ces fils males sont utilisés pour brancher et connecter l'Arduino avec d'autres pièces (actionneurs) et pour la tester (Figure III.10).



Figure III.10. Fils de pin d'Arduino

### III.2.5. Plaque d'essai

La plaque d'essai est une plaque en plastique isolant parsemé de plein de trous, espacés de 2.54 mm qui est l'espacement standard des composants électroniques utilisé dans les montages courants (voir la Figure III.11). Ces trous permettent d'enfoncer des composants sans passer par la soudure afin de les relier entre eux dans le but de réaliser le montage à tester. Autrement dit, la plaque d'essai est un dispositif qui permet de réaliser rapidement un montage électronique en insérant les pattes des composants et les fils dans les trous.

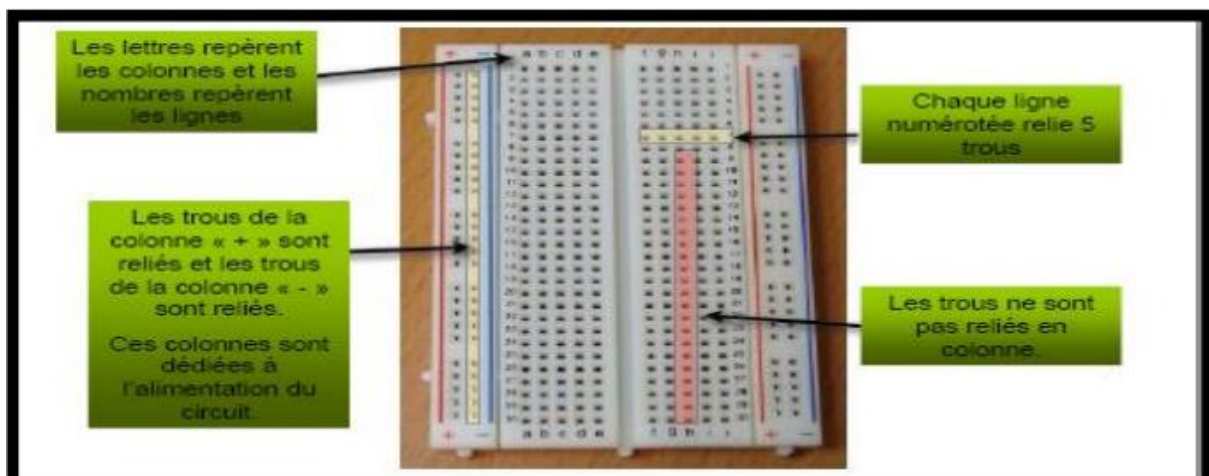


Figure III.11 : Plaque d'essai sans soudure. [38]

### III.3. Description des composants mécaniques utilisés

Le dispositif mécanique réalisé, est composé d'un assemblage en bois de deux axes (voir la Figure II.12) mobiles à savoir l'axe horizontal et l'axe vertical, d'une plaque sur laquelle sont placés quatre capteurs LDR encerclés par des cercles noirs comme illustré sur la Figure III.12 et d'une base qui porte les éléments qu'on vient de citer.

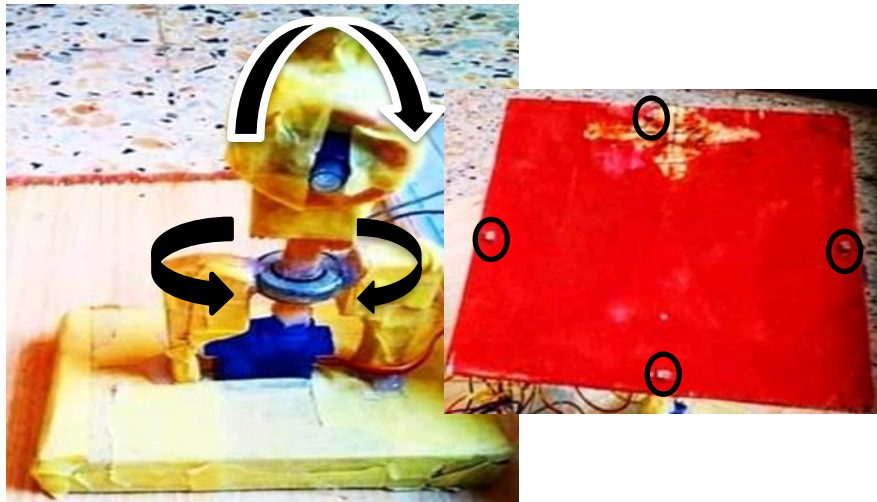


Figure III.12 : Partie mécanique du dispositif réalisé

En outre, l'axe horizontal tourne d'Est en Ouest ce qui permet de suivre le soleil au cours de la journée, du lever au coucher du soleil. L'axe vertical par contre prend en considération la variation de la hauteur du soleil au cours de l'année.

### III.4. Réalisation du suiveur solaire

La Figure III.13 montre le schéma fonctionnel du suiveur à réaliser. Les capteurs de lumière LDR représentent les entrées de la carte Arduino qui va contrôler les deux servomoteurs (sortie de la carte), reliés à leur tour aux axes de rotation de la plaque de suivi (partie mécanique du suiveur).

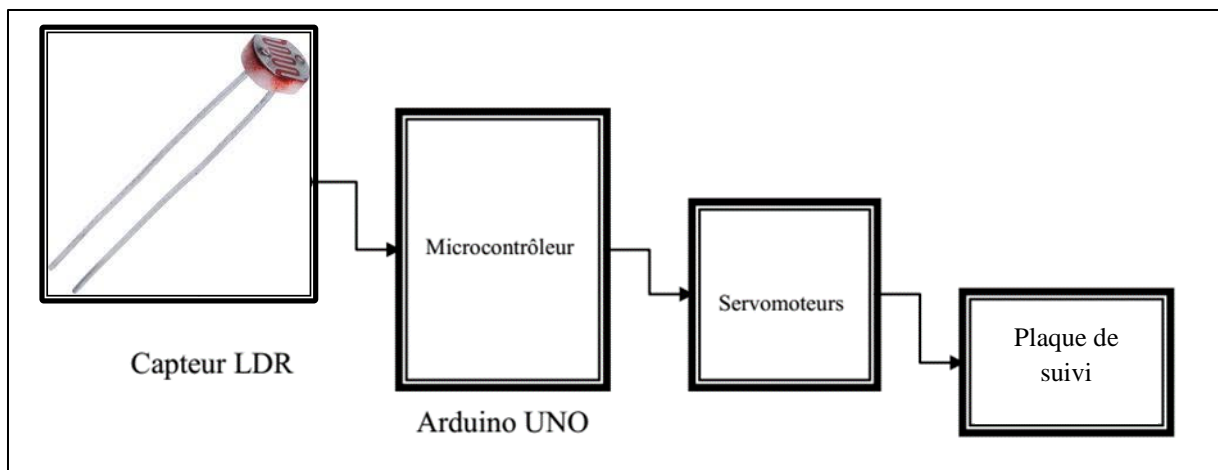


Figure III.13 : Schéma fonctionnel du dispositif réalisé.

### III.4.1. Assemblage mécanique

On a assemblé les éléments mécaniques décrits ci-dessus (Cf. §III.3) pour obtenir la structure du suiveur (Figure III.14), qui a la capacité d'être facilement positionnée pour suivre le mouvement du soleil.

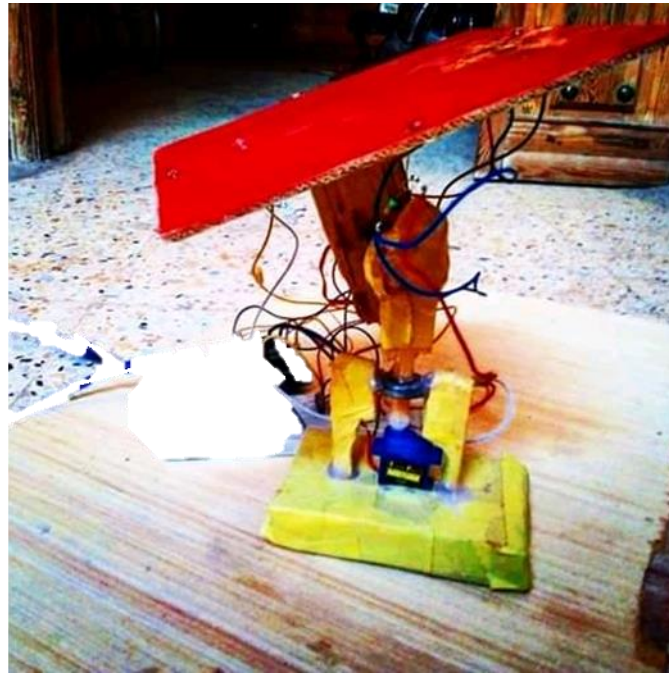


Figure III.14 : Partie mécanique du suiveur.

### III.4.2. Programmation

Le système à réaliser vise à orienter, tout au long de l'année, la plaque de suivi vers le soleil, pour recevoir le maximum de rayonnement. Cette dernière doit donc, être constamment perpendiculaire au rayonnement incident, ce qui se traduit par la même quantité d'énergie reçue par les quatre photorésistances (LDR). En fait, la lumière reçue par les LDR génère des tensions à leurs bornes qui vont être envoyées à la carte Arduino et converties en valeurs numériques. Le programme de suivi consiste à comparer ces tensions en ordonnant aux servomoteurs de pivoter dans la direction des photorésistances qui reçoivent le plus de lumière comme illustré sur les organigrammes des Figures III.15 et III.16.

Il est à noter qu'il faut différencier entre le mode jour et nuit via les tensions des capteurs de lumière LDR. Si la tension délivrée est inférieure à  $V_s$  (tension seuil en V) aucun changement n'est porté à la position de la plaque de suivi, le système est en mode arrêt.

## Chapitre III: Réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino

La carte Arduino-Uno est une carte programmable, le programme de poursuite solaire sous l'IDE Arduino embarqué dans le microcontrôleur ATMEGA 328 est donné en Annexe 1.

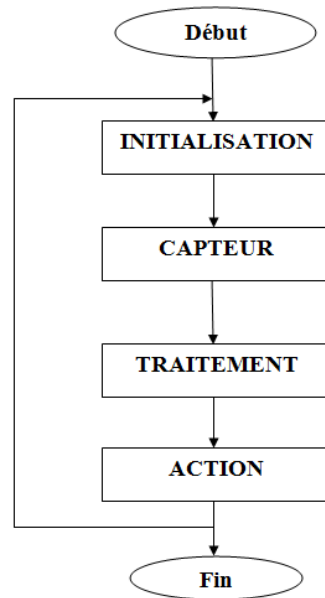


Figure III.15 : Organigramme général de la poursuite solaire à base d'Arduino Uno.

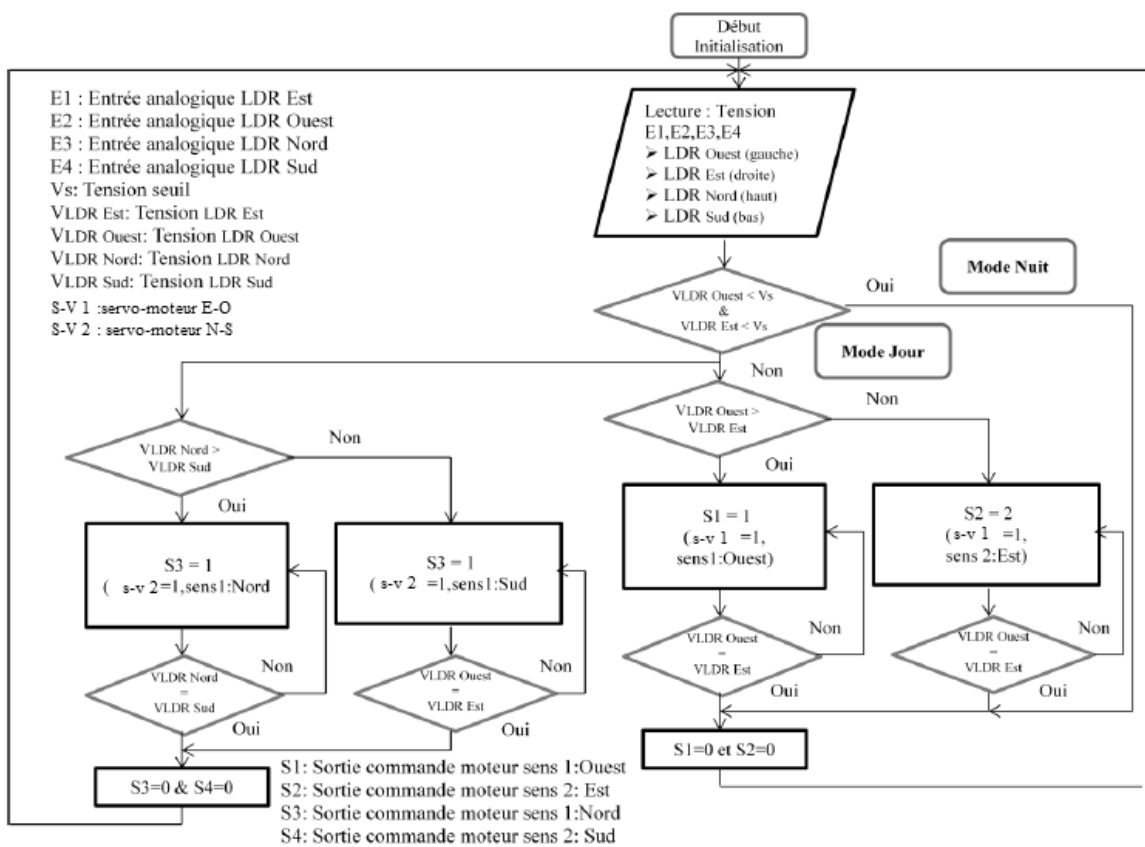


Figure III.16 : Organigramme de la poursuite solaire à deux axes.

### III.4.3. Assemblage électronique

Le circuit de puissance est la partie intermédiaire qui relie les servo-moteurs au microcontrôleur. L'Arduino génère en sortie 4 signaux qui vont piloter les deux servomoteurs, l'un servira pour le déplacement azimuthal et l'autre pour l'élévation (voir la Figure III.17). En d'autre terme, l'Arduino ordonnera le sens, la direction du déplacement à effectuer pour trouver la position du rayonnement maximal et assurer la poursuite du point maximum. Une fois ce point est atteint les moteurs se mettent à l'arrêt.

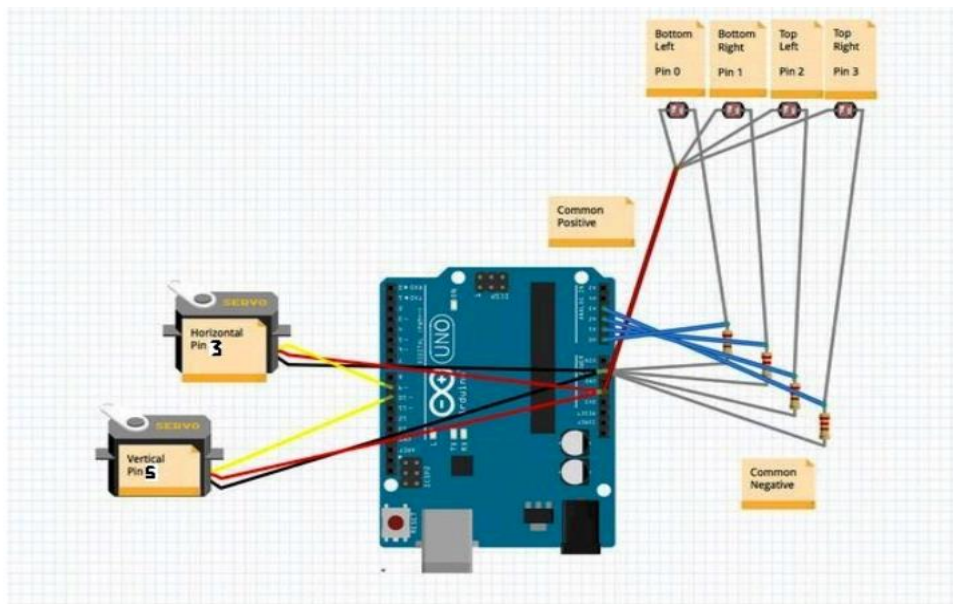


Figure III.17 : Circuit de puissance.

Le produit final réalisé est présenté sur la Figure III.18.

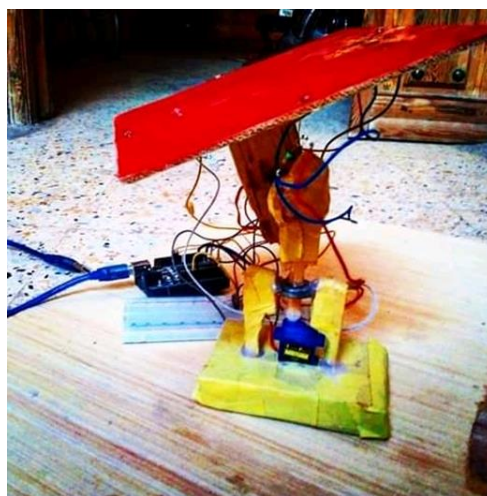


Figure III.18 : Suiveur solaire réalisé.

### **III.5. Conclusion**

La réalisation du suiveur solaire nécessite un bon choix des composants électroniques utilisés pour ne pas compliquer le principe de la commande et pour réduire la consommation énergétique du suiveur.

Nous avons réussi à réaliser le principal objectif de ce projet, soit monté et faire fonctionner un suiveur solaire, s'adaptant aux trajectoires du soleil afin de récupérer le maximum d'énergie possible.

Ce projet ne nous a pas coûté une grande somme d'argent.

# **Conclusion général**

## Conclusion général

---

La conversion de l'énergie solaire dépend fortement de la quantité de rayonnement solaire interceptée par le collecteur solaire qui est influencée par plusieurs facteurs parmi lesquels la position de la surface réceptrice par rapport au rayonnement solaire. En effet, la position idéale des collecteurs est que le rayonnement doit tomber verticalement sur la surface du collecteur afin de maximiser la quantité de rayonnement reçu.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la Réalisation d'un Suiveur Solaire à l'aide de composants électroniques programmables gérés par un microcontrôleur (carte Arduino UNO).

Malgré la situation actuelle (pandémie du COVID19), nous avons réalisé un suiveur solaire capable de suivre la position du soleil et fonctionnel aux environs de 100% avec quelques imperfections qu'on recommande d'améliorer.

Ce projet de fin d'études multidisciplinaire était pour nous l'occasion d'apprendre comment commander des systèmes mécaniques en utilisant un savoir-faire, purement électronique, en plus d'apprendre à travailler en collaboration avec des étudiants d'autres départements.

En perspective, on souhaite améliorer notre produit.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Yingni Jiang, « Computation of monthly mean daily global solar radiation in China using artificial neural networks and comparison with other empirical models », *Energy* 34, 1276–1283, 2009.
- [2] Bessemoulin, P., Olivieri, J., « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », *La Météorologie* 8e série, n° 3, Septembre 2000.
- [3] <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/>
- [4] Document, RETScreen International Centre d'aide à la décision sur les énergies propres, « Analyse de projets d'installation photovoltaïque », Ministère de Ressources Naturelles, Canada 2001-2004.
- [5] MEBREK, Y., « Contribution à l'étude et éléments d'une modélisation des photovoltaïque », Mémoire de Magister, Ecole Doctorale « énergies renouvelables » unité de recherche des matériaux et énergies renouvelables, Université de Tlemcen, juin 2011.
- [6] <https://www.geogebra.org/resource/ruGqZaDT/f3stVPR5wUJTlf4d/material-ruGqZaDT.png>
- [7] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es\\_g%C3%A9ographiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es_g%C3%A9ographiques)
- [8] <https://geography.name/what-do-latitude-and-longitude-indicate/>
- [9] [https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/edu\\_longitude\\_large.png](https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/edu_longitude_large.png)
- [10] Ait cheikh, S. M., « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », thèse de Doctorat d'Etat en électronique, Ecole Nationale Polytechnique, soutenue en Décembre 2007.
- [11] [https://1.bp.blogspot.com/Yqbk3eYWoNs/WCioYUAKCgI/AAAAAAAAAIk/cYP4SU m7PGU1AWH5VmAERBoZhm7\\_pLCJwCLcB/s1600/equa4.jpg](https://1.bp.blogspot.com/Yqbk3eYWoNs/WCioYUAKCgI/AAAAAAAAAIk/cYP4SU m7PGU1AWH5VmAERBoZhm7_pLCJwCLcB/s1600/equa4.jpg)
- [12] Chasseriau, J.M., « Conversion Thermique du Rayonnement Solaire », Ed. Dunod, France, 1984
- [13] Capderou, M., « Atlas Solaire de l'Algérie, modèles théoriques et expérimentaux », Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987
- [14] MAHDI, K., « Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique », mémoire de Magister en physique, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [15] <http://www.meridienne.org/images/angle-horaire.gif>
- [16] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_de\\_coordonn%C3%A9es\\_horizontales](https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_de_coordonn%C3%A9es_horizontales)
- [17] [https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/RTEmagicC\\_1-3-3-3-F1c\\_02.gif.gif](https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/RTEmagicC_1-3-3-3-F1c_02.gif.gif)
- [18] HAI ABDELHAKIM .HAMMADOU SOUHIL. «Etude de corrélation entre l'irradiation solaire et factures météorologiques» UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAÏA FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
- [19] KADRI Ibtissem «Etude, Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil» UNITE DE RECHERCHE EN MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES
- [20] KADRI Ibtissem «Etude, Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil» UNITE DE RECHERCHE EN MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES
- [21] KADRI Ibtissem «Etude, Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil» UNITE DE RECHERCHE EN MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES
- [22] [https://cdn.futura-sciences.com/buildsv6/images/mediumoriginal/f/5/8/f5805071a4\\_101696\\_stokes-campbell-heliographe.jpg](https://cdn.futura-sciences.com/buildsv6/images/mediumoriginal/f/5/8/f5805071a4_101696_stokes-campbell-heliographe.jpg)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [23] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d0/SR20\\_pyranometer\\_1.jpg/800px-SR20\\_pyranometer\\_1.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d0/SR20_pyranometer_1.jpg/800px-SR20_pyranometer_1.jpg)
- [24] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5b/DR01\\_pyrheliometer\\_1.jpg/220px-DR01\\_pyrheliometer\\_1.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5b/DR01_pyrheliometer_1.jpg/220px-DR01_pyrheliometer_1.jpg)
- [25] Khalfallaoui, S., « Comportement dynamique et automatisation d'un système solaire thermique muni d'un traqueur solaire » (Doctoral dissertation, Rouen), 2009.
- [26] Abu-Khadera, M. M., Badranb, O. O., et Abdallah, S., « Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan », *Renewable and Sustainable Energy Re-views*, 12 (2008), pp. 864–873.
- [27] <https://www.hisour.com/fr/solar-tracker-39716/>
- [28] Khellout, A.A, Khellout, A., « Etude et Réalisation d'un Tracker solaire autopiloté Commande via une carte Arduino », *Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued*, 2018
- [29] Benmohammadi. Z., « Etude, conception et réalisation d'une commande d'un suiveur solair », *Mémoire de projet de fin d'étude, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès*, juin 2014.
- [30] Alata. M., Al-Nimr, M.A., Qaroush, Y., « Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control » juin 2004.
- [31] Ferroudji, F., « Conception et optimisation en dynamique forcée d'un nouveau prototype de système de suiveur solaire à deux axes », *Thèse de Doctorat, Université de Batna*, 2015
- [32] Saheb, S., « mémoire étude et réalisation d'un suiveur solaire bi-axial à base d'un micro-contrôleur Arduino », *Mémoire de Master 2, Université El Arbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi*, 2017
- [33] Necir A., Bouchaala A.Dj., « Conception et Réalisation d'un Suiveur du Soleil Commandé par une Carte Arduino », *mémoire de Master, Université D'el-Oued*, 2018
- [34] <related:fr.rs-online.com/web/p/ldr/0596141/> Spécifications et limites du Capteur -19M
- [35] <http://www.supinfo.com/articles/single/296-qu-est-ce-qu-servomoteur>
- [36] BELKEBIR KATIA 'CHAABI SIHAM «Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil à Base d'une Carte Arduino UNO» UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
- [37] Aouine, A, « Conception et Réalisation d'un tracker solaire intelligent à Bas d'une Carte Arduino-Uno », *Mémoire de Master professionnel, Université de TiziOuzou*, 2017  
BELKEBIR KATIA 'CHAABI SIHAM «Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil à Base d'une Carte Arduino UNO» UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [38] BELKEBIR KATIA 'CHAABI SIHAM «Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil à Base d'une Carte Arduino UNO» UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU.

**Résumé :**

Notre travail ayant comme objectif 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 réalisée à base de deux servomoteurs. Pour cette application, nous avons réalisé un système de photorésistance du type 'LDR' qui sont disposés de manière à ce que leurs éclaircissement ne soit identique que si ce système est perpendiculaire avec le soleil. Les signaux issus des capteurs sont transmis aux entrées d'un microcontrôleur de type ' ATmega328' dans « arduino » qui permet la comparaison des niveaux de tensions pour la commande des deux servomoteurs. En outre, il permet l'orientation du panneau vers le soleil.

Enfin, le système que nous avons réalisé est capable de suivre fidèlement la position du Soleil. En plus, pour augmenter le rendement du panneau solaire mobile par rapport au système fixe, les résultats ont été extraordinaires.

**Mots clés :** PV, Suiveur solaire, LDR, Arduino, SM.