



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministre de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 01

Faculté des Sciences et technologies

Département des Energies Renouvelables

## Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Energies Renouvelables

Option : Conversion Photovoltaïque

ETUDE ET REALISATION D'UN SUIVEUR SOLAIRE A DEUX AXES  
CONTROLEE AVEC UN CARTE ARDUINO NANO

Réaliser par :

**SADKI ABDELHAK**

Devant le jury composé de :

- BOUZAKI. M.....Président
- AITSAHED. O .....Examineur
- Mr DOUMAZ. T.....Encadreur
- .....Co-encadreur

Blida, 2021

## ملخص:

تتطور الطاقة الشمسية بسرعة كمصدر هام للطاقة المتجددة، وخاصة الطاقة الكهروضوئية يتم تحويل الإشعاع الذي تتلقاه اللوحة الكهروضوئية إلى كهرباء بمساعدة الخلايا الكهروضوئية التي تتشكل منها. للحصول على أقصى قدر من الإشعاع الساقط على اللوحة، يجب أن تكون الأشعة عمودية على سطح اللوحة. معظم التركيبات ثابتة ولأن الشمس تنتقل من الشرق إلى الغرب، فإن أشعة الشمس ليست دائمًا متعامدة. ينتج عن هذا خسارة كبيرة في الطاقة الشمسية. للتعويض عن هذه الخسائر، يلزم تركيب متتبع. تعتمد هذه التركيبات على هيكل يمكنه التحرك على محور أو محورين يتم وضع اللوحة عليهما. هذا الهيكل يسمى متعقب الطاقة الشمسية. في هذه الأطروحة أنتجنا متتبع بمحورين يتم التحكم فيهما بواسطة لوحة اردوينو نانو. اختبرنا لوحتين متطابقتين في وقت واحد، واحدة على جهاز التعقب والأخرى ثابتة. لقد حققنا مكاسب يومية في الطاقة بلغت حوالي 33٪.

## كلمات مفتاحية:

الطاقة الكهروضوئية، الألواح الكهروضوئية، جهاز تعقب، لوحة اردوينو نانو.

## Résumé

L'énergie solaire se développe rapidement en tant que source d'énergie renouvelable importante en particulier l'énergie photovoltaïque.

Le rayonnement reçu par le panneau PV est transformé en électricité à l'aide des cellules PV que le constituent. Pour avoir un maximum de rayonnement incident sur le panneau il faut que les rayons soient perpendiculaires à la surface de panneau. La plupart des installations sont fixes et comme le soleil a une trajectoire d'est en ouest, les rayons solaires ne sont donc pas toujours perpendiculaires. Il en résulte une grande perte d'énergie solaire. Pour pallier à ces pertes une installation mobile s'impose. Ces installations sont basées sur une structure qui peut tourner sur un ou deux axes sur laquelle on vient poser un panneau. Cette structure est appelée suivre solaire ou « tracker. Dans ce mémoire nous avons réalisé un suiveur à deux axes contrôlé par une carte Arduino Nano. Nous avons testé simultanément deux panneaux identiques l'un sur le suiveur et l'autre fixe. Nous avons obtenu un gain en puissance journalier de l'ordre de 32%.

## Mots clé :

Energie photovoltaïque, panneau photovoltaïque, suiveur, carte Arduino Nano.

## **Abstract**

Solar energy is rapidly developing as an important renewable energy source, particularly photovoltaic energy.

The radiation received by the PV panel is converted into electricity from PV cells. To have a maximum of incident radiation on the panel, the rays must be perpendicular to the panel surface. Most of the installations are fixed and since the sun has an east-west trajectory, the solar rays are not always perpendicular. This results in a great loss of solar energy. To compensate for these losses a mobile installation is necessary. These installations are based on a structure that can rotate on one or two axes. This structure is called solar tracker. In this memory we realized a two-axis tracker controlled by an Arduino Nano board. We simultaneously tested two identical panels, one on the follower and the other fixed. We obtained a daily power gain of the order of 32%.

### **Key words**

Photovoltaic energy, photovoltaic panel, tracker, Arduino Nano board.

## REMERCIEMENT

En premier lieu, je tiens à remercier Dieu, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Je tiens à remercier Mr DOUMAZ TOUFIK pour son grand soutien et conseils considérables.

A tous les enseignants du Département des énergies renouvelables.

A ma très chère mère, A mon très cher père.

Mes deux frères.

Mes amis chacun à son nom surtout M<sup>lle</sup> HABIB.C

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la concrétisation de ce travail.

## Liste des figures :

Figure (I-0:1): les types des éclairagements solaires.....	11
Figure (I-0:2): Coordonnées horaires. ....	13
Figure (I-0:3): Définition de la masse d'air optique.....	15
Figure (II-0:1): Module de commande de moteur L298N .....	25
Figure (II-0:2): schéma du circuit interne du module de commande de moteur L298N.....	26
Figure (II- 0:3): Capteur de TSL2561 .....	27
Figure (II- 0:4): réactivité spectrale .....	28
Figure (II- 0:5): Servomoteur MG996 .....	29
Figure (II- 0:6): Codage couleur d'un servomoteur .....	31
Figure (II- 0:7): position de servomoteur par rapport au temps(ms).....	32
Figure (II- 0:8): Moteur pas à pas EM-463.....	33
Figure (II- 0:9): carte Arduino Nano.....	34
Figure (II- 0:10): Photorésistance LDR .....	35
Figure (II-0:11): Resistance de 10kohm .....	36
Figure (III-0:1): la fenêtre principale de Fritzing.....	37
Figure (III-0:2): Le montage électronique.....	38
Figure (III-0:3): l'emplacement de servomoteur .....	39
Figure (III-0:4): La partie inférieure .....	39
Figure (III-0:5): Face arrière .....	40
Figure (III-0:6): (TSL2561) Avant soudage et après soudage.....	40
Figure (III-0:7): Capteur de lumière .....	41
Figure (III-0:8): Le conducteur de moteur installé.....	41
Figure (III-0:9): La carte Arduino installé .....	42
Figure (III-10): Format du projet final.....	42
Figure (IV-0:1): Montage de multimètre .....	46
Figure (IV-0:2): multimètres .....	47
Figure (IV-0:3): Le courant génère par les deux panneaux .....	47
Figure (IV-0:4): les surfaces sous les courbes des courant délivré par les deux panneaux.....	49

## Liste des tableaux :

Tableau (I-1): La constante solaire en fonction du nombre d'air masse pour une atmosphère de type méditerranéen.....	15
Tableau (II-1): Configuration des broches du module L298N .....	27

## Liste des abréviations :

PV : Photovoltaïque  
DC : Direct Current  
 $\theta_i$  : Angle d'incidence  
 $\omega$  : Angle horaire  
 $t_s$  : Temps solaire  
 $\delta$  : Angle de déclinaison  
 $\varphi$  : Angle de latitude  
 $\alpha$  : Angle d'altitude de lieu  
 $\theta_z$  : Angle de zénith  
 $\gamma$  : Angle d'azimut  
 $\beta$  : Angle d'inclinaison  
 $TSM$  : Temps solaire moyen  
 $TSV$  : Temps solaire vrai  
LDR : Light Dependent Resistor  
RTL : Real Time Clock  
WRC : World radiometr center  
ONM : Office national de meteorologie  
HSAT : horizontal single axis tracker  
VTSAT : vertical tilt single axis tracker

## Sommaire:

Résumé .....	2
Abstract.....	3
Introduction générale : .....	10
Chapitre I.....	11
Introduction : .....	11
Le gisement solaire .....	11
1. Eclairage solaire :.....	11
5. Définition et concepts :.....	12
Chapitre II : Les poursuites solaires : .....	19
1. Définition : .....	19
2. Types de systèmes de suivi solaire : .....	19
Application du système de suivi à axe unique .....	19
Traqueur solaire horizontal à axe unique (HSAT) .....	20
Traqueur solaire vertical à axe unique (VSAT) .....	20
Tracker solaire à axe unique à inclinaison verticale (VTSAT) .....	20
Avantages du système de suivi solaire à axe unique .....	21
Inconvénients du système de suivi solaire à axe unique .....	21
Application du système de suivi solaire à deux axes .....	22
Avantages du système de suivi solaire à deux axes .....	22
Inconvénients du traqueur à deux axes .....	23
Autres types de trackers solaires : .....	23
Traqueurs passifs .....	23
Traqueurs actifs.....	23
La portée future des systèmes de suivi solaire .....	23
Conclusion :.....	24
Chapitre III : matériel et méthode (modélisation).....	25
Introduction : .....	25
1-Module de commande de moteur L298N .....	25
1.1-Caractéristiques & Spécifications : .....	25
1.2-Bref sur le module L298N : .....	26

1.3-Applications du module L298N :.....	26
1.4-Configuration des Pin(broche) du module L298N : .....	27
2-TSL2561 Capteur de faible puissance et de luminosité numérique (lumière) .....	27
2.2-Quelques statistiques : .....	28
2.3-Câblage du capteur :.....	28
3-Servomoteur .....	29
3.1-Mécanisme de travail du servomoteur :.....	30
3.2-Principe de fonctionnement du servomoteur :.....	30
3.3-Interfaçage des servomoteurs avec des microcontrôleurs : .....	31
3.4-Contrôle du servomoteur : .....	31
4-Moteur pas à pas (stepper motor) .....	33
4.1. Types des moteurs pas à pas : .....	33
4.2. Caractéristiques : .....	33
5-Bloc microcontrôleur .....	34
5.1-Arduino NANO .....	34
5.2-Caractéristiques principales :.....	34
6.Capteur de lumière LDR (Photorésistance).....	35
7.Résistance : .....	36
Conclusion :.....	36
Chapitre IV : Réalisation.....	37
1.Introduction : .....	37
2.Logiciel Fritzing :.....	37
2.montage électronique : .....	38
3. Réalisation et construction : .....	38
3.1. Parti mécanique : .....	38
3.2. Parti électronique : .....	40
3.3. Organigramme : .....	43
3.4. Programmation :m .....	44
4. Conclusion :.....	45
Chapitre V : tests et résultats.....	46
Introduction : .....	46

Multimètre à base d'une carte Arduino nano : .....	46
Matériel utilise : .....	46
Montage du multimètre : .....	46
Résultats : .....	47
Mesure du gain en puissance : .....	48
La méthode de trapèze : .....	49
Application : .....	50
Conclusion : .....	50
Conclusion générale : .....	52
Références : .....	53

## Introduction générale :

De nos jours, la production d'électricité est généralement assurée par des combustibles fossiles tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole, ainsi que par l'énergie nucléaire. Certains des problèmes environnementaux les plus graves d'aujourd'hui peuvent être liés à la production mondiale d'électricité basée principalement sur l'utilisation de ressources non renouvelables. Actuellement, un tiers de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité et n'est pas connecté au réseau national. Une solution à ce problème est l'énergie renouvelable sous la forme de systèmes photovoltaïques (PV). Malgré un coût d'investissement élevé, les systèmes PV restent une solution viable pour les zones rurales. Des études indiquent qu'au rythme où les combustibles fossiles sont consommés aujourd'hui, il y a de fortes chances qu'ils soient épuisés d'ici la fin du siècle. Pendant longtemps, on a pensé que l'énergie atomique serait une solution au problème énergétique croissant, mais ces derniers temps, l'énergie solaire s'est avérée être un moyen efficace, plus sûr et plus sécurisé de fournir de l'énergie. Les concepts liés à l'énergie solaire font constamment l'objet de recherches et de développements intensifs. L'objectif de base est d'optimiser l'énergie produite par les cellules photovoltaïques, en rendant l'ensemble des systèmes plus efficaces et plus rentables. La plupart des panneaux solaires sont alignés de manière statique ; ils ont une position fixe à un certain angle vers le ciel. Par conséquent, le temps et l'intensité de la lumière solaire directe qui tombe sur le panneau solaire sont fortement réduits, ce qui entraîne une faible production d'énergie par les cellules photovoltaïques (PV). Le système de suivi solaire est la solution à ce problème car il joue un rôle majeur dans l'optimisation globale de l'énergie solaire. Afin de garantir une production d'énergie maximale des cellules photovoltaïques, l'angle d'incidence de la lumière du soleil doit être constamment perpendiculaire au panneau solaire. Cela nécessite un suivi constant du mouvement apparent du soleil pendant la journée, d'où le développement d'un système automatisé de suivi du soleil qui transporte le panneau solaire et le positionne de manière à ce que la lumière directe du soleil soit toujours focalisée sur les cellules PV. Cet article porte sur le déplacement d'un panneau solaire en fonction de la direction de la lumière du soleil ; il utilise un motoréducteur pour contrôler la position du panneau solaire, qui obtient ses données d'un microcontrôleur Arduino Nano. L'objectif est de concevoir et de mettre en œuvre un mécanisme de suivi solaire automatisé à deux axes en utilisant la conception de systèmes embarqués afin d'optimiser l'efficacité de la production globale d'énergie solaire. Deux résistances dépendantes de la lumière (LDR) sont utilisées pour chaque degré de liberté. Les LDR sont essentiellement des cellules photoélectriques sensibles à la lumière. Un logiciel sera développé pour permettre à la carte Arduino de détecter et d'obtenir ses données à partir des deux LDR, puis de comparer leur résistance. Les deux LDR seront positionnés de telle sorte que si l'un des deux se trouve dans l'ombre, le microcontrôleur détectera la différence de résistance et actionnera ainsi le moteur pour déplacer le panneau solaire à une position où la lumière sur les deux LDR est égale.

# Chapitre I

## Introduction :

Le gisement solaire est un ensemble des données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exact possible en tenant compte des demandes en énergie à satisfaire et conditions climatiques [1].

Quantifier le rayonnement solaire sur un lieu donné est nécessaire pour l'ingénieur. Tout dimensionnement nécessite cette donnée sous forme horaire, mensuelle ou annuelle.

## Le gisement solaire

### 1. Eclairage solaire :

L'éclairage correspond à la puissance solaire (quantité des rayons solaires) reçue par une surface. On distingue l'éclairage dû aux rayons solaires directs et celui du au rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par une surface (le sol, un mur...) cet éclairage dépend bien sûr de l'orientation de la surface par rapport au soleil. Les grandeurs sont calculées en  $W/m^2$ . [3]

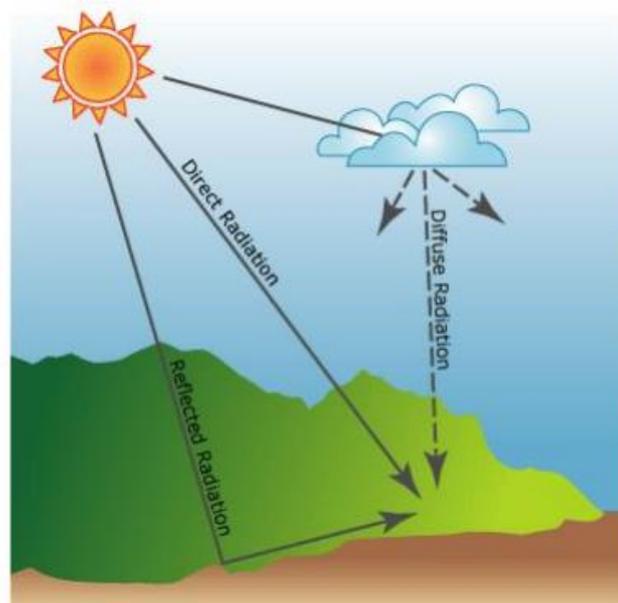


Figure (I-0:1): les types des éclairages solaires.

**2. Rayonnement direct (beam) :** c'est le rayonnement solaire reçu du soleil sans avoir été diffusé par l'atmosphère. (Le rayonnement de faisceau est souvent appelé rayonnement solaire direct ; pour éviter toute confusion entre les indices directs et diffus, nous utilisons l'indice b) [4]

**3. Rayonnement diffus :** c'est le rayonnement solaire reçu du soleil après que sa direction soit modifiée par diffusion par l'atmosphère. (Le rayonnement diffus est appelé dans certaines publications météorologiques le rayonnement du ciel ou le rayonnement solaire du ciel ; la définition utilisée ici permettra de distinguer le rayonnement solaire diffus du rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère.) [4]

**4. Rayonnement global :** c'est le rayonnement solaire total représentant la somme des rayonnements direct et diffus. Les mesures les plus courantes du rayonnement solaire sont le rayonnement total sur une surface horizontale, souvent appelé rayonnement global sur la surface.) [4]

## 5. Définition et concepts :

### 5.1. Paramètres astronomiques et atmosphériques :

#### 5.1.1. Les paramètres astronomiques :

**La déclinaison :** [5]

Nous allons présenter dans ce paragraphe les principales grandeurs utilisées dans les modèles d'estimation de l'éclairement par ciel clair :

L'angle entre la direction terre-soleil et le plan équatorial est appelé déclinaison ( $\delta$ ). Elle varie au cours de l'année de  $-23,45^\circ$  au solstice d'hiver à  $+23,45$  au solstice d'été. La déclinaison est calculée en utilisant

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (284 + n_i)\right) \dots \dots \dots (1)$$

Où  $n$  est le numéro du jour dans l'année (1 pour le 1er janvier à 365 pour le 31 décembre).

La déclinaison étant une fonction sinusoïdale, elle varie rapidement au voisinage des équinoxes ( $0.4^\circ$ / jour) alors qu'elle est pratiquement stationnaire durant les périodes qui encadrent les solstices d'été et d'hiver. [6]

**Temps Solaire Vrai :** Le temps Solaire Vrai en 1 point du globe est donné par :

$$T_{sv} = T_L + E_t + 4(L_{ref} - L_{lieu}) + D \dots \dots \dots (2)$$

$T_L$  : Temps légal

$D$  : Décalage horaire (en Algérie  $D = +1$  toute l'année)

$L_{ref}$  : Longitude de méridien de référence (Greenwich pour L'Algérie)

$L_{lieu}$  : Longitude de lieu comptée positivement à l'ouest et négativement à l'est

$E_t$  : Equation de temps donné par

$$E_t = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B \dots \dots \dots (3)$$

**L'angle horaire ( $\omega$ )** : du soleil, est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, (figure I-2). L'angle horaire est compris entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi il augmente de  $15^\circ$  par heure.

La formule suivante donne l'angle horaire

$$\omega = (TSV - 12) \times 15^\circ \dots \dots \dots (5)$$

TSV : temps solaire vrai.

Ou *TSV* : est le temps solaire vrai exprimé en heures, à chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaires de  $15^\circ$ .

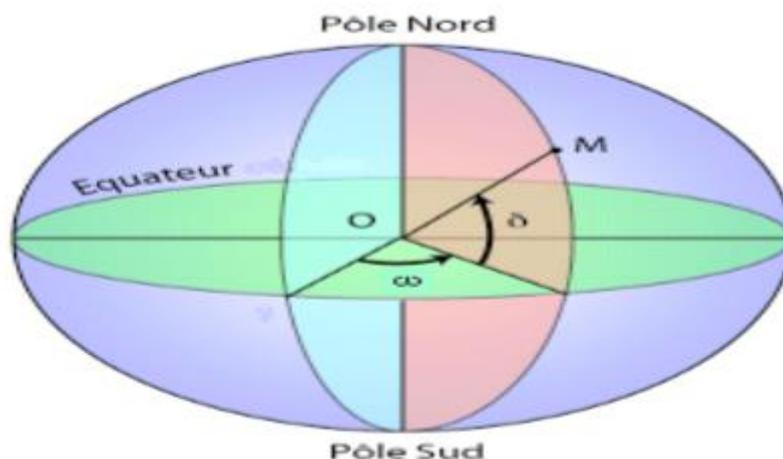


Figure (I-0:2): Coordonnées horaires.

**Hauteur du soleil** : La hauteur du soleil est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à  $0^\circ$  au lever et au coucher astronomiques du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai. L'expression de la hauteur du soleil est donnée par :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \dots \dots \dots (6)$$

Avec :

$\varphi$ : La latitude du lieu,  $\delta$ : La déclinaison du soleil,  $\omega$ : L'angle horaire

**Azimut du soleil :** L'azimut du soleil est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud. Il est donné par :

$$\alpha = \text{acos}\left(\frac{\sin h * \sin q - \sin \delta}{\cos h * \cos \varphi}\right)$$

Il est nul à midi et maximal au lever et au coucher du soleil.

**Constante solaire et éclairement hors atmosphère :**

Mesurée à la distance moyenne, la constante solaire adoptée par le Centre International de Radiomètre (WRC) dépendant de l'ONM est de  $1367 \text{ W/m}^2$  avec une incertitude de **1%** (Beckman, Iqbal). ( $I_{cs}$ ) elle est définie comme la moyenne annuelle de l'éclairement solaire hors atmosphère reçu par une surface normale aux rayons du soleil.

**Correction due à la variation de la distance Terre – Soleil :**

La variation de la distance Terre – Soleil durant l'année entraine une variation de l'éclairement solaire, reçu hors atmosphère, de l'ordre de  $\pm 3\%$ . L'équation suivante permet de corriger les écarts induits par cette variation saisonnière.

L'éclairement solaire hors atmosphère ( $I_0$ ) s'exprime alors :

$$I_0 = I_{cs} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360}{365} J\right)\right) \dots\dots\dots (7)$$

**L'angle de zénith  $\theta_z$  :**

L'angle de zénith est l'angle compris entre le rayon solaire et le zénith, ce dernier est défini comme étant la verticale locale d'un lieu, l'expression de l'angle : est donnée par la relation suivante :

$$\text{Cos}\theta_z = \cos\varphi\cos\omega\cos\delta + \sin\varphi\sin\delta \dots\dots\dots (8)$$

**5.1.2. Les paramètres atmosphériques :**

Il est important de noter que les paramètres telles que le trouble de Linke pour une masse atmosphérique égale à 2 ( $T_{LM2}$ ) déterminé empiriquement, et le coefficient de trouble d'Angström, déterminé à partir des épaisseurs optiques des aérosols pour une longueur d'onde,  $0.55\mu\text{m}$ , extraites via le service HelioClim-3 (<http://www.soda-pro.com>) sont utilisés comme entrés dans les modèles ciel clair.

**Masse d'air Optique:**

L'épaisseur de la couche d'air (atmosphère) traversée par les rayons solaires pour arriver jusqu'au sol dépend de la hauteur du soleil et de la courbure de la terre.

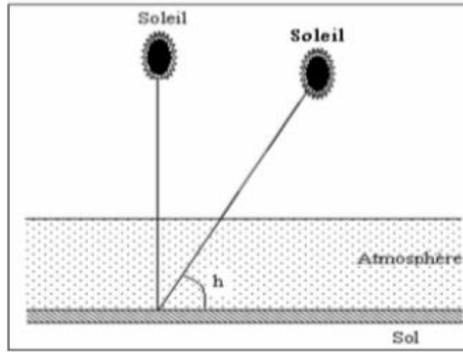


Figure (I-0:3): Définition de la masse d'air optique.

Pour la longueur d'onde  $\lambda$  la loi d'extinction s'écrit :

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-K_{\lambda} m} \dots \dots \dots (9)$$

Avec :

$I_{\lambda}$  : Eclairement reçu au sol,  $I_{0\lambda}$  : Eclairement reçu hors atmosphère,  $K_{\lambda}$  : Coefficient d'extinction  
 $m$  : Masse d'air optique.

En négligeant la courbure de la terre, la masse d'air optique est donnée par :

$$m = \frac{1}{\sin h} \dots \dots \dots (10)$$

Et avec la correction d'altitude :

$$m = \frac{0,89^Z}{\sin h} \dots \dots \dots (11)$$

Z : Altitude du lieu en Km.

En considérant la courbure de la terre, Kasten propose une relation plus précise pour la masse d'air optique, en particulier pour les faibles hauteurs. Soit avec la correction d'altitude

$$m = \frac{0,89^Z}{\sin h + 9,410^{-4} (\sin h + 0,0678)^{-1,253}} \dots \dots \dots (12)$$

Tableau (I-1): La constante solaire en fonction du nombre d'air masse pour une atmosphère de type méditerranéen.

AM	0	1	1,5	2	3	4	5
$I_0 (W/M^2)$	1353	931	834	755	610	530	430

**L'indice de Clarté :** Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère terrestre et les nuages. Le rapport entre le rayonnement au sol et le

rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté, la moyenne mensuelle de l'indice de clarté  $K_t$  est définie par :

$$K_t = \frac{I_g}{I_{g0}} \dots \dots \dots (13)$$

$I_g$ : Irradiation solaire reçue sur un plan horizontal (Wh. m<sup>-2</sup>. Jour<sup>-1</sup>).

$I_{g0}$  : Rayonnement extraterrestre horizontal (MJ. m<sup>-2</sup>.jour<sup>-1</sup> où Wh. m<sup>-2</sup> .jour<sup>-1</sup>).

La moyenne mensuelle de l'indice de clarté  $K_t$  varie selon les endroits et les saisons, elle est généralement entre 0,3 pour des régions ou des saisons pluvieuses et 0,8 pour des saisons ou des climats secs et ensoleillés.

**Les aérosols :**

Sont appelées aérosols toutes les particules en suspension dans l'air et provenant des activités industrielles et naturelles variées: les pollens, cristaux de sels marins et sable apportés par les vents, les éruptions volcaniques, les poussières de météorites, les feux agricoles et de forêts, etc. La pluie, la neige et la grêle ne sont pas considérées comme des aérosols. Par opposition aux molécules des gaz permanents de l'air sec, les particules suspendues dans l'air ont des volumes, concentrations, distributions, formes et compositions de matériaux très divers. Leurs dimensions varient de quelques nanomètres à la centaine de micromètres pour les plus larges (particules géantes) lesquelles sont sensiblement supérieures aux molécules d'air sec et comparables aux longueurs d'onde du rayonnement lumineux.

Les aérosols sont caractérisés par deux coefficients :

- Le paramètre  $\alpha$  caractérise la taille moyenne des particules atmosphériques. Plus  $\alpha$  est élevé, plus il décrit des aérosols de grande taille.
- La valeur du facteur de trouble d'Angström  $\beta$ , qui décrit la teneur en aérosols. De manière générale, la concentration en aérosols est :
  - supérieure en site pollué qu'en site rural.
  - supérieure au-dessus du continent qu'au-dessus des océans.
  - plus importante en période sèche.

**Trouble d'Angström :**

- Le coefficient d'extinction monochromatique, du à la diffusion par les molécules et les aérosols, est donné (théorie de Mie) par :

$$K_\lambda = \beta \lambda^{-\alpha} \dots \dots \dots (14)$$

Avec:  $\lambda$  :longueur d'onde en  $\mu\text{m}$

$\alpha$  : coefficient tenant compte de la taille des particules (0 pour les particules et 4 pour les molécules)

$\beta$  : coefficient tenant compte de la concentration en particules et molécules (estimé par la clarté de l'atmosphère ou la visibilité météorologique).

- Pour l'atténuation totale, on considère la valeur moyenne  $\alpha = 1.3$ .
- Le coefficient  $\beta$  peut être estimé selon la qualité de l'atmosphère, tel que :

$\beta = 0$  atmosphère très pure

= 0.10 " claire

= 0.20 " polluée

= 0.40 " très polluée

#### **Trouble total de Link :**

Le facteur de trouble total de Link représente la somme des effets d'atténuation, intégrés sur tout le spectre, dus à :

- la diffusion et à l'absorption des rayons solaires.

- l'effet de la couverture nuageuse.

Il est défini comme le rapport du coefficient d'extinction réel à celui d'une atmosphère pure et sèche, soit :  $TL^* = k/k_0$

Pour le coefficient d'extinction en atmosphère pure, Kasten propose :

$$K_0 = \frac{1}{9,4+0,9m} \dots \dots \dots (15)$$

Relation corrigée par Iqbal et al. Comme :

$$K_0 = \frac{1}{9,4+0,8m-5e^{-\frac{m}{2}}} \dots \dots \dots (16)$$

Le facteur de trouble total de Linke représente la somme des effets d'atténuation, intégrés sur tout le spectre, due à la diffusion et à l'absorption des rayons solaires en plus de l'effet de la couverture nuageuse. Pour l'estimation du facteur de trouble par ciel, des modèles assez complexes ont été développés en considérant séparément les différentes causes d'atténuation (Modèle de Dogniaux-Brichambaut). Une fois estimé le facteur de trouble total de Linke, on peut estimer l'éclairement solaire direct, sur une surface horizontale, au niveau du sol.

**6.Le Modèle de Capderou :** [Capderou, 1987].

La relation donnant le meilleur résultat pour l'Algérie s'écrit :

$$I_g = 1080 [ 1 + 0.033 \cos (360 N_j / 365)] \sin h [\sin h / (0.89)^z ]^{0.22} \dots\dots\dots (17)$$

h: étant l'altitude du lieu, exprimée en km.

## **Chapitre II : Les poursuites solaires :**

### **1.Définition :**

Un Tracker solaire, est un dispositif permettant de suivre le soleil selon le principe de l'héliostat. Cette structure portante motorisée oriente les panneaux solaires pour en augmenter la productivité.

### **2.Types de systèmes de suivi solaire :**

Les systèmes de suivi solaire peuvent être classés selon le mode de leur mouvement.

Il existe deux axes pour une surface en mouvement : un axe horizontal et un axe vertical.

La surface peut être tournée autour de chaque axe (incliné) pour obtenir le bon angle pour recevoir le maximum de lumière solaire.

Lorsque le mouvement ou l'ajustement de la surface se produit en tournant autour d'un axe, cela s'appelle un suivi à axe unique.

D'autre part, lorsque la rotation de la surface se produit autour de deux axes simultanément, on parle de suivi à deux axes.

#### **Application du système de suivi à axe unique**

Les trackers à axe unique se déplacent généralement d'est en ouest et suivent la direction du Soleil.

Les trackers à axe unique n'ont qu'un seul angle qui est utilisé comme axe de rotation. Ce type de tracker peut augmenter la production d'électricité de plus de 30%.

Ces trackers offrent un moyen efficace, simple et peu coûteux d'améliorer le fonctionnement des installations solaires.

En outre, ces trackers peuvent optimiser les performances du Soleil pendant les saisons estivales et printanières, lorsque le Soleil est dans une position plus élevée dans le ciel.

L'utilité des trackers à axe unique, cependant, diminue à mesure qu'ils se déplacent vers le nord. C'est parce que la variance de l'angle solaire est plus élevée entre les saisons d'été et d'hiver.

De plus, les performances baissent pendant les autres périodes de l'année pour la position horizontale du Soleil. À des latitudes plus élevées, les trackers à axe vertical fonctionnent mieux.

De cette façon, les panneaux ou panneaux solaires peuvent suivre la position du soleil en hiver comme en été.

Parlons maintenant des différents types de trackers à axe unique tels que l'alignement horizontal, vertical, incliné et polaire.

### **Traqueur solaire horizontal à axe unique (HSAT)**

Le suiveur solaire horizontal à axe unique tourne d'est en ouest tout au long de la journée sur un axe fixe parallèle au sol.

Ce type de tracker est considéré comme la géométrie de tracker la plus rentable dans de nombreuses applications.

Les trackers horizontaux à axe unique peuvent suivre le mouvement du Soleil du matin au soir dans le ciel.

Une structure HSAT peut être supportée en de nombreux points le long de l'axe de rotation et nécessite donc moins de complexité et moins de matériaux de construction que d'autres géométries de suivi.

La géométrie de suivi horizontal est davantage préférée car elle réduit les besoins en matériaux structurels en maintenant les modules à un profil relativement bas par rapport à la fondation.

De plus, aucune connexion spéciale n'est nécessaire pour faire pivoter le système autour de son centre de gravité.

### **Traqueur solaire vertical à axe unique (VSAT)**

Les suiveurs solaires verticaux à axe unique ou VSAT tournent d'est en ouest en suivant le soleil tout au long de la journée.

Ces systèmes sont souvent installés dans des endroits de haute altitude ou montagneux.

Le profil des VSAT n'est pas parallèle au sol, de sorte qu'il est plus facile pour ces suiveurs de maintenir un angle d'incidence solaire constant lorsque le Soleil est plus bas dans le ciel.

Ceci est particulièrement bénéfique dans les latitudes nordiques, par exemple entre 40° et 55°. Cependant, contrairement aux réseaux horizontaux planaires, les dispositions de champ verticales doivent s'adapter au profil plus haut du suiveur vertical et étaler les unités pour éviter l'auto-ombrage et les pertes d'énergie.

En conséquence, les trackers verticaux à axe unique ont tendance à avoir une densité de puissance par acre relativement plus faible.

### **Tracker solaire à axe unique à inclinaison verticale (VTSAT)**

Ce type de tracker est similaire à un tracker horizontal et incliné à axe unique. La seule différence est que l'inclinaison est parallèle à une position horizontale et tourne sur un axe vertical.

Ces trackers peuvent également améliorer la récupération d'énergie par rapport aux trackers horizontaux. Cependant, en raison de l'angle d'inclinaison optimal, les suiveurs à axe unique inclinés sont soumis à une charge de vent accrue par rapport aux unités horizontales.

Dans les VTSTAT, les exigences structurelles sont plus élevées et, par conséquent, plus d'acier et de béton sont utilisés par rapport à un réseau horizontal.

### **Avantages du système de suivi solaire à axe unique**

Les trackers à axe unique ont un seul degré de flexibilité qui sert d'axe de rotation, qui est généralement aligné le long d'une trajectoire Nord-Sud. Les principaux avantages des trackers à axe unique comprennent :

- Les trackers à axe unique sont plus fiables.
- Un axe unique a une durée de vie plus longue que les trackers à deux axes.
- Les trackers à un axe sont moins chers que les trackers à deux axes car ils ont un mécanisme simple et fonctionnent à faible coût.
- Les trackers à axe unique sont idéaux pour les entreprises à faible budget ou dans les zones généralement nuageuses.
- Les trackers à axe unique sont efficaces à près de 32,17% par rapport à un panneau de montage de tracker solaire fixe.
- Ces trackers suivent le soleil d'est en ouest, fournissant une puissance de sortie constante tout au long de la journée.
- Les trackers génèrent une puissance annuelle de 15 à 16 % supérieure à celle d'une station statique de la même capacité installée.
- Les trackers à axe unique offrent la plus haute densité de placement de panneaux photovoltaïques par carré.
- La période de retour sur investissement est moindre pour l'investissement du projet solaire, et une augmentation significative des bénéfices.

L'installation d'un système de suivi solaire peut nécessiter l'ajout de pièces et d'engrenages supplémentaires au système de panneaux solaires, et ils nécessitent également un entretien de temps en temps.

### **Inconvénients du système de suivi solaire à axe unique**

- La production d'énergie est inférieure par le tracker à axe unique par temps ensoleillé par rapport aux trackers à deux axes
- Mise à niveau technologique limitée.

### **Application du système de suivi solaire à deux axes**

Les trackers à deux axes ont deux degrés d'axe de rotation, appelés « axe principal » et « axe secondaire ».

L'axe de rotation peut se déplacer vers le bas ou vers le haut pour s'adapter aux angles du soleil tout au long de la journée.

Le suivi à deux axes permet l'orientation la plus précise de l'appareil solaire et est censé fournir 40 % de rendement supplémentaire grâce à l'absorption d'énergie. Cependant, ces trackers solaires sont plus complexes et coûteux.

Les trackers à deux axes font continuellement face au Soleil car ils peuvent se déplacer dans deux directions différentes. Il existe deux types de trackers à double axe basés sur l'altitude - basculement et altitude-azimut.

En règle générale, le suivi à deux axes est utilisé pour orienter un miroir et rediriger la lumière du soleil le long d'un axe fixe vers un récepteur fixe.

Comme ces trackers suivent la trajectoire du soleil verticalement et horizontalement, ils aident à obtenir un maximum d'énergie solaire.

Les trackers à double axe à altitude azimutale peuvent résoudre les deux problèmes. Cependant, ces trackers peuvent être coûteux et ajouter près de 3 500 \$ à 6 500 \$ au coût de l'installation solaire.

La fonction des suiveurs à deux axes dépend des pivots verticaux et horizontaux, qui sont guidés par un contrôleur de la même manière que les télescopes solaires. Ceux-ci sont assez coûteux et leur utilisation est généralement limitée aux systèmes d'énergie solaire de qualité commerciale.

Le suivi précis des suiveurs solaires à deux axes est également utilisé dans une application solaire ciblée, comme les miroirs qui dirigent les récepteurs de la lumière solaire et convertissent la lumière du soleil en chaleur.

### **Avantages du système de suivi solaire à deux axes**

- Les trackers à deux axes suivent le soleil en permanence et fournissent une puissance de sortie constante tout au long de la journée.
- Ces trackers solaires offrent une solution raisonnable en cas de capacité électrique limitée du raccordement au réseau.
- Les trackers à deux axes ont besoin d'un espace plus petit et offrent la possibilité d'utiliser la zone restante à d'autres fins supplémentaires telles que le stationnement, le jardinage et autres.

- Ces trackers génèrent une puissance de sortie de 45 à 50 % supérieure par an, par rapport à une station statique de la même capacité installée ;
- Les trackers à deux axes offrent la solution optimale pour les zones qui peuvent entraver la productivité solaire. Certaines de ces zones pourraient être une structure compliquée du sol, un relief compliqué, des saillies de pierre, une descente vers le nord, et d'autres.
- Le délai de retour sur investissement est plus faible dans le cas des trackers à deux axes. En outre, il y aura une augmentation significative des bénéfices au cours de leur durée de vie.

### **Inconvénients du traqueur à deux axes**

- Les trackers à deux axes ont une complexité technique plus élevée, ce qui les rend potentiellement vulnérables aux problèmes.
- Ces trackers ont une durée de vie plus courte et une fiabilité moindre.
- Faibles performances par temps nuageux ou couvert

### **Autres types de trackers solaires :**

#### **Traqueurs passifs**

Les trackers solaires passifs utilisent un fluide gazeux comprimé à faible point d'ébullition qui tourne d'un côté ou de l'autre pour faire bouger le tracker en réponse à un déséquilibre. Comme ce type d'orientation n'est pas précis, il ne convient pas à certains types de collecteurs photovoltaïques à concentration (PV) mais fonctionne bien pour les types de panneaux PV courants.

#### **Traqueurs actifs**

Les trackers actifs, quant à eux, utilisent des moteurs et des engrenages pour diriger le tracker par un contrôleur, répondant à la direction solaire. Parce que les moteurs consomment de l'énergie, ils doivent être utilisés lorsque cela est nécessaire.

### **La portée future des systèmes de suivi solaire**

Les trackers solaires, qu'ils soient à un ou deux axes, peuvent aider à générer le niveau optimal d'énergie solaire.

C'est pourquoi il est important de décider quel type de tracker convient en tenant compte de divers facteurs, notamment le terrain, le climat et le type de panneaux solaires utilisés.

Si vous êtes un installateur solaire, en fonction des contraintes budgétaires de votre client, du terrain et du climat, et de la durée de vie du système, vous devez considérer les facteurs clés pour prendre la bonne décision.

Maintenant, en ce qui concerne l'avenir de l'industrie des trackers solaires, cela semble plutôt prometteur. En 2018, la taille estimée du marché mondial des trackers solaires était de 2,92 milliards de dollars.

Le marché devrait croître à un TCAC de 14,1% d'ici 2025 en raison de la demande croissante de cellules solaires ou de cellules photovoltaïques. Ce taux de croissance devrait se poursuivre dans les années à venir.

### **Conclusion :**

Maintenant et après avoir entendu parler des systèmes de suivi solaire disponibles, j'ai choisi de travailler sur un système de suivi solaire à deux axes, et ce sera le sujet de mon travail, dans les chapitres suivants vous verrez le processus de construction d'un suiveur réel.

## Chapitre III : matériel et méthode (modélisation)

### Introduction :

Ce chapitre présente l'ensemble des dispositifs expérimentaux utilisés, le travail est effectué au niveau de laboratoire de club Hélios au département des énergies renouvelables à l'université de Blida 1 Saad Dahlab

### 1-Module de commande de moteur L298N

Ce module est spécialement conçu pour la commande des moteurs de haute puissance à courant continu et pas à pas. Il se compose d'un circuit intégré de pilote de moteur L298 et d'un régulateur 78M05 5V. Le module L298N peut contrôler jusqu'à 4 moteurs à courant continu ou 2 moteurs à courant continu avec contrôle directionnel et de vitesse

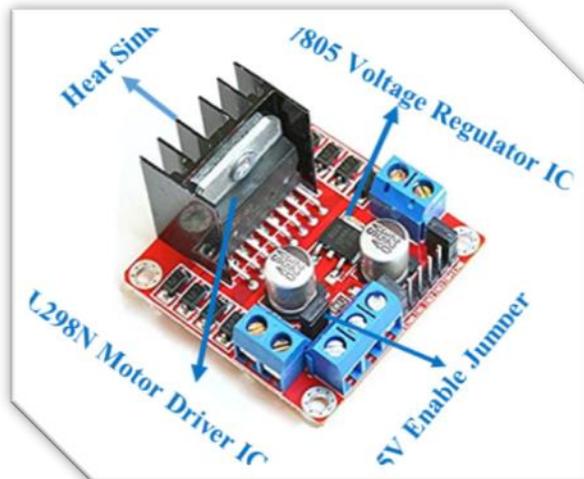


Figure (II-0:1): Module de commande de moteur L298N

#### 1.1- Caractéristiques & Spécifications :

- Modèle de pilote L298N 2A
- Puce pilote Double H Bridge L298N
- Tension d'alimentation du moteur (maximum) : 46V
- Courant d'alimentation du moteur (maximum) : 2A
- Tension logique 5V
- Tension du pilote 5-35V
- Pilote actuel 2A
- Courant logique : 0-36mA
- Puissance maximale 25W
- Sens actuel pour chaque moteur
- Dissipateur thermique pour de meilleures performances
- Voyant de mise sous tension

## 1.2-Bref sur le module L298N :

Le module de commande de moteur L298N se compose d'un circuit intégré de pilote de moteur L298, d'un régulateur de tension 78M05, de résistances, d'un condensateur, d'une LED de puissance, d'un cavalier 5V dans un circuit intégré

78M05 Le régulateur de tension ne sera activé que lorsque le cavalier sera placé. Lorsque l'alimentation est inférieure ou égale à 12V, le circuit interne sera alimenté par le régulateur de tension et la broche 5V peut être utilisée comme broche de sortie pour alimenter le microcontrôleur. Le cavalier ne doit pas être placé lorsque l'alimentation est supérieure à 12V et 5V séparé doit être donné à travers la borne 5V pour alimenter le circuit interne.

Les broches ENA et ENB sont des broches de contrôle de vitesse pour le moteur A et le moteur B tandis que IN1&IN2 et IN3 &IN4 sont des broches de contrôle de direction pour le moteur A et le moteur B

Le schéma du circuit interne du module de commande de moteur L298N est donné ci-dessous

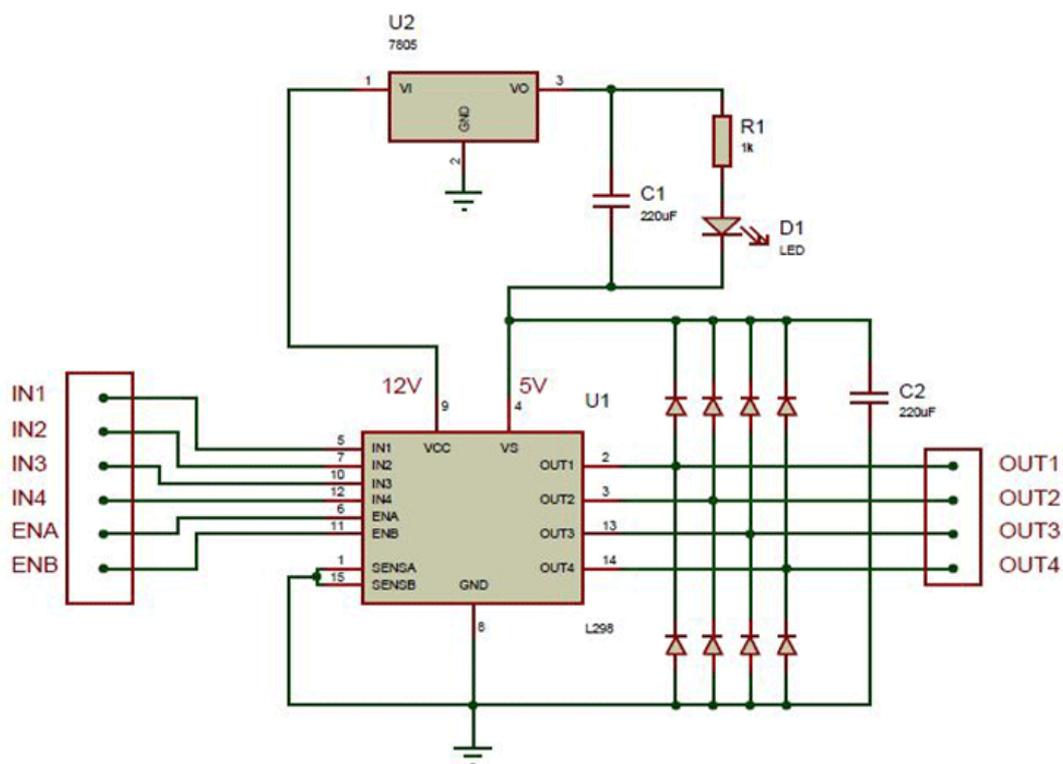


Figure (II-0:2): schéma du circuit interne du module de commande de moteur L298N

## 1.3-Applications du module L298N :

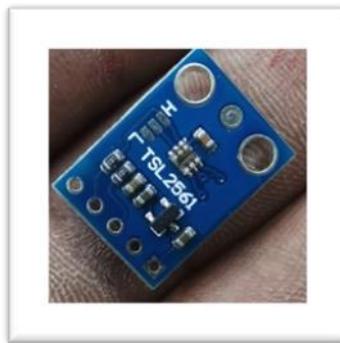
- Entraînement des moteurs à courant continu.
- Entraînement les moteurs pas à pas en robotique

## 1.4-Configuration des Pin(broche) du module L298N :

*Tableau (II-1): Configuration des broches du module L298N*

Pin nom	Description
IN1 & IN2	Motor A input pins. Used to control the spinning direction of Motor A
IN3 & IN4	Motor B input pins. Used to control the spinning direction of Motor B
ENA	Enables PWM signal for Motor A
ENB	Enables PWM signal for Motor B
OUT1 & OUT2	Output pins of motor A
OUT3 & OUT4	Output pins of motor B
12V	12V input from DC power Source
5V	Supplies power for the switching logic circuitry inside L298N IC
GND	Ground pin

## 2-TSL2561 Capteur de faible puissance et de luminosité numérique (lumière)



*Figure (II- 0:3): Capteur de TSL2561*

Le capteur de luminosité TSL2561 est un capteur de lumière numérique avancé, idéal pour une utilisation dans un large éventail de situations lumineuses. Comparé aux cellules CdS à faible coût, ce capteur est plus précis, permettant des calculs Lux exacts et peut être configuré pour différentes plages de gain / synchronisation pour détecter des plages de lumière allant de 0,1 à 40 000 + Lux à la volée. La meilleure partie de ce capteur est qu'il contient à la fois des diodes infrarouges et à spectre complet ! Cela signifie que vous pouvez mesurer l'infrarouge, le spectre complet ou le visible humain

Le capteur dispose d'une interface numérique (i2c). Vous pouvez sélectionner l'une des trois adresses afin d'avoir jusqu'à trois capteurs sur une carte – chacun avec une adresse i2c différente. L'ADC intégré signifie que vous pouvez l'utiliser avec n'importe quel microcontrôleur, même s'il n'a pas d'entrées analogiques. Le tirage actuel est extrêmement faible, il est donc idéal pour les systèmes d'enregistrement de données à faible

consommation. Environ 0,5 mA lors de la détection active et moins de 15  $\mu$ A en mode de mise sous tension

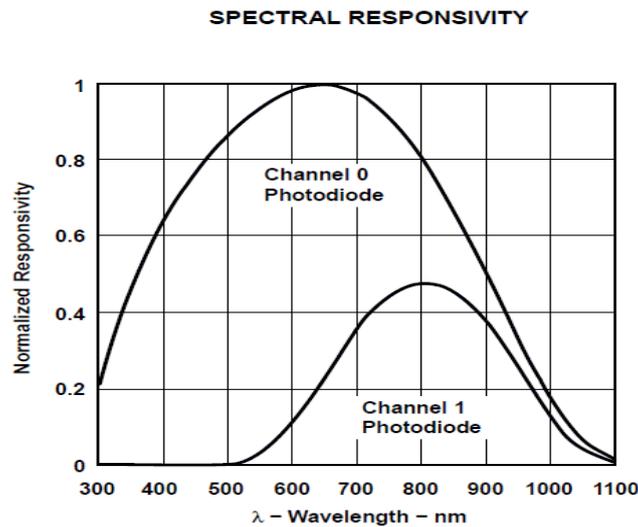


Figure (II- 0:4): réactivité spectrale

## 2.2-Quelques statistiques :

- Approche de la réponse de l'œil humain
- Mesure avec précision l'éclairage dans diverses conditions d'éclairage
- Plage de température : -30 à 80 \* C
- Plage dynamique (Lux) : 0,1 à 40 000 Lux
- Plage de tension : 2.7-3.6V
- Interface : I2C

## 2.3-Câblage du capteur :

Ensuite, nous allons le connecter à notre microcontrôleur. Dans ce cas, nous utiliserons un Arduino, mais presque n'importe quel microcontrôleur peut être utilisé en adaptant notre code

- Connectez la broche VCC à une source d'alimentation 3.3V ou 5v (quel que soit le niveau logique de votre microcontrôleur)
- Connectez GND à la broche de terre
- Connectez le i2c SCL clock épingle à votre broche i2c clock épingle. dans l'Arduino classique Uno/Duemilanove/Diecimila/etc épingle analogique #5
- Connectez la broche de données SDA i2c à votre broche de données i2c. Sur l'Arduino classique Uno / Duemilanove / Diecimila / etc c'est l'épingle analogique #4

Vous n'avez pas besoin de connecter les broches ADDR (changement d'adresse i2c) ou INT (sortie d'interruption)

La broche ADDR peut être utilisée si vous avez un conflit d'adresse i2c, pour changer l'adresse. Connectez-le à la terre pour définir l'adresse sur 0x29, connectez-le à 3.3V (vcc) pour saisir l'adresse à 0x49 ou laissez-le flottant (non connecté) pour utiliser l'adresse 0x39

La broche INT est une sortie du capteur utilisé lorsque vous avez le capteur configuré pour signaler lorsque le niveau de lumière a changé. Nous n'avons pas ce code écrit dans ce didacticiel afin que vous n'ayez pas à l'utiliser. Si vous finissez par l'utiliser, utilisez un pullup 10K-100K d'INT à 3.3V (vcc)

### 3-Servomoteur



Figure (II- 0:5): Servomoteur MG996

Un servomoteur est un type de moteur qui a une grande précision. Si vous souhaitez faire pivoter un objet à des angles ou à une distance spécifique, vous utilisez un servomoteur. Il est juste composé d'un simple moteur qui passe par un mécanisme d'asservissement. Si le moteur est alimenté par une alimentation CC, on l'appelle servomoteur CC, et s'il s'agit d'un moteur CA, on l'appelle servomoteur CA. Pour notre projet, nous discuterons uniquement du fonctionnement du servomoteur à courant continu. En dehors de ces principales classifications, il existe de nombreux autres types de servomoteurs basés sur le type d'agencement des engrenages et les caractéristiques de fonctionnement. Un servomoteur est généralement livré avec un engrenage qui nous permet d'obtenir un servomoteur à couple très élevé dans des boîtiers petits et légers. En raison de ces caractéristiques, ils sont utilisés dans de nombreuses applications telles que les petites voitures, les hélicoptères et les avions RC, la robotique, etc.

Les servomoteurs sont évalués en kg/cm (kilogramme par centimètre) la plupart des servomoteurs de loisir sont évalués à 3kg/cm ou 6kg/cm ou 12kg/cm. Ce kg/cm vous indique le poids que votre servomoteur peut soulever à une distance donnée. Par exemple : un servomoteur de 6 kg/cm devrait être capable de soulever 6 kg si la charge est suspendue à 1 cm de l'arbre du moteur, plus la distance est grande, plus la capacité de charge est faible. La position d'un servomoteur est décidée par impulsion électrique et ses circuits sont placés à côté du moteur.

### **3.1-Mécanisme de travail du servomoteur :**

Il se compose de trois parties :

1. Appareil contrôlé
2. Capteur de sortie
3. Système de rétroaction

Il s'agit d'un système en boucle fermée où il utilise un système de rétroaction positive pour contrôler le mouvement et la position finale de l'arbre. Ici, l'appareil est contrôlé par un signal de retour généré en comparant le signal de sortie et le signal d'entrée de référence.

Ici, le signal d'entrée de référence est comparé au signal de sortie de référence et le troisième signal est produit par le système de rétroaction. Et ce troisième signal agit comme un signal d'entrée pour la commande de l'appareil. Ce signal est présent tant que le signal de retour est généré ou qu'il existe une différence entre le signal d'entrée de référence et le signal de sortie de référence. Ainsi, la tâche principale du servomécanisme est de maintenir la sortie d'un système à la valeur souhaitée en présence de bruits.

### **3.2-Principe de fonctionnement du servomoteur :**

Un servo se compose d'un moteur (CC ou CA), d'un potentiomètre, d'un engrenage et d'un circuit de contrôle. Tout d'abord, nous utilisons un assemblage d'engrenages pour réduire le régime et augmenter le couple du moteur. Disons qu'à la position initiale de l'arbre du servomoteur, la position du bouton du potentiomètre est telle qu'aucun signal électrique n'est généré au niveau du port de sortie du potentiomètre. Maintenant, un signal électrique est fourni à une autre borne d'entrée de l'amplificateur du détecteur d'erreur. Maintenant, la différence entre ces deux signaux, l'un provient du potentiomètre et l'autre d'autres sources, sera traité dans un mécanisme de rétroaction et la sortie sera fournie en termes de signal d'erreur. Ce signal d'erreur agit comme l'entrée pour le moteur et le moteur commence à tourner. Maintenant, l'arbre du moteur est connecté au potentiomètre et lorsque le moteur tourne, le potentiomètre génère un signal. Ainsi, lorsque la position angulaire du potentiomètre change, son signal de retour de sortie change. Après un certain temps, la position du potentiomètre atteint une position où la sortie du potentiomètre est la même que le signal externe fourni. Dans cette condition, il n'y aura pas de signal de sortie de l'amplificateur vers l'entrée du moteur car il n'y a pas de différence entre le signal appliqué externe et le signal généré au potentiomètre, et dans cette situation le moteur arrête de tourner. Un servo se compose d'un moteur (CC ou CA), d'un potentiomètre, d'un engrenage et d'un circuit de contrôle. Tout d'abord, nous utilisons un assemblage d'engrenages pour réduire le régime et augmenter le couple du moteur. Disons qu'à la position initiale de l'arbre du servomoteur, la position du bouton du potentiomètre est telle qu'aucun signal électrique n'est généré au niveau du port de sortie du potentiomètre. Maintenant, un signal électrique est fourni à une autre borne d'entrée de l'amplificateur du détecteur d'erreur. Maintenant, la différence entre ces deux signaux, l'un provient du potentiomètre et l'autre d'autres sources,

sera traité dans un mécanisme de rétroaction et la sortie sera fournie en termes de signal d'erreur. Ce signal d'erreur agit comme l'entrée pour le moteur et le moteur commence à tourner. Maintenant, l'arbre du moteur est connecté au potentiomètre et lorsque le moteur tourne, le potentiomètre génère un signal. Ainsi, lorsque la position angulaire du potentiomètre change, son signal de retour de sortie change. Après un certain temps, la position du potentiomètre atteint une position où la sortie du potentiomètre est la même que le signal externe fourni. Dans cette condition, il n'y aura pas de signal de sortie de l'amplificateur vers l'entrée du moteur car il n'y a pas de différence entre le signal appliqué externe et le signal généré au potentiomètre, et dans cette situation le moteur arrête de tourner.

### 3.3-Interfaçage des servomoteurs avec des microcontrôleurs :

Les servos ont trois fils. Deux seront utilisés pour l'alimentation (positif et négatif) et un sera utilisé pour le signal qui doit être envoyé depuis le MCU (microcontrôleur)

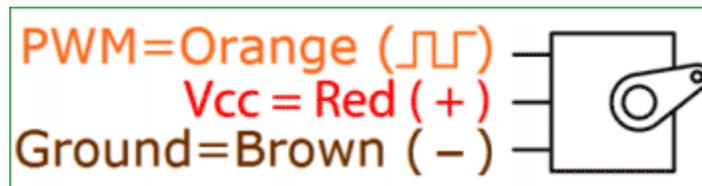


Figure (II- 0:6): Codage couleur d'un servomoteur

Le codage couleur de votre servomoteur peut différer, vérifiez donc votre fiche technique respective.

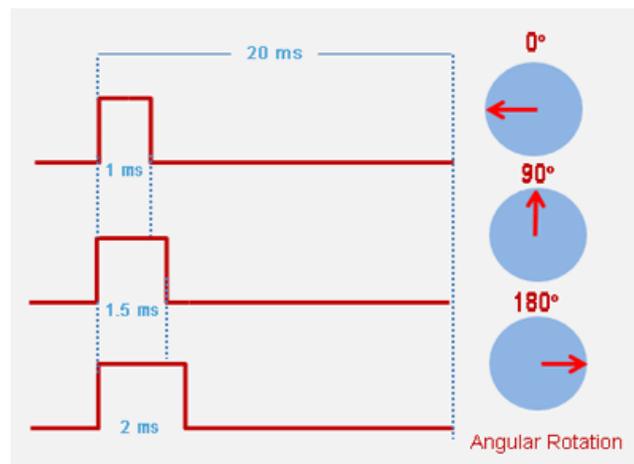
Tous les servomoteurs fonctionnent directement avec vos rails d'alimentation +5V, mais nous devons faire attention à la quantité de courant que le moteur consommerait si vous prévoyez d'utiliser plus de deux servomoteurs, un blindage approprié doit être conçu.

### 3.4-Contrôle du servomoteur :

Tous les moteurs ont trois fils qui en sortent. Dont deux seront utilisés pour l'alimentation (positif et négatif) et un sera utilisé pour le signal qui doit être envoyé depuis le MCU.

Le servomoteur est contrôlé par PWM (Pulse width Modulation) qui est fourni par les fils de commande. Il existe une impulsion minimale, une impulsion maximale et un taux de répétition. Le servomoteur peut tourner à 90 degrés dans les deux sens depuis sa position neutre. Le servomoteur s'attend à voir une impulsion toutes les 20 millisecondes (ms) et la durée de l'impulsion déterminera la distance parcourue par le moteur. Par exemple, une impulsion de 1,5 ms fera tourner le moteur à la position de 90°, comme si l'impulsion est plus courte que 1,5 ms, l'arbre se déplace à 0° et s'il est plus long que 1,5 ms, il fera tourner le servo à 180°.

Le servomoteur fonctionne sur le principe PWM (modulation de largeur d'impulsion), ce qui signifie que son angle de rotation est contrôlé par la durée d'impulsion appliquée à son code PIN de contrôle. Fondamentalement, le servomoteur est composé d'un moteur à courant continu qui est contrôlé par une résistance variable (potentiomètre) et des engrenages. La force à grande vitesse du moteur à courant continu est convertie en couple par les engrenages. Nous savons que  $TRAVAIL = FORCE \times DISTANCE$ , dans le moteur à courant continu, la force est inférieure et la distance (vitesse) est élevée et dans Servo, la force est élevée et la distance est inférieure. Le potentiomètre est connecté à l'arbre de sortie du Servo, pour calculer l'angle et arrêter le moteur à courant continu sur l'angle requis.



*Figure (II- 0:7): position de servomoteur par rapport au temps(ms)*

Le servomoteur peut être tourné de 0 à 180 degrés, mais il peut aller jusqu'à 210 degrés, selon la fabrication. Ce degré de rotation peut être contrôlé en appliquant l'impulsion électrique de largeur appropriée, à sa broche de contrôle. Le servo vérifie le pouls chaque 20 millisecondes. L'impulsion d'une largeur de 1 ms (1 milliseconde) peut faire pivoter le servo à 0 degré, 1,5 ms peut pivoter à 90 degrés (position neutre) et une impulsion de 2 ms peut le faire pivoter à 180 degrés.

Tous les servomoteurs fonctionnent directement avec vos rails d'alimentation +5V, mais nous devons faire attention à la quantité de courant que le moteur consommerait si vous prévoyez d'utiliser plus de deux servomoteurs, un blindage de servomoteur approprié doit être conçu.

## 4-Moteur pas à pas (stepper motor)



*Figure (II- 0:8): Moteur pas à pas EM-463*

Les moteurs pas à pas sont utilisés pour les positionnements angulaires précis (imprimantes, scanners, disques durs ...). Dans tous les types de moteur, on positionne le rotor en modifiant la direction d'un champ magnétique créé par les bobinages du stator. Ils nécessitent donc non seulement un circuit de puissance mais également un circuit de commande qui contient une partie logique. Cette dernière détermine pour chaque pas quelles sont les bobines alimentées et le sens de rotation. La fréquence de l'horloge du circuit logique détermine la vitesse de rotation

### 4.1. Types des moteurs pas à pas :

Les moteurs pas à pas sont classés en fonction de la manière dont on alimente les bobines et du nombre de bobines ainsi que de la nature du rotor qui est soit un barreau de fer doux (moteur à réluctance variable), soit un rotor avec aimant permanent.

Les trois formes généralement utilisées sont le moteur pas-à-pas à aimant permanent, le moteur pas-à-pas à réluctance et le moteur pas-à-pas hybride

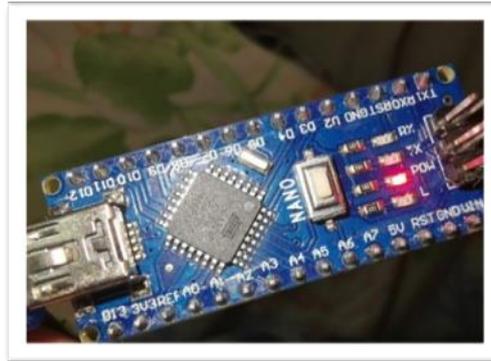
Ce qui nous intéresse c'est le Moteur hybrides, Combinaison du moteur à réluctance variable et du moteur à aimant permanent. Existe en deux modèles :

### 4.2. Caractéristiques :

- Nombre de phases :  
Généralement 4, mais peut-être 2, 3 ou 5.
- Nombre de pas par tours :  
Moteur à aimant permanent : 30°, 15°, 7.5°  
Moteur à réluctance variable : 30°, 15°, 7.5°, 1.8°  
Moteur hybride : 2.25°, 1.8°, 0.9°, 0.72°

Le moteur pas à pas sélectionné a été réutilisé, un moteur pas à pas bipolaire de 12 volts pris d'un imprimant

## 5-Bloc microcontrôleur



*Figure (II- 0:9): carte Arduino Nano*

Pour cette partie, notre choix est porté sur la carte Arduino nano.

### 5.1-Arduino NANO

La carte Arduino Nano est basée sur un ATmega328 cadencé à 16 MHz. Sa mémoire de 32kB et son grand nombre d'E/S font de ce circuit compatible DIL30 un élément idéal pour les systèmes embarqués ou pour des applications robotiques nécessitant du multitâches. La Nano 3.0 peut se programmer avec le logiciel Arduino. Le contrôleur ATmega328 contient un bootloader qui permet de modifier le programme sans passer par un programmeur

### 5.2-Caractéristiques principales :

Alimentation via port USB ou 5 Vcc régulée sur broche 27 ou 6 à 20 V non régulée sur broche 30

- Microprocesseur : ATmega328
- Mémoire flash : 32 kB
- Mémoire SRAM : 2 kB
- mémoire EEPROM : 1 kB
- 14 broches d'E/S dont 6 PWM
- 8 entrées analogiques 10 bits
- intensité par E/S : 40 mA
- cadencement : 16 MHz

- bus série, I2C et SPI
- gestion des interruptions
- fiche USB : mini-USB B
- boîtier DIL30
- dimensions : 45 x 18 x 18 mm

## 6. Capteur de lumière LDR (Photorésistance)



*Figure (II- 0:10): Photorésistance LDR*

Une photorésistance est un composant dont la résistivité dépend de la luminosité ambiante. Pour faire simple, c'est une résistance dont la valeur change en fonction de la lumière qu'elle reçoit.

Il existe différents types de photorésistances, chacune ayant des valeurs de résistance différentes en fonction de la luminosité ambiante. Le type le plus classique de photorésistances est de 1M ohms (obscurité) / 12K ohms (pleine lumière). C'est ce genre de photorésistance qui est employé plus bas dans ce projet.

Qu'importe le diamètre de la photorésistance, sa valeur dans l'ombre ou en pleine lumière, quand une photorésistance est illuminée, sa résistance diminue. On peut donc utiliser une photorésistance pour mesurer la luminosité ambiante.

Sans faire une liste exhaustive, voici quelques exemples d'utilisations très classiques pour une photorésistance :

- Détection jour / nuit
- Mesure de luminosité ambiante (pour ajuster un éclairage par exemple)
- Suiveur de lumière (pour panneaux solaires, robots, etc.)

## 7.Résistance :



*Figure (II-0:11): Resistance de 10kohm*

La résistance est un composant électrique passif qui crée une résistance dans le flux de courant électrique.

Ils peuvent être utilisés à de nombreuses fins. Quelques exemples incluent la limitation du courant électrique, la division de tension, la production de chaleur...etc.

La valeur de résistance et la tolérance sont indiquées par plusieurs bandes colorées autour du corps du composant.

### **Conclusion :**

Comme on peut le voir, j'utilise des matériaux simples pour construire ce projet car je travaille sur une petite conception de tracker solaire pour un petit panneau de (50cm X50cm)

## Chapitre IV : Réalisation

### 1.Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter le circuit et le montage de ce projet. La conception de circuit est faite par le logiciel Fritzing.

Ce chapitre se compose de deux parties ; la première partie contient la présentation de logiciel utilisé et schématisation du montage.

La deuxième partie a été consacré à la construction de projet

### 2.Logiciel Fritzing :

Fritzing est un logiciel avancé et complet développé dans le but de fournir aux ingénieurs et aux artistes un moyen fiable de mener leurs projets et leurs idées aux stades de prototype fonctionnel.

Ce programme conçu pour fonctionner comme un instrument d'enseignement, permettant aux utilisateurs d'apprendre à créer et à utiliser des cartes de circuits imprimés et d'autres composants électroniques. Dans la fenêtre principale de Fritzing, vous pouvez visualiser le circuit virtuel en cours de construction ce qui vous permet de basculer entre trois modes de vue : "Breadboard", "Schematic" et "PCB View". La "planche à pain" ou "Breadboard" est le mode dans lequel vous commencez votre travail, car il offre la possibilité de créer un circuit imitant la réalité, évitant ainsi que des erreurs ne se produisent lors du passage du projet d'un état virtuel à un objet physique.

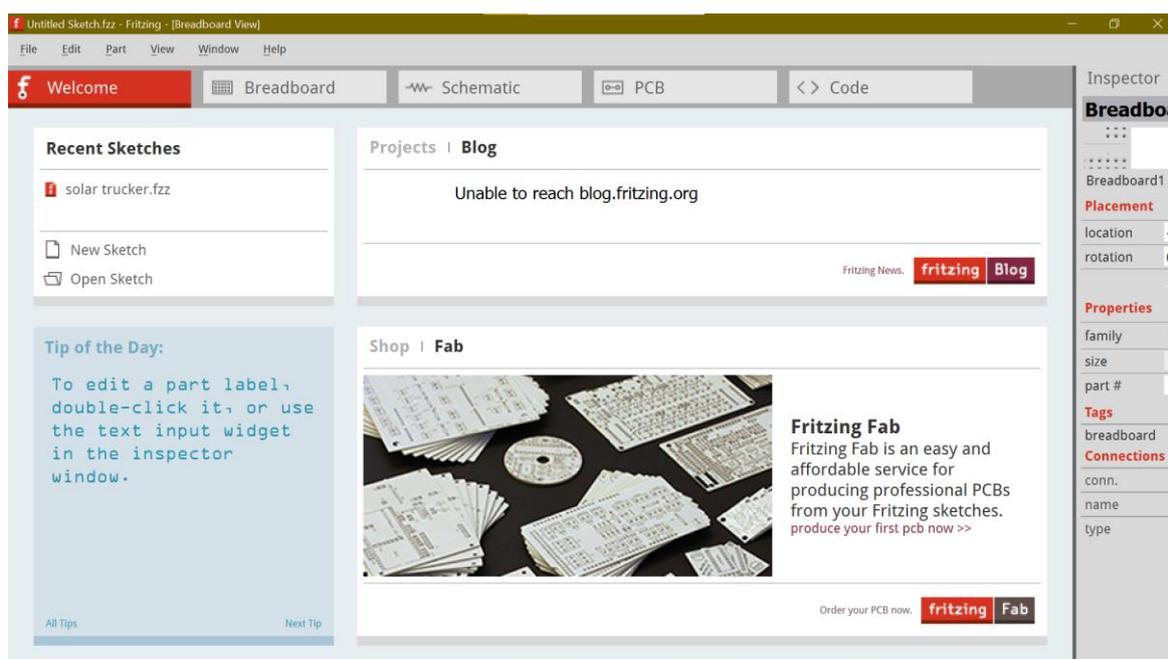


Figure (III-0:1): la fenêtre principale de Fritzing

Fritzing vous fournit une bibliothèque de pièce complète que vous pouvez directement glisser et déposer dans votre projet. Toutes les pièces disponibles sont organisées par catégories. De plus, grâce à l'inspecteur de composants, vous pouvez visualiser et modifier les informations des composants individuels du circuit.

## 2. montage électronique :

Ce montage a été simulé par le logiciel Fritzing

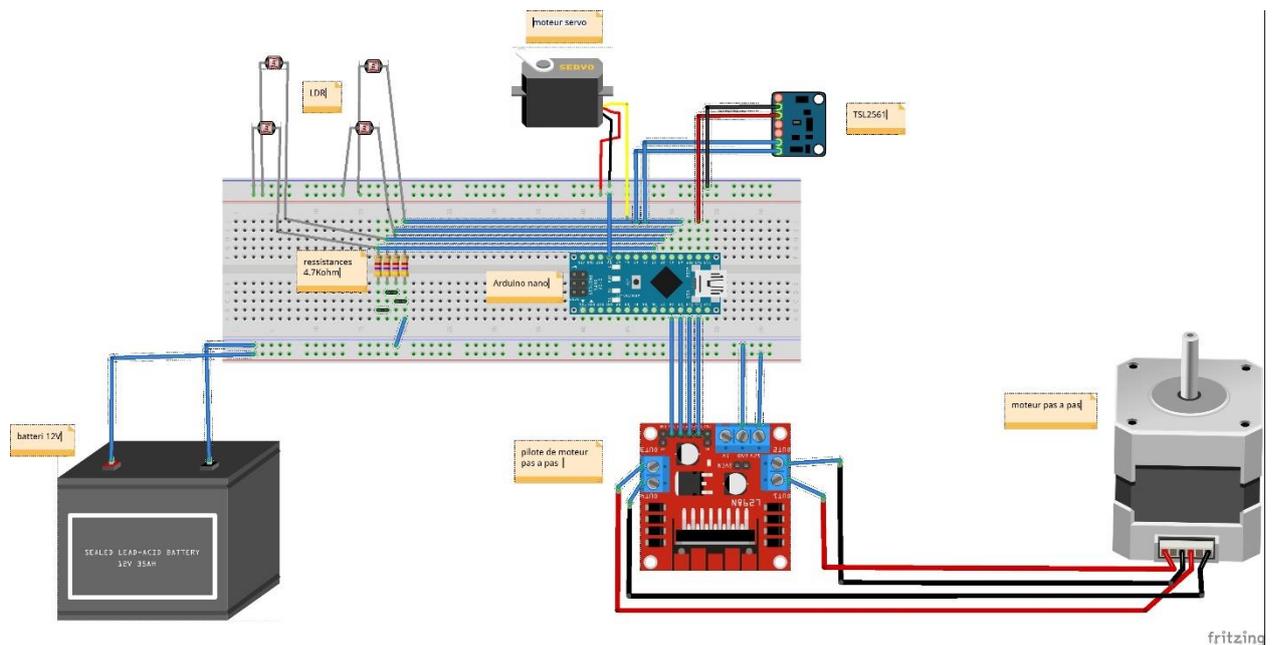


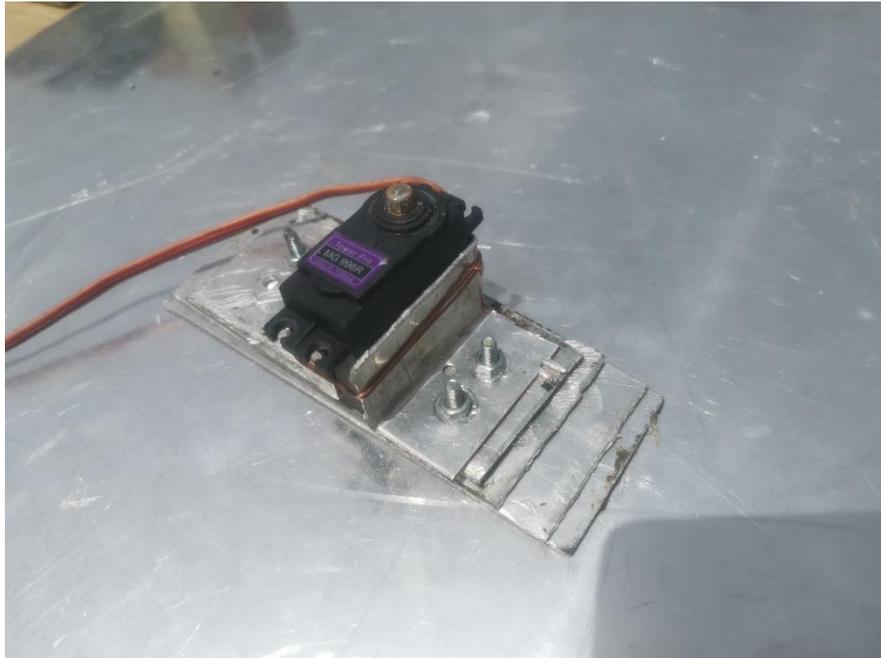
Figure (III-0:2): Le montage électronique

## 3. Réalisation et construction :

Ce système est basé sur la détection de la lumière reçue sur quatre photorésistances montées sur le panneau

### 3.1. Parti mécanique :

L'ensemble du projet a été construit avec des feuilles d'aluminium, Les étapes de construction sont montrées dans les images suivantes :



*Figure (III-0:3): l'emplacement de servomoteur*

J'ai installé le servomoteur responsable du déplacement horizontal dans une base fixe en aluminium



*Figure (III-0:4): La partie inférieure*

Puis j'ai monté le centre de la base mobile sur la tête du moteur

Cette base est mobile grâce aux roues installées en dessous

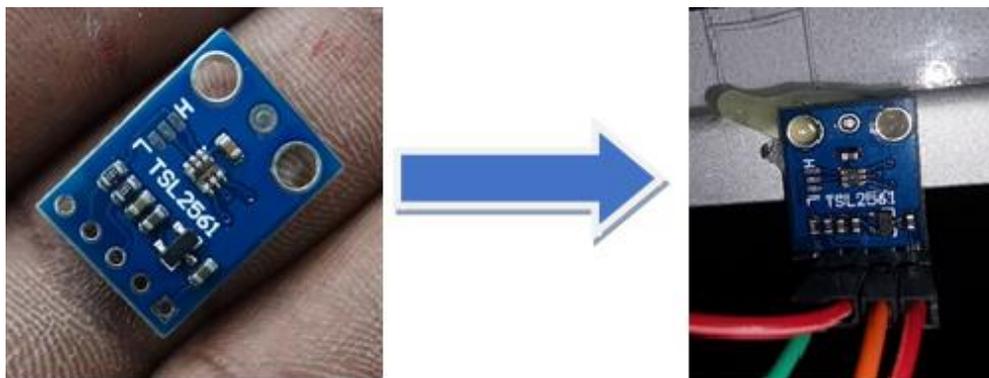


*Figure (III-0:5): Face arrière*

Au-dessus de la base mobile, j'ai installé le moteurs pas à pas responsable du mouvement vertical sur son support, ainsi que les supports de panneaux solaires

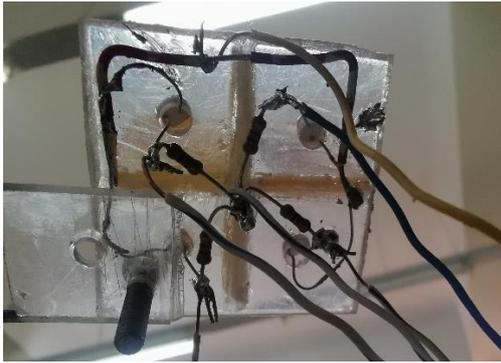
### **3.2. Parti électronique :**

A ce stade, J'ai soudé et fixé les composants électroniques et je l'ai installé sur la structure



*Figure (III-0:6): (TSL2561) Avant soudage et après soudage*

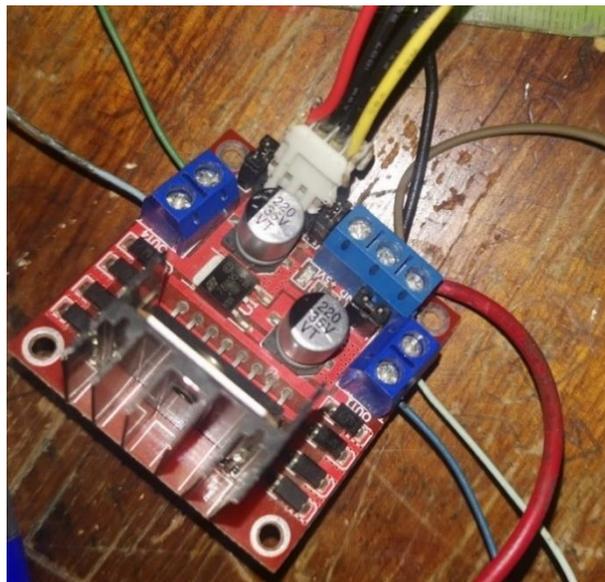
Sur chaque pôle de LDR j'ai soudé une résistance de 10 kOhm, les résistances sont connectées à la terre de l'Arduino et l'autre pôle de LDR est connectée à une entrée sur l'Arduino



*Figure (III-0:7): Capteur de lumière*

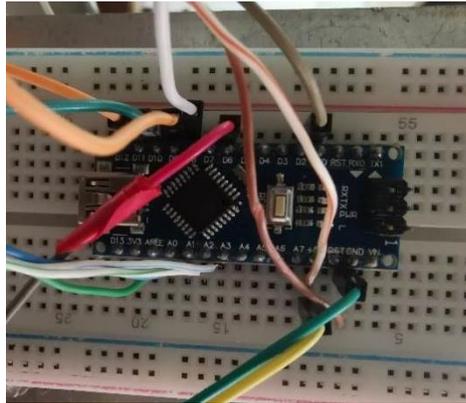
Ce circuit est un diviseur de tension, le LDR avec une incidence lumineuse plus élevée montre la tension la plus élevée, avec la tension maximale limitée à 5 V pour se conformer aux exigences d'entrée Arduino.

En raison des dimensions du capteur LDR, les différences de tension entre les LDR pourraient être faibles une fois côte à côte. Pour surmonter cela, il a été installé des "cloisons" pour renforcer la différence dans la représentation à petite échelle.



*Figure (III-0:8): Le conducteur de moteur installé*

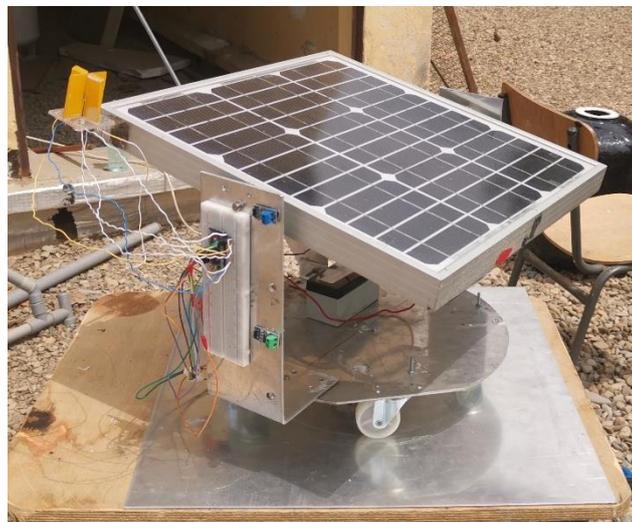
Connecte le moteur pas à pas à son conducteur par les quatre entrées, ainsi que la batterie de 12v  
Puis je connecte le conducteur à la carte Arduino via les sorties



**Figure (III-0:9):** La carte Arduino installé

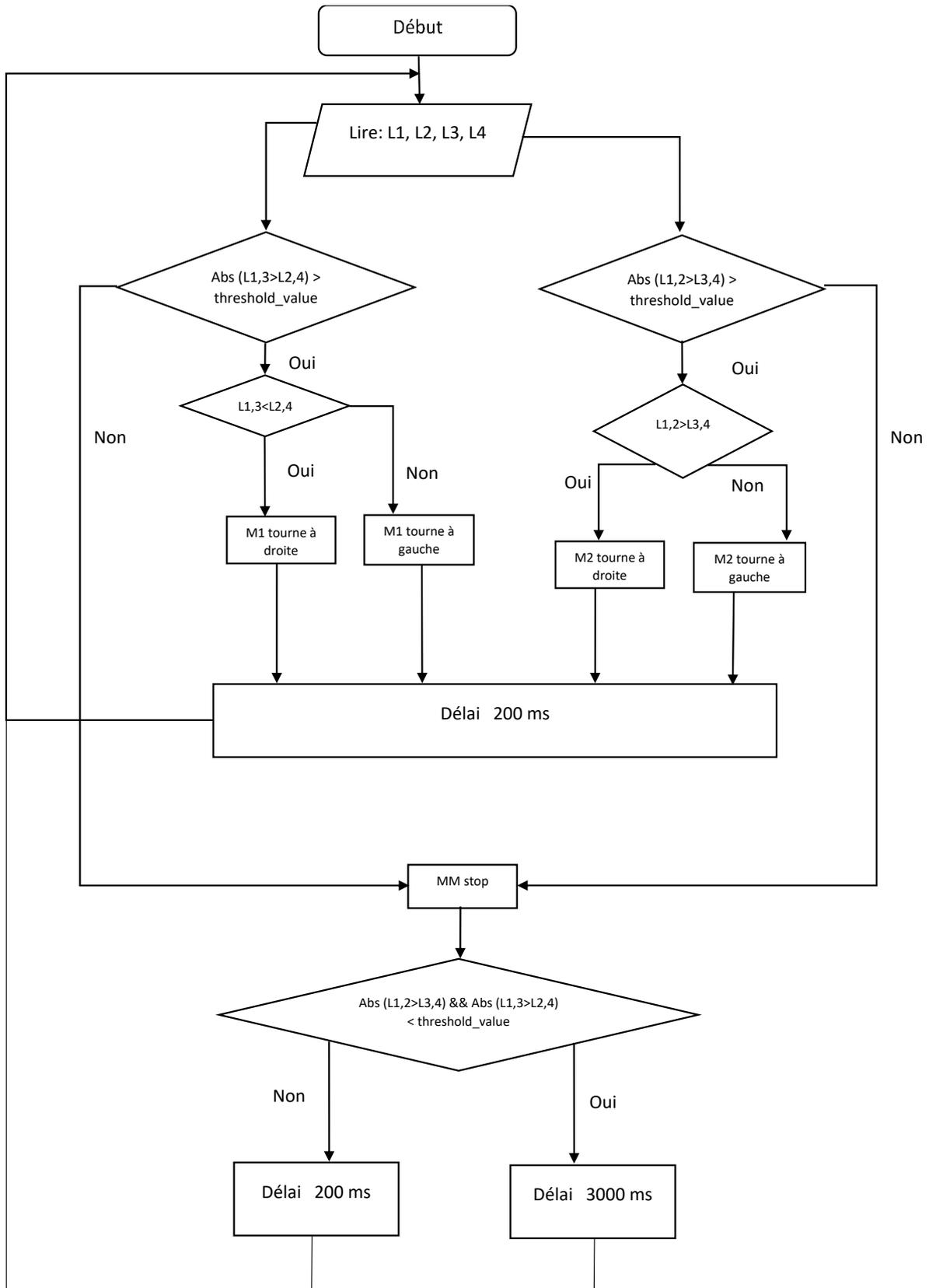
Enfin, connectez tous les éléments à la carte Arduino comme suit :

- Les quatre LDR: A0, A1, A2, A3 et GND
- Le capture de luminosité: +3.3V, GND, D4 et D5
- Le servomoteur: D6, +5V et GND
- Module de commande de moteur pas à pas avec la carte Arduino : D8, D9, D10, D11
- La carte Arduino avec le Module de commande de moteur pas à pas : GND, +5V



**Figure 0-10):** Format du projet final

### 3.3. Organigramme :



### 3.4. Programmation :m

Déclaration d'éléments :

#### 1. Le servomoteur

```
#include <Servo.h>

Servo servo_rightleft;

int servoh = 180;
int servohlimithigh = 175;
int servohlimitlow = 5;
```

#### 2. Le moteur pas à pas

```
#include <Stepper.h>

Stepper stepper_updown(stepsPerRevolution, 8, 9, 10, 11);

const int stepsPerRevolution = 200; // change this to fi
```

#### 3. Le capture de luminosité

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_TSL2561_U.h>
//-----
Adafruit_TSL2561_Unified tsl = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_FLOAT, 0x39);
```

#### 4. Les quatre LDR

```
int ldrtopr = 0;
int ldrtopl = 1;
int ldrbotr = 2;
int ldrbotl = 3;
```

Configuration et réinitialisation d'éléments :

#### 1. Servo moteur

```
void setup(void) {

servo_rightleft.attach(6);
servo_rightleft.write(180);
delay(500);
```

## 2. Moteur pas à pas

```
stepper_updown.setSpeed(60);
```

## 3. Capture de luminosité

```
void configureSensor(void)
{
  tsl.enableAutoRange(true);          /* Auto-gain ... swit
  tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_13MS);

  Serial.println("-----");
  Serial.print  ("Gain:          "); Serial.println("Auto");
  Serial.print  ("Timing:       "); Serial.println("13 ms");
  Serial.println("-----");
}
```

Commencer à boucler le programme :

```
void loop(void)
```

### 1. Calculer la moyenne entre les LDRs

```
int avgtop = (topr + topl) / 2;
int avglft = (botl + topl) / 2;
int avgbot = (botr + botl) / 2;
int avgrht = (botr + topr) / 2;
```

### 2. Faire la différence

```
int horiz = avglft - avgrht;
int vertic = avgtop - avgbot;
```

## 4. Conclusion :

Maintenant et après avoir tout connecté, l'Arduino est prêt à recevoir les données de la carte de capteur LDR, à comparer les valeurs et à prendre des mesures pour déplacer le panneau photovoltaïque pointant vers le soleil.

## Chapitre V : tests et résultats

### Introduction :

Après avoir installé le banc d'essai, j'étais prêt à commencer à tester le prototype.

Avant cela, j'avais besoin d'un outil qui me permet de mesurer le courant et la tension de chaque panneau solaire. Donc j'ai réalisé un multimètre à base d'une carte Arduino qui peut mesurer les paramètres précédents et les stocker dans une carte SD.

Dans ce chapitre nous montrons cette réalisation et les résultats s obtenus (l'efficacité de mon suiveur).

### Multimètre à base d'une carte Arduino nano :

#### Matériel utilise :

- Carte Arduino nano
- Deux capteurs de courant (pour mesure le courant)
- Deux capteurs de tension (pour mesure la tension)
- Lecteur de carte SD (pour stocke les valeurs)
- RTC (pour donne le temps).

Nous utilisons deux paires de capteurs car la mesure se fait simultanément pour un panneau mobile (monte sur le suiveur) et l'autre fixe.

#### Montage du multimètre :

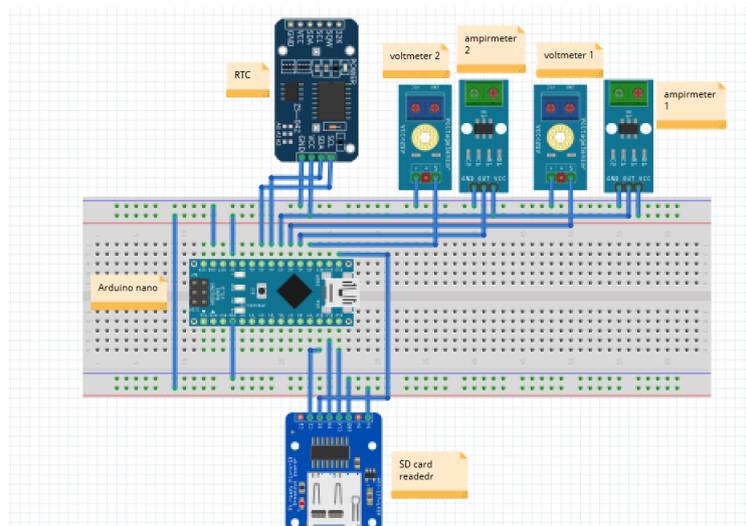


Figure (IV-0:1): Montage de multimètre

Après avoir fait le multimètre, je n'ai pas pu mesurer la quantité exacte de courant car les appareils disponibles ne peuvent pas mesurer des petites valeurs inférieures à 1A, j'ai donc dû le mesurer manuellement à l'aide de multimètres individuels pour chaque panneau solaire.



Figure (IV-0:2): multimètres

## Résultats :

Le test a été fait en septembre 2021 à Blida. Malheureusement, le temps n'était pas parfait pour tester et obtenir de meilleurs résultats (temps nuageux, tempête de sable, pluie,).

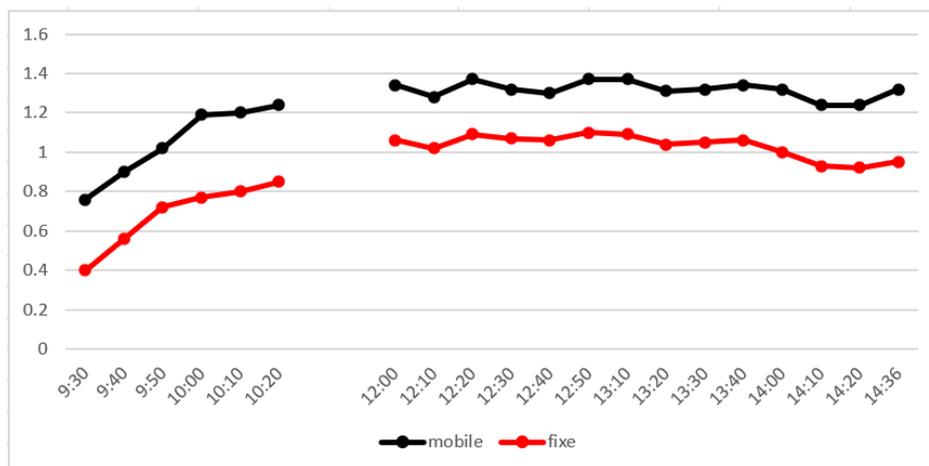


Figure (IV-0:3): Le courant génère par les deux panneaux

Et à la fin, vers les courants délivrés 19 septembre, nous avons atteint le résultat attendu (figure IV.3). A savoir, le graphe donnant les courants délivrés simultanément par le panneau mobile (sur le suiveur) et le panneau fixe. La tension est restée la même pour les deux panneaux, de l'ordre de 18 V.

Dans ce test, nous avons utilisé deux panneaux identiques, l'un monté sur le suiveur solaire et l'autre monté fixe en plein sud à 36,5°

Dans le graphe est reporté les courants générés par les deux panneaux en fonction du temps. On remarque que la courbe noire (panneau mobile) est toujours au-dessus de la courbe rouge. La discontinuité entre t= 10h20 et t=12h00 est due à la pluie. Aussi, on remarque des ondulations simultanées dans les deux courbes et ceci est relié directement à l'éclairement (temps variable)

On remarque aussi qu'au début de la journée (9h30) le système mobile nous donne un grand courant (0.8) eu contre (0.4) par le système fixe

### Mesure du gain en puissance :

On définit le gain en puissance  $G_{ptotal}$  sur une journée de mesure comme étant le rapport entre la différence des puissances délivrées par les deux panneaux  $P_{pm}$  et  $P_{pf}$  sur la puissance  $P_{pf}$  délivrée par le panneau fixe :

$$G_{ptotal} = \frac{P_{pm} - P_{pf}}{P_{pf}}$$

$G_{ptotal}$  : le gain journalier en puissance

$P_{pm}$  : puissance délivrée par le panneau mobile =  $I_{pm} * V$

$P_{pf}$  : puissance délivrée par le panneau fixe =  $I_{pf} * V$

$I_{pm}$  Et  $I_{pf}$  les courants délivrés par les panneaux mobile et fixe

$V = 18V$  cst

$$G_{ptotal} = \frac{P_{pm} - P_{pf}}{P_{pf}} = \frac{I_{pm} * V - I_{pf} * V}{I_{pf} * V} = \frac{I_{pm} - I_{pf}}{I_{pf}}$$

Pour déterminer ce gain on va utiliser la méthode d'interpolation de Trapèze sur la courbe noir et la courbe rouge où h=10min à l'aide de logiciel MATLAB

## La méthode de trapèze :

Cette méthode est basée sur divisé l'Air compris entre a et b qui représentent les extrémités de l'intervalle de cet air et de sommer les surfaces des petits rectangles, la somme de ces derniers est égale à l'intégrale de  $I = \int f(x). dx = [f(x_1) + 2. \sum_{i=2}^{n-1} f(x_i) + f(x_n)]. \frac{\Delta x}{2}$

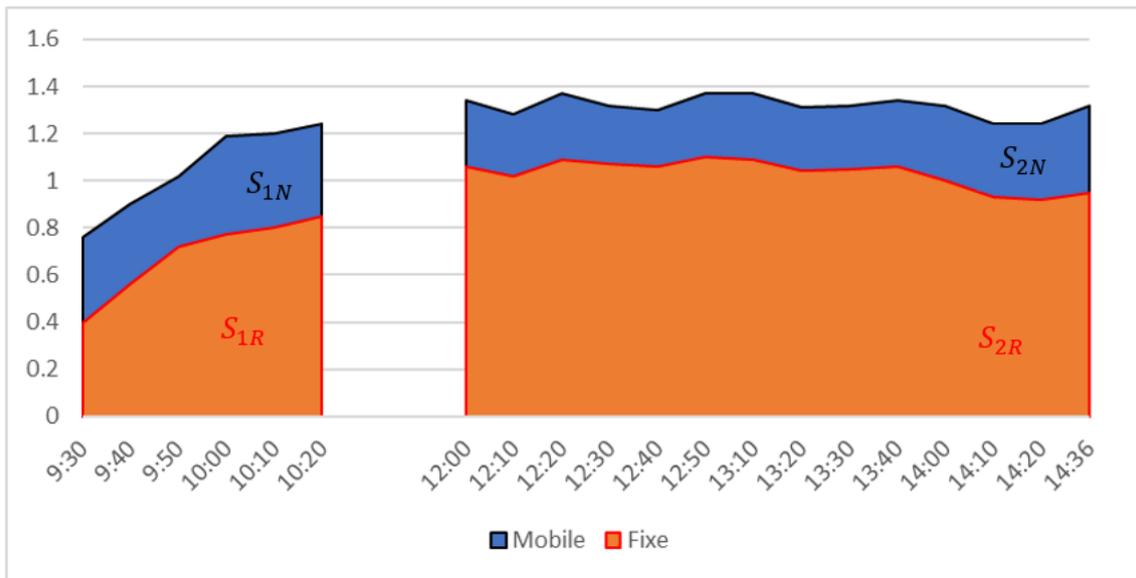


Figure (IV-0:4): les surfaces sous les courbes des courant délivré par les deux panneaux

$S_{1N}$  : La surface sous la courbe noire 1

$S_{1R}$  : La surface sous la courbe rouge 1

$S_{2N}$  : La surface sous la courbe noire 2

$S_{2R}$  : La surface sous la courbe rouge 2

$S_N$  : La surface total sous la courbe noire

$S_R$  : La surface total sous la courbe rouge

$$G_{ptotal} = \frac{(S_{1N} + S_{2N}) - (S_{1R} + S_{2R})}{(S_{1R} + S_{2R})}$$

## Application :

```
clear
clc
% vecteurs des courants
y1=[0.76 , 0.9 , 1.02 , 1.19 , 1.2 , 1.24 ]
y2=[0.4 , 0.56 , 0.72 , 0.77 , 0.8 , 0.85 ]
y3=[1.34 1.28 1.37 1.32 1.3 1.37 1.37 1.31 1.32 1.34 1.32 1.24 1.24
1.32]
y4=[1.06 1.02 1.09 1.07 1.06 1.1 1.09 1.04 1.05 1.06 1 0.93 0.92 0.95]
% la taille des vecteurs
n=length(y1) % la taille y1=y2
m=length(y3) % la taille y3=y4
% le pas en 'mn'
h=10;
% les sur faces partielles
S1n=(y1(1)+y1(n)+2*sum(y1(2:1:n-1)))*h/2
S1r=(y2(1)+y2(n)+2*sum(y2(2:1:n-1)))*h/2
S2n=(y3(1)+y3(n)+2*sum(y3(2:1:m-1)))*h/2
S2r=(y4(1)+y4(n)+2*sum(y4(2:1:m-1)))*h/2
% les surfaces total
Sn=S1n+S2n %La surface sous la courbe de panneau mobile
Sr=S1r+S2r %La surface sous la courbe de panneau fix
% le gain
Gpt=(Sn-Sr)/Sr
```

$$S_{1N} = 53.1000, S_{1R} = 34.7500, S_{2N} = 171.3500, S_{2R} = 135.1000$$

$$S_N = 224.4500$$

$$S_R = 169.8500$$

$$G_{ptotal} = 0.3215 = 32.15\%$$

De ce résultat, on peut dire que dans notre cas le suiveur nous fait gagner chaque jour 32% par rapport à une installation fixe

## Conclusion :

On a voulu estimer l'ordre de grandeur du gain en journalier en puissance du système suiveur par rapport à l'installation fixe pour ce faire :

Nous avons réalisé un suiveur a deux axes commande par une carte Arduino Nano

Nous avons étudié et réalise notre programme sur Arduino

Les tests effectués sur les deux systèmes (mobile et fixe) ont montré un gain journalier de l'ordre de 32% c'est une première estimation mais le calcul exact nécessite un autre mémoire est à l'aide de traceur de M<sup>lle</sup> Allaoua.R

Sans oublier que l'on a réalisé un premier suiveur en utilisant les capteurs de luminance TSL2561 et malheureusement il était impossible de commander avec l'aide de la carte Arduino les quatre capteurs nécessaires, on a essayé de faire fonctionner le suiveur avec trois capteurs placés en triangle mais le résultat était insuffisant d'où l'utilisation à la fin de quatre LDR à la place de ces capteurs TSL2561

Comme perspective à ce travail on va essayer d'utiliser deux cartes Arduino l'une maître et l'autre esclave pour les quatre captures de luminance TSL2561

Aussi, on pourra ajouter une carte GSM pour télécharger à distance les données enregistrées sur la carte SD

Aussi, on pourra refaire le même travail avec des moteurs pas à pas plus grand pour commander des panneaux solaires (grande dimension)

## **Conclusion générale :**

Des études ont prouvé que le système de suivi solaire à axe libre unique peut augmenter la puissance de sortie d'environ 20 % et que le système de suivi à axe libre double peut augmenter la puissance de sortie de plus de 40 %. Par conséquent, ce travail consiste à développer et à mettre en œuvre un système de suivi du soleil qui a deux degrés de liberté et utilise des capteurs pour détecter la lumière du soleil. Le circuit de contrôle du tracker solaire est basé sur un microcontrôleur Arduino. Cette carte Nano est le cerveau de l'ensemble du système de suivi, il a été programmé pour détecter la lumière du soleil à travers les capteurs et ensuite actionner le moteur pour qu'il se positionne là où le maximum de lumière solaire pourrait être sur la surface du panneau solaire.

Après de nombreux échecs dans les tests du suiveur solaire, beaucoup de temps a été nécessaire pour la vérification et les essais en raison de l'imprévisibilité de la météo et du débogage des erreurs, l'implémentation du suivi est réalisée avec succès avec une conception complète de deux degrés de liberté en utilisant le microcontrôleur Arduino, des composants appropriés et des moteurs à courant continu à engrenages sont utilisés pour le modèle prototype, qui présente un mouvement clair, stable et précis.

## Références :

[1] Moumami, N. Hamani , N.Moumami et Z. Mokhtari, 'Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra', (SPIE8)8ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Algérie, Novembre 2006.

[2] Merzouk M, Performances théoriques et expérimentales des capteurs solaires, Université Abu Bakr Belkaid, 2004, Algérie.

[3] BERNARD Jacques, Energie solaire,INSA Toulouse, 2011.

[4] Reindl DT, Beckman WA, Duffie JA. Diffuse fraction corrections.SolarEnergy 1990;45(1):1–7.

[5] : Etude des performances des capteurs solaire M.Merzouk

[6] Etude de la Variation de la Surface Eclairée dans le Cas d'un Concentrateur Cylindro-parabolique. Thèse boukhalfa 2016.

[7] Scharmer, K., Greif, J., eds., 2000, The European solar radiation atlas. Vol. 2: Database and exploitation software. Paris (Les Presses de l'...cole des Mines).