



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département : Maintenance en instrumentation**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière : Génie Industriel**

**Spécialité : Ingénierie de La Maintenance en Instrumentation**

### **Thème**

## **Réalisation d'un dispositif intelligent de poursuite solaire**

Présenté et soutenu par :

Nom : BOUCHOUAREB

Prénom : Ismail

Nom : RAHOU

Prénom : Habib Badreddine

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
MEHDI ROUAN Serik	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Président</b>
Mme CHOUITEK Mama	MCA	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Encadreur</b>
Mme RAHIEL Rachida	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Examineur</b>

**Année 2021/2022**



# Remerciements

Nous remercions **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.

- Nous remercions nos chers parents pour les sacrifices et pour tout ce qu'ils nous ont donné tout au long de notre parcours d'étude.
- Nous remercions notre promotrice **Mme CHOUITEK Mama**, Enseignante à l'IMSI, pour m'avoir orienté et donné de précieux conseils.
- Nous apportons aussi nos vifs remerciements aux **directeur, les personnels en seignants et les employés** de l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle de ORAN.
- Nous remercions chaleureusement **les membres du jury** pour leur regard critique et plus que pertinent sur l'ensemble de notre travail.
- Nous remercions tous ceux qui nous ont aidés à accomplir ce travail de près ou de loin, même si c'était avec un mot gentil.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma chère mère, mon chère père pour leur aide et leur soutien tout au long de mes études, et qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui et j'espère qu'un jour je serai capable de leur donner au moins le minimum car quoi qu'on fasse on arrivera jamais à leurs rendre tout.*

- *Mes très chères soeurs et mon très cher frère.*
- *Tout ma famille.*
- *Mes chers amis RAHOU Badreddine mon binôme et BENNAAR Oussama ainsi que leurs familles.*
- *Tout mes amis.*
- *Toute la promotion 2021/2022.*
- *Tous ceux qui par un mot m'ont donné la force de continuer.*

*BOUCHOUAREB Ismail*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon cher père, l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et ma source de joie et de bonheur, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont il ne cesse de me combler ; rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.*

*Ce travail est le fruit de ces sacrifices qu'il as consentie pour mon éducation et ma formation.*

*A ma chère maman, qui présente pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse, merveilleux exemple de sacrifice, sa prière et sa bénédiction m'ont été un grand secours pour mener à bien mes études.*

*Que ALLAH vous procure une bonne santé et une longue vie. Je vous aime.*

*Et à ma fiancée, mon amour, mon soutien dans cette vie, qui m'a beaucoup donné dans cette période.*

*A la mémoire de mes grands parents.*

*Sans oublier tous mes professeurs et tous mes amis qui m'ont accompagné pendant cette période.*

*RAHOU Habib Badreddine*

**Sommaire**

Résumé : .....	I
Liste des tableaux : .....	II
Liste des figures : .....	III
Liste des symboles: .....	VI
Abréviations : .....	VII

Introduction générale : .....	1
-------------------------------	---

**Chapitre I : Généralité sur le rayonnement solaire et le système photovoltaïque**

1. Introduction : .....	3
2. Energie solaire : .....	3
3. Le rayonnement solaire : .....	4
3.1. Le spectre du rayonnement solaire : .....	4
3.2. Les différents types du rayonnement solaire : .....	6
3.2.1. Rayonnement direct .....	6
3.2.2. Rayonnement diffus : .....	7
3.2.3. Rayonnement solaire réfléchi : .....	7
3.2.4. Rayonnement global : .....	7
4. L'effet photovoltaïque : .....	8
5. Les cellules photovoltaïques : .....	8
5.1. Brève histoire de la cellule photovoltaïque .....	9
5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque : .....	9
5.3. Avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques : .....	10
5.3.1. Avantages : .....	10
5.3.2. Inconvénients : .....	10
5.4. Les différents types de cellules photovoltaïques : .....	11
5.4.1. Les cellules en silicium : .....	11
5.4.2. Les cellules sans silicium : .....	13
5.5. Évolution technologique dans la production de cellules photovoltaïques : .....	13
5.6. Principe générale de fabrication des cellules photovoltaïque : .....	13

6. Les avantages et les inconvénients de la production d'électricité à partir de l'effet photovoltaïque : .....	14
6.1. Les avantage :.....	14
6.2. Les inconvénients : .....	15
7. La position géométrique du soleil :.....	16
7.1. Mouvement quotidien est-ouest du soleil : .....	19
7.2. Mouvement saisonnier nord-sud du soleil : .....	19
8. Conclusion : .....	21

## Chapitre II : Les systèmes de poursuites solaire

1. Introduction: .....	22
2. Historique de l'utilisation d'une poursuite solaire :.....	22
3. Le principe de fonctionnement d'une poursuite solaire :.....	23
4. Les méthodes de poursuite solaire : .....	23
4.1. La méthode de photorésistances (LDR) :.....	23
4.2. La méthode astronomique : .....	24
5. Les différents types de poursuite solaires :.....	24
5.1. Un suiveur solaire passif : .....	24
5.2. Un suiveur solaire actif : .....	25
5.2.1. Suiveur solaire mono-axe: .....	26
5.2.2. Suiveur solaire double axe:.....	27
6. Importance de la poursuite solaire: .....	28
7. La comparaison des suiveurs mono-axe et suiveurs double axes .....	29
8. Les avantages et les inconvénients des suiveurs solaires :.....	29
8.1 Les inconvénients : .....	29
8.2. Les avantages : .....	29
9. Les moyens de contrôle de l'augmentation d'énergie par suiveur : .....	30
10. Nettoyage et entretien des panneaux solaires : : .....	30
11. Conclusion : .....	31

**Chapitre III : Etude et description des différents composants électroniques utilisés**

1. Introduction: .....	32
2. Schéma synoptique du notre dispositif intelligent de poursuite solaire:.....	33
3. Etudier et décrire les composants électroniques de notre projet : .....	34
3.1. Les capteurs de lumière photorésistance ou LDR : .....	34
3.1.1. Définition : .....	34
3.1.2. Principe de fonctionnement :.....	34
3.2. La carte de commande ARDUINO UNO : .....	36
3.2.1. Historique : .....	36
3.2.2. Présentation général de l'ARDUINO: .....	37
3.2.3. Les principes de sélection de carte ARDUINO:.....	37
3.2.4. La carte ARDUINO UNO :.....	38
3.2.5. Les caractéristique technique de la carte :.....	39
3.2.6. Architecture de la carte ARDUINO UNO : .....	40
3.3. Câble USB ARDUINO UNO:.....	43
3.4. Les servomoteurs : .....	44
3.4.1. Définition : .....	44
3.4.2. Le servo MG996 :.....	45
3.4.3. LES SPÉCIFICATIONS :.....	47
3.4.4. La commande d'un servomoteur : .....	47
3.4.5. Cablage Arduino et un servomoteur : .....	49
3.5. Les outils de connexion :.....	50
3.5.1 Le domino électrique :.....	50
3.5.2. Les fils de pin :.....	50
3.6. Alimentation :.....	51
3.7. Les résistances électrique : .....	51
4. Conclusion :.....	52

**Chapitre IV : Réalisation de notre dispositif intelligent de poursuite solaire**

1. Introduction :	53
2. La partie électrique:	54
2.1. La réalisation de prototype des photorésistances :	54
2.2. L`installation des composants électronique à son emplacement désigné :	55
2.3. Le câblage et branchement des composants électronique :	57
3. La partie mécanique :	58
4. La partie de programmation :	60
4.1. Les étapes de programmation ARDUINO :	60
4.2. Charge le programme dans la carte ARDUINO UNO	60
4.3. Présentation de logiciel :	61
4.4. Le code ARDUINO UNO :	63
5. La phase de tests et d`expérimentation :	64
6. Conclusion :	66
 Conclusion générale:	 67
 Bibliographie :	 IX
 Annex :	 XI

**المخلص:**

تعد الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة المتجددة التي يتم استخدامها بشكل متكرر. لتحسين أداء الألواح الشمسية ورفع قدرتها على الاستفادة قدر الإمكان من الإشعاع الشمسي ، قمنا في عملنا بتحقيق جهاز ذكي لتتبع الطاقة الشمسية ثنائي المحور لضمان إنتاج المزيد من الطاقة الكهربائية للخلايا الكروضوئية المتنقلة مقارنة بالخلايا الثابتة.

يتكون نظامنا من هيكل خشبي بمحركات مؤازرة ومستشعرات ضوئية لقياس شدة الإشعاع إضافة الى لوحة تحكم الكترونية (اردينو اونو) للتحكم في حركة الجهاز وتوجيهه حسب اشعة الشمس وقد اظهرت التجربة نتائج ممتازة.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الشمسية ، الألواح الكروضوئية ، اردوينو اونو ، تعقب الطاقة الشمسية، ومستشعرات ضوئية.

**Abstract :**

Solar energy is one of the most frequently used renewable energy sources. To improve the performance of solar panels and increase their ability to benefit as much as possible from solar radiation, in our work we have realized a smart two-axis solar tracker to ensure that more electrical energy is produced for mobile photovoltaic cells compared to stationary cells.

Our system consists of a wooden structure with servo motors and optical sensors to measure the intensity of radiation, in addition to an electronic control panel ( ARDUINO UNO) to control the movement of the device and direct it according to sunlight. The experiment showed excellent results.

**Keywords :** solar energy , photovoltaic panels, ARDUINO UNO , Solar tracker, optical sensors.

**Résumé :**

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus utilisées. Pour améliorer les performances des panneaux solaires et augmenter leur capacité à bénéficier au maximum du rayonnement solaire, nous avons réalisé dans notre travail un dispositif intelligent de poursuite solaire à deux axes pour garantir que plus d'énergie électrique est produite pour les cellules photovoltaïques mobiles par rapport aux cellules fixes.

Notre système se compose d'une structure en bois avec des servomoteurs et des capteurs de lumière photorésistance pour mesurer l'intensité du rayonnement, en plus d'un panneau de commande électronique ( ARDUINO UNO) pour contrôler le mouvement de l'appareil et le diriger en fonction de la lumière du soleil. L'expérience a montré d'excellents résultats .

**Mots clés :** Energie solaire, Panneaux photovoltaïques, Poursuite solaire, ARDUINO UNO, Capteurs de lumière photorésistance.

**Liste des tableaux :**

<b>Le tableau I.1:</b> Interaction du rayonnement solaire avec les constituants de l'atmosphère. ....	3
<b>Le tableau II.1:</b> Comparaison des suiveurs mono-axes et double axes .....	27
<b>Le tableau III.1:</b> Les caractéristiques techniques d'ARDUINO UNO.....	37
<b>Le tableau IV.1:</b> Le branchement des points obtenu avec l'ARDUINO UNO.....	55
<b>Le tableau IV.2 :</b> La signification des lettres. ....	57

## Liste des figures :

**Chapitre I : Généralité sur le rayonnement solaire et le système photovoltaïque**

La figure I . 1: Schéma de transformation de l'énergie solaire en l'énergie électrique.....	1
La figure I . 2: Interaction du rayonnement solaire avec les constituants de l'atmosphère. ....	2
La figure I . 3: Spectre de la lumière reçue à la surface de la Terre.....	3
La figure I . 4: Types de rayonnement solaire reçus au sol. ....	4
La figure I . 5: Appareils de mesure « un pyréliomètre ».....	4
La figure I . 6: Appareils de mesure.....	5
La figure I . 7: L'effet photovoltaïque.....	6
La figure I . 8: Une cellule photovoltaïque.....	6
La figure I . 9: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. ....	8
La figure I . 10: Les différents types de cellules photovoltaïques . ....	9
La figure I . 11: Les différents types des panneaux en silicium. ....	10
La figure I . 12: La chaîne de fabrication des cellules photovoltaïques. ....	12
La figure I . 13: La position du soleil en un site varie suivant la rotation de la terre sur elle-même et autour du soleil. ....	14
La figure I . 14: Graphique représentant l'angle entre le soleil et le plan équatorial de la terre, .....	15
La figure I . 15: La position du soleil est repérée en tout site par des définitions angulaires traditionnelles. ..	16
La figure I . 16: La position du soleil par rapport au panneau.....	16
La figure I . 17: Trajectoire soleil. ....	18

**Chapitre II : Les systèmes de poursuites solaire**

La figure II . 1: Centrale solaire Thémis France avec l'héliostat.....	20
La figure II . 2: Le principe de fonctionnement d'une poursuite solaire. ....	21
La figure II . 3: Une poursuite solaire à base de photorésistances (LDR). ....	21
La figure II . 4: l'organigramme de la méthode astronomique .....	22
La figure II . 5: Un suiveur solaire passif. ....	23
La figure II . 6: Les suiveurs solaires actifs.....	23
La figure II . 7: Suiveur à axe horizontal. ....	24
La figure II . 8: Suiveur à axe vertical incliné. ....	25
La figure II . 9: Suiveur à axe vertical simple .....	25
La figure II . 10: Suiveur solaire double axe. ....	26
La figure II . 11: Diagramme de comparaison entre la production électrique des systèmes solaires fixe et les	

poursuite solaire 1 axe et 2 axe.....	26
La figure II . 12: Différence entre panneau encrasse et panneau nettoyée.....	28

### Chapitre III : Etude et description des différents composants électroniques utilisés

La figure III . 1: Le schéma synoptique général de notre dispositif intelligent de poursuite solaire.....	31
La figure III . 2: Les capteurs de lumière photorésistance ou LDR et le symbole électrique.....	32
La figure III . 3: Les différents positions de l`isolant de lumière avec LDR.....	33
La figure III . 4: Circuit équivalent du capteur LDR utilisé.....	33
La figure III . 5: Premier modèle de la carte ARDUINO.....	34
La figure III . 6: Présentation des trois modèle du carte ARDUINO.....	36
La figure III . 7: La carte ARDUINO UNO.....	36
La figure III . 8: Architecture de la carte ARDUINO UNO.....	38
La figure III . 9: Le microcontrôleur ATmega328.....	39
La figure III . 10: Schéma bloc de description du microcontrôleur l'ATmega 328.....	40
La figure III . 11: Câble USB type A/B.....	41
La figure III . 12: Définition des composants du servomoteur.....	42
La figure III . 13: Schéma de principe d'un servomoteur.....	43
La figure III . 14: Le servo MG996 Tower Pro et les engrenages métalliques.....	43
La figure III . 15: Vue éclatée d'un servomoteur.....	44
La figure III . 16: Signal de fréquence 50 Hz.....	45
La figure III . 17: Position en fonction de la pulsation.....	46
La figure III . 18: Position en fonction de la pulsation avec décalage.....	46
La figure III . 19: Schéma électrique d`un servomoteur.....	47
La figure III . 20: Montage simple d`un servomoteur avec L`ARDUINO.....	47
La figure III . 21: Un domino électrique ou borne de raccordement.....	48
La figure III . 22: les fils de pin.....	49
La figure III . 23: Adaptateur et une batterie.....	49
La figure III . 24: Résistance électrique de 10 k ohm.....	49

**Chapitre IV : Réalisation de notre dispositif intelligent de poursuite solaire**

La figure IV . 1: Schéma de câblage électrique de notre dispositif intelligent de poursuite solaire. ....	52
La figure IV . 2: La partie interne de la seringue En plastique sans LDR.....	53
La figure IV . 3: Un fer à souder à l'étain. ....	53
La figure IV . 4: Vue de face et vue d'arrière de prototype des LDR final avec les résistances de 10k ohm. 53	
La figure IV . 5: L'installation de carte ARDUINO UNO. ....	54
La figure IV . 6: L'installation des servomoteurs. ....	54
La figure IV . 7: L'installation de prototype des LDR et les résistances .....	54
La figure IV . 8 : Le branchement des points obtenu avec l' ARDUINO UNO par les fils à pin. ....	56
La figure IV . 9:Présentation des différents blocs de la structure mécanique de notre poursuite solaire. ....	57
La figure IV . 10: la communication entre la carte ARDUINO UNO et PC. ....	58
La figure IV . 11: L'interface de L`IDE ARDUINO en détail. ....	59
La figure IV . 12: Les différents boutons dans le cadre numéro 2.....	60
La figure IV . 13: Le premier étape de code ARDUINO. ....	61
La figure IV . 14: La deuxième étape de code ARDUINO.....	62
La figure IV . 15: Quelques positions du poursuit pendant la période d'essai. ....	63

**Liste des symboles :**

$\lambda$  : longueur d'onde micromètre en [ $\mu\text{m}$ ]

$t$  : Température en kelvin [K]

$\delta$  : L'inclinaison de l'axe des pôles en degrés [ $^\circ$ ]

$J$  : le jour Julien

$\beta$ : L'angle est défini en fonction du jour de l'année N en degrés [ $^\circ$ ]

$\delta_s$ : La déclinaison solaire en degrés [ $^\circ$ ]

$a$  : l'angle azimut solaire en degrés [ $^\circ$ ]

$\omega$  : Angle horaire en degrés [ $^\circ$ ]

$\theta_z$ : angle zénithal en degrés [ $^\circ$ ]

$h$  : l'angle de l'altitude solaire en degrés [ $^\circ$ ]

$\lambda$ : la latitude locale en degrés [ $^\circ$ ]

$F$  : fréquence en hertz [Hz]

$T$  : le temps de la période en second [s]

**Abréviations:**

**PV** : Photovoltaïque

**GPV** : Générateur photovoltaïque

**CO 2** : Le dioxyde de carbone

**UV** : Ultraviolet

**LV** : Lumière visible

**IR** : Infrarouge

**CdTe** : Tellure de Cadmium

**CIS** : Cuivre-Indium -Sélénium

**CIGS** : Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium

**LDR** : Light- Dépendent-Résistor

**GCR**: Ground Coverage Ratio

**UA**: Unite astronomique

**MIT**: Massachusetts Institute of Technology

**AVR**: Alf et VEDGAR RPROCESSEUR

**USB**: Universal Serial Bus

**PWM**: Pulse Width Modulation

**ICSP**: In circuit serial programmer

**AC-DC**: Alternative Current-Direct

**FTDI**: Future Technology Devices International

**IDE:** Integrated development environment

**PWM:** Pulse width modulation

**E/S:** Entrées/Sorties

**SRAM:** **Static** Random Access Memory

**EEPROM:** Electrically erasable programmable read only memory

**CPU:** Central Processing Unit

**RISC:** Reduced Instruction Set Computer

**CMOS:** Complementary metal-oxide semiconductor

**T/C:** Timers/Counters

**UART:** Stands for Universal Asynchronous Receiver Transmitter

**SPI :** Serial Peripheral Interface

**TWI:** Two Wire Interface

**I2C:** Inter Integrated Circuit

**CAN :** Convertisseur Analogique-Numérique

**A0 A1 A2 A3 A4 A5 :** Les broches analogiques

**PC:** Personal Computer

**CNC:** Computer numerical control

**RC :** Radiocommandés

**EDF :** Électricité de France

**IHM :** Interface homme machine

**Introduction générale :**

Les énergies renouvelables sont importantes dans ce monde. Les énergies renouvelables comme l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire. Le soleil peut satisfaire tous nos besoins si nous apprenons à exploiter rationnellement, l'énergie qu'il rayonne vers la terre. Il brille dans le ciel depuis presque 5 milliards d'années et les scientifiques ont calculé qu'il est à la moitié de son existence. Nous avons du mal à imaginer qu'au cours d'une année le soleil diffuse vers la terre quatre mille fois plus d'énergie que celle consommée par toute la population mondiale.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Les systèmes photovoltaïques transforment directement la lumière du soleil en électricité, peuvent ainsi alimenter de petits équipements portables (montres, calculatrices, ...), des applications en site isolé (habitations éloignées du réseau électrique, équipements de télécommunication, électrification rurale), ou être raccordées au réseau électrique. Les modules PV travaillent avec la conversion directe de la lumière à une énergie électrique.

La lumière du soleil est un ingrédient nécessaire et efficace. Ils travaillent avec le maximum d'efficacité quant la lumière incidente est perpendiculaire a leurs cellules. Donc, l'efficacité énergétique de ces systèmes dépend du degré d'utilisation et de la conversion du rayonnement solaire.

Il y a deux manières pour maximiser le taux d'énergie utile: en optimisant la conversion et le degré d'absorption, et en augmentant le taux de rayonnement d'incidence en employant les systèmes d'orientation mécanique.

Ces systèmes appelés suiveurs solaires ou traqueurs solaires. Les traqueurs solaires sont conçus et construits pour optimiser le rendement de puissance des panneaux photovoltaïque. Ainsi, l'augmentation de la production d'énergie électrique le système de poursuite solaire 'sun tracking systems' doit être ajusté de sorte qu'il soit toujours visé avec précision face au soleil.

Il existe plusieurs systèmes de suivi du soleil et ils diffèrent par le principe de fonctionnement et les caractéristique de travail, par exemple le suiveur solaire un axe et le suiveur solaire à deux axes, le premier est suivi le trajet par cet axe est souvent en azimut, c'est-à-dire d'Est en Ouest au fil de la journée et l'angle d'inclinaison du panneau est fixe et le second dépend de qui lui permet de suivre les mouvements en azimut et en inclinaison au cours de la

journée. Ainsi, le capteur reste constamment orienté vers le soleil. Ce types de suiveur est très imposant et fournit de meilleures performances et grande efficacité par rapport au suiveur mono-axe.

C'est pourquoi nous avons proposé la réalisation de notre projet d'un dispositif intelligent de poursuite solaire basé sur deux axes, nous avons utilisé dans notre réalisation la carte de commande ARDUINO UNO et des photorésistances ou bien LDR.

Ce travail est composé de quatre chapitres:

**Dans le premier chapitre**, on fait une généralité sur le rayonnement solaire et le système photovoltaïques ainsi que le principe de fonctionnement et caractéristiques et les avantages et les inconvénients.

**Dans le deuxième chapitre**, nous avons présenté les systèmes de poursuite solaire, les méthodes de poursuite, ses types, et les spécifications et importance.

**Dans le troisième chapitre**, nous avons étudié et décrire les composants électronique utilisé ainsi que le principe de fonctionnement et caractéristiques.

**Dans le quatrième chapitre**, nous avons présenté les différents étapes de la réalisation de notre dispositif intelligent de poursuite solaire à l'aide une carte Arduino et la phase de test et expérimentation de notre projet. .

A la fin de ce travail, on terminera par une conclusion générale.

*Chapitre I :*  
*Généralité sur le*  
*Rayonnement solaire*  
*Et le système*  
*Photovoltaïque*

## 1. Introduction :

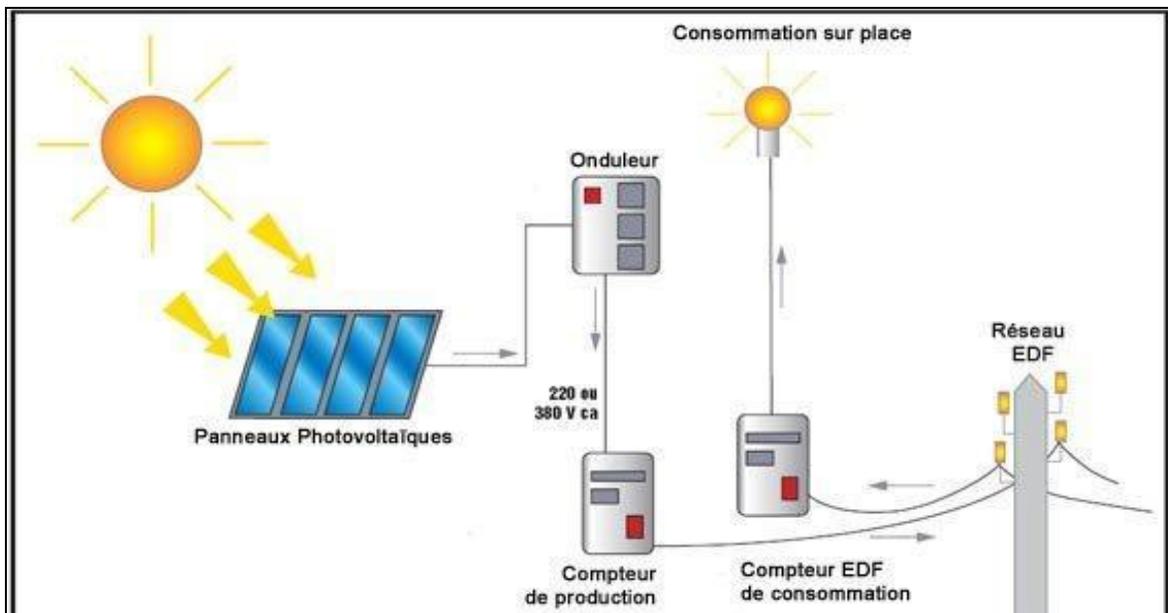
L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale. De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe (alimenté une charge) ou stockée en batteries. Pour bien comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire, l'effet photovoltaïque et Le principe de la cellule photovoltaïque.

## 2. Energie solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable.

On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet pas directement de CO<sub>2</sub>. Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité.

Plus précisément, le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité.



La figure I.1 : Schéma de transformation de l'énergie solaire en l'énergie électrique.

C'est là que rentre en jeu la cellule photovoltaïque : lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux. Ces derniers génèrent un courant électrique continu qui sera converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur.

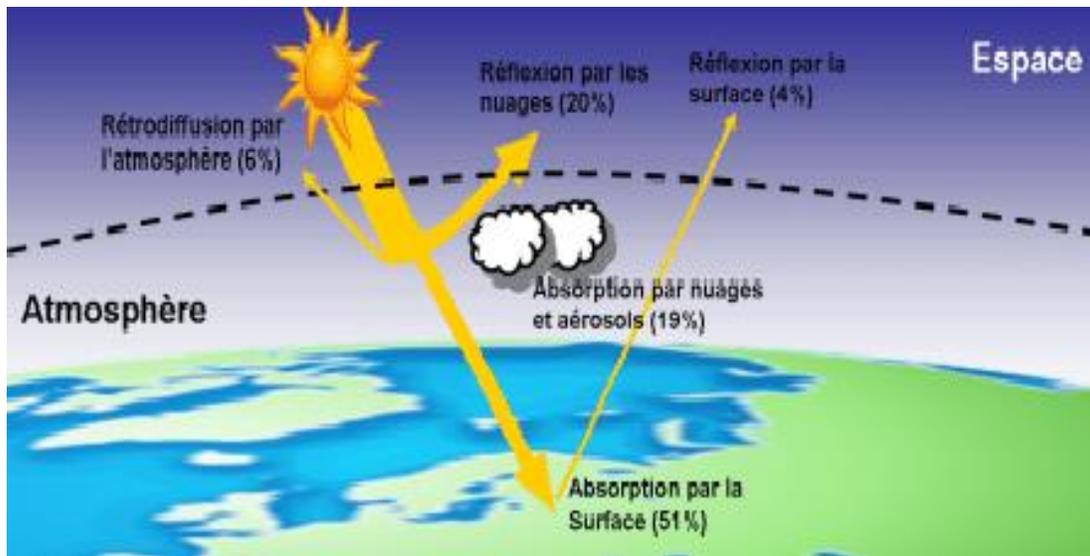
Cette électricité produite peut être immédiatement employée pour faire fonctionner vos appareils ou vous éclairer [1].

### 3. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus de rayons cosmiques.

Une partie du rayonnement émis parvient jusqu'à la Terre, où des ondes sont réfléchies par l'ionosphère et l'atmosphère (les ondes décimétriques et certains rayons ultraviolets), tandis que d'autres arrivent à la surface des nuages, des océans ou des continents.

Elles vont alors être plus ou moins réfléchies selon l'albédo de la surface frappée. Celles qui ne le sont pas sont alors absorbées sous forme de chaleur ou exploitées par des organismes vivants, comme les végétaux pratiquant la photosynthèse.



La figure I.2 : Interaction du rayonnement solaire avec les constituants de l'atmosphère.

#### 3.1. Le spectre du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est la lumière qui provient du soleil sous forme d'onde électromagnétique dont 98% d'énergie est comprise entre  $\lambda = 0,25\mu\text{m}$  et  $\lambda = 4\mu\text{m}$ , le reste représente 1% au-dessus et 1% au au-dessous de cet intervalle

La répartition d'énergie en fonction de la longueur d'onde est :

- Pour  $0,25 \mu\text{m} < \lambda < 0,4\mu\text{m}$  : c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7 % de l'énergie totale émise par le soleil.
- Pour  $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,8\mu\text{m}$  : c'est le domaine du visible, il représente 47,5 % de l'énergie totale émise par le soleil

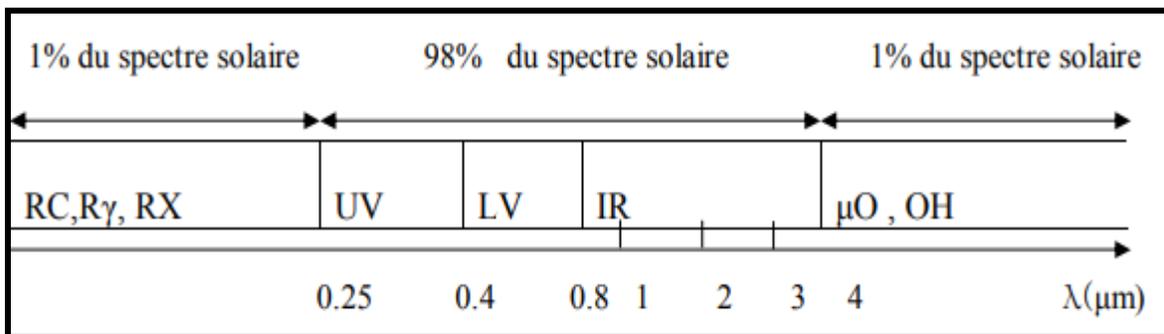
- Pour  $0,8 \mu\text{m} < \lambda < 4 \mu\text{m}$  : c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45,5 % de l'énergie totale émise par le soleil. Le rayonnement solaire est assimilable à celui d'un corps noir à la température  $t = 5800\text{K}$  dans l'intervalle du spectre  $[0,25 \mu\text{m} \rightarrow 4\mu\text{m}]$ .

L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie pour toutes les longueurs d'onde, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde donnée par la loi de WIEN :

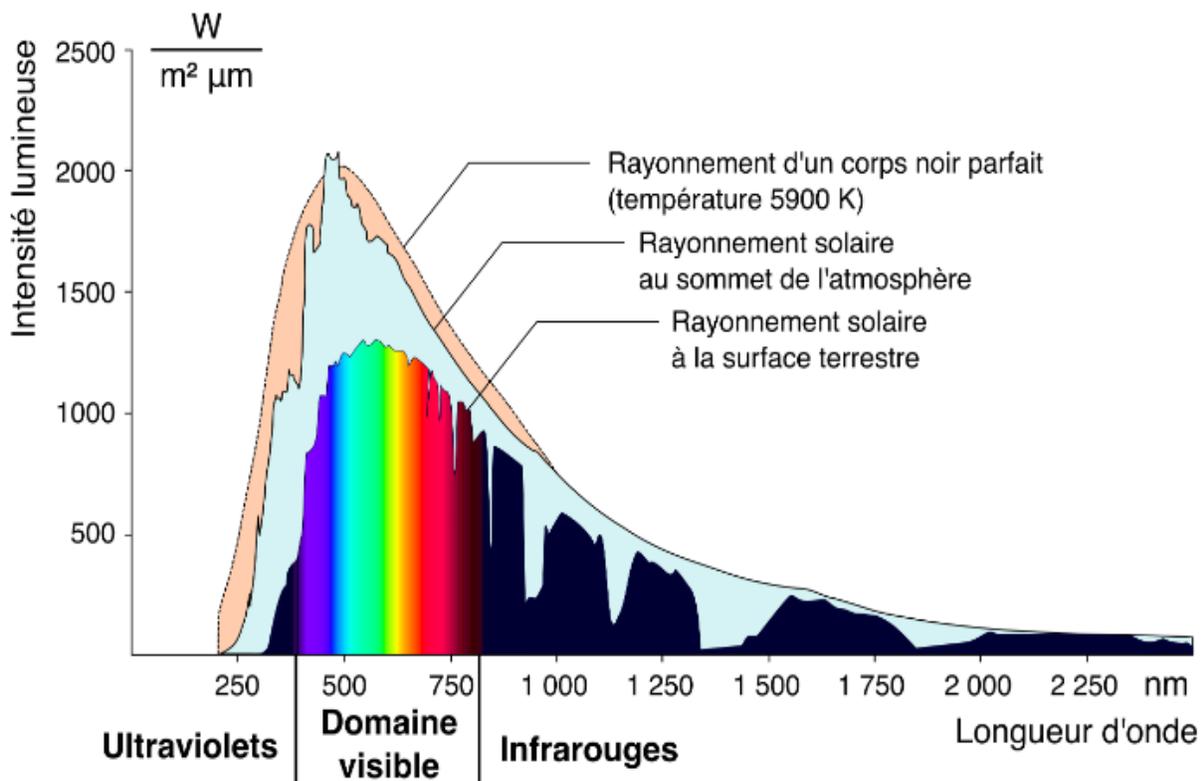
$$\lambda_m \cdot t = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

$$\lambda_m \approx 0,5 \mu\text{m}$$

$$\text{Pour : } t = 5800 \text{ K}$$



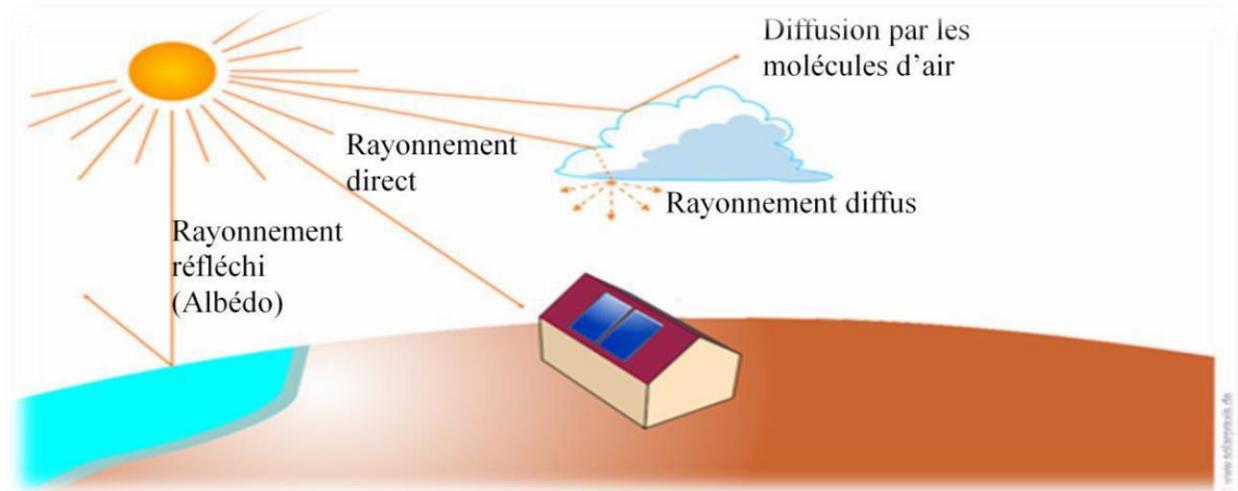
Le tableau I.1 : la répartition spectrale de l'atmosphère.



La figure I.3 : Spectre de la lumière reçue à la surface de la Terre.

### 3.2. Les différents types du rayonnement solaire :

Le spectre du rayonnement solaire à la surface de la Terre est constitué de différentes composantes. Le rayonnement direct provient directement du Soleil, tandis que le rayonnement diffus est diffusé par le ciel et le milieu extérieur. Un autre rayonnement encore est réfléchi par le milieu extérieur (la terre ou la mer) en fonction de l'albédo local. Le rayonnement terrestre total est appelé rayonnement global.



La figure I.4 : Types de rayonnement solaire reçus au sol.

#### 3.2.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol.

Le pyréliomètre est l'instrument qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement direct. Il doit être muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le soleil.



La figure I.5 : Appareil de mesure « un pyréliomètre ».

### 3.2.2. Rayonnement diffus :

Rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

### 3.2.3. Rayonnement solaire réfléchi :

Le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

### 3.2.4. Rayonnement global :

La somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point [2].



Un pyranomètre

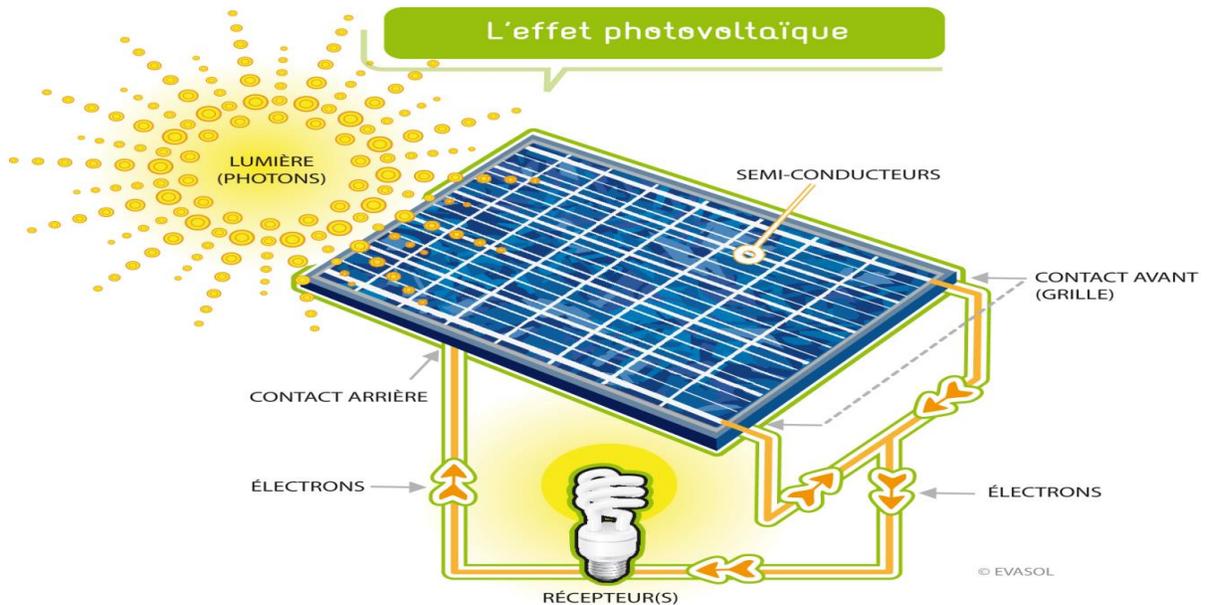


Un solarimètre

La figure I.6 : Appareils de mesure.

#### 4. L'effet photovoltaïque :

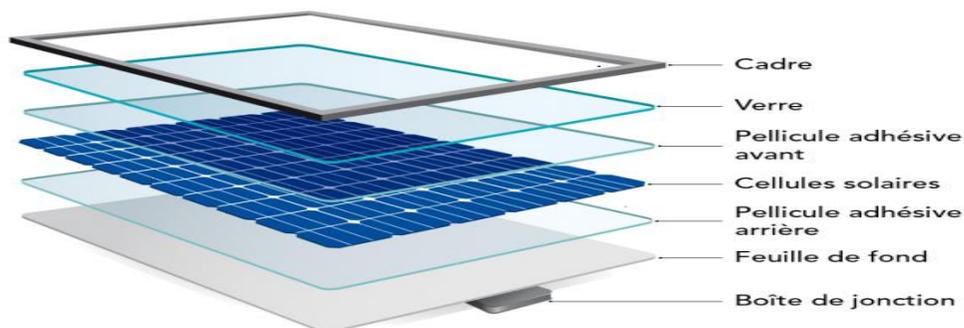
L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie [3].



La figure I.7: L'effet photovoltaïque.

#### 5. Les cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Le plus souvent, elle est constituée de semi-conducteurs fabriqués à base de silicium, l'un des éléments les plus abondants sur terre mais délicat à transformer. Récemment, des technologies reposant sur d'autres semi-conducteurs, comme le tellure de cadmium notamment, ont été développées [4].



La figure I.8: Une cellule photovoltaïque.

### 5.1. Brève histoire de la cellule photovoltaïque :

La première cellule photovoltaïque a été mise au point par un inventeur américain, Charles Fritts, en 1883. Son rendement était très faible et sa fabrication, qui utilisait notamment de l'or, très coûteuse. Toutefois, elle a trouvé une application concrète un an seulement après son invention avec la pose sur le toit d'un bâtiment new-York du premier panneau solaire de l'histoire produisant de l'électricité.

Peu d'inventions peuvent se vanter d'offrir une application concrète si rapidement. Pour autant, les faibles rendements des premières cellules photovoltaïques empêchèrent tout développement industriel. Ce n'est qu'avec les débuts de la conquête spatiale que les premiers panneaux solaires affichant un rendement acceptable seront utilisés pour alimenter en électricité des satellites.

Il faudra attendre plus d'un siècle après les travaux de Charles Fritts pour que l'énergie photovoltaïque s'impose comme l'une des sources d'énergie renouvelable les plus utilisées, grâce notamment, aux aides financières des États. Longtemps, les coûts de fabrication élevés des cellules photovoltaïques et leur relative fragilité les ont cantonnés à des marchés de niche.

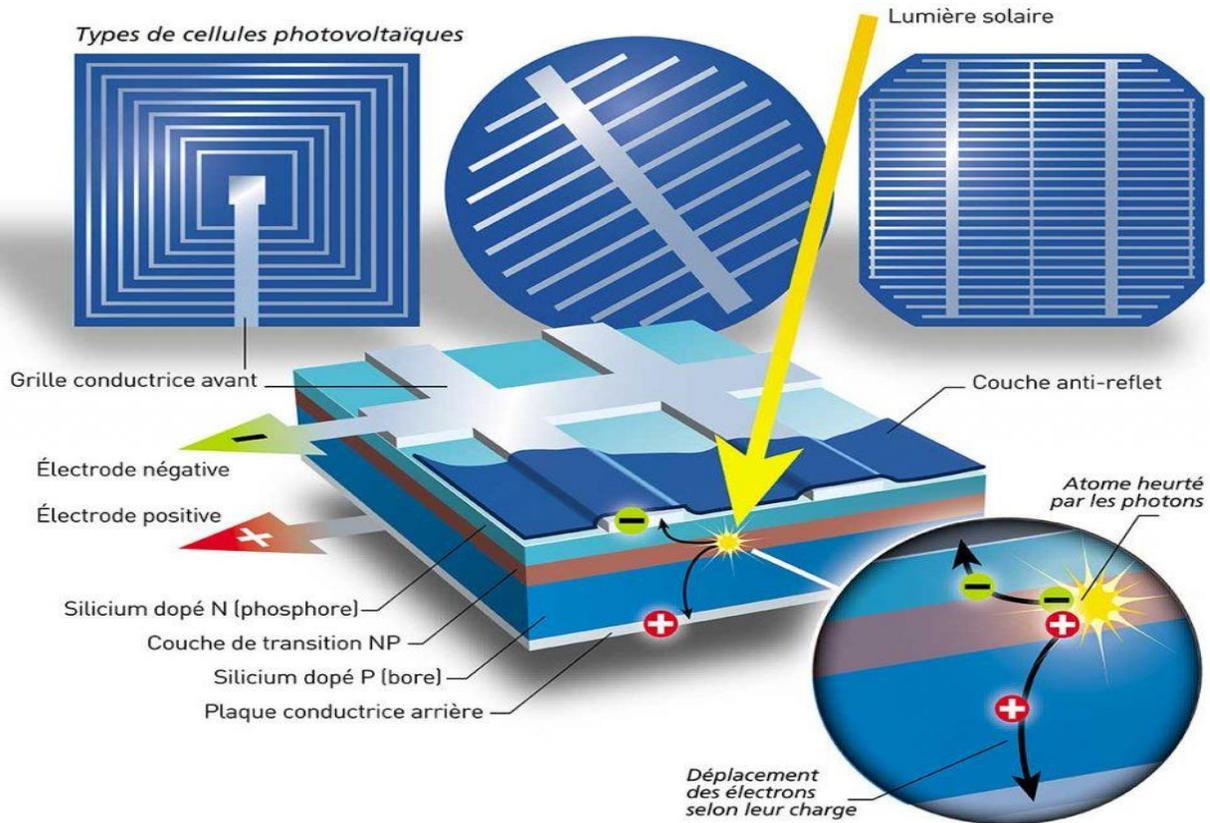
### 5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est relativement simple. Un semi-conducteur présentant une face négative et une face positive, du silicium par exemple, est exposé à la lumière. En percutant les atomes de silicium, les photons mettent en mouvement des électrons qui se déplacent dans des directions différentes selon leur charge. C'est ce déplacement d'électrons qui génère un courant électrique.

Pour que les électrons soient attirés d'un côté ou de l'autre du dispositif, la cellule photovoltaïque doit posséder une face négative et une face positive. Le silicium utilisé en surface est donc préalablement chargé, ou « dopé », négativement en lui adjoignant du phosphore. De même, le silicium utilisé au dos de la cellule photovoltaïque est chargé positivement avec du bore.

C'est cette différence de charge entre la face inférieure et la face supérieure qui entraîne le mouvement des électrons, comme la figure suivant :

En libérant des électrons à la surface du silicium qui sont ensuite attirés d'un côté ou de l'autre de la cellule photovoltaïque, l'énergie lumineuse est ainsi transformée en énergie électrique. Le mouvement des électrons crée un courant continu qui est ensuite transformé en courant alternatif grâce à un onduleur afin de pouvoir être utilisé ou bien stocké dans une batterie.



La figure I.9: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

### 5.3. Avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques :

Voici quelques avantages et inconvénients à prendre en compte [5] :

#### 5.3.1. Avantages :

Large variété de technologies pour s'adapter à tous les budgets et à toutes les situations géographiques.

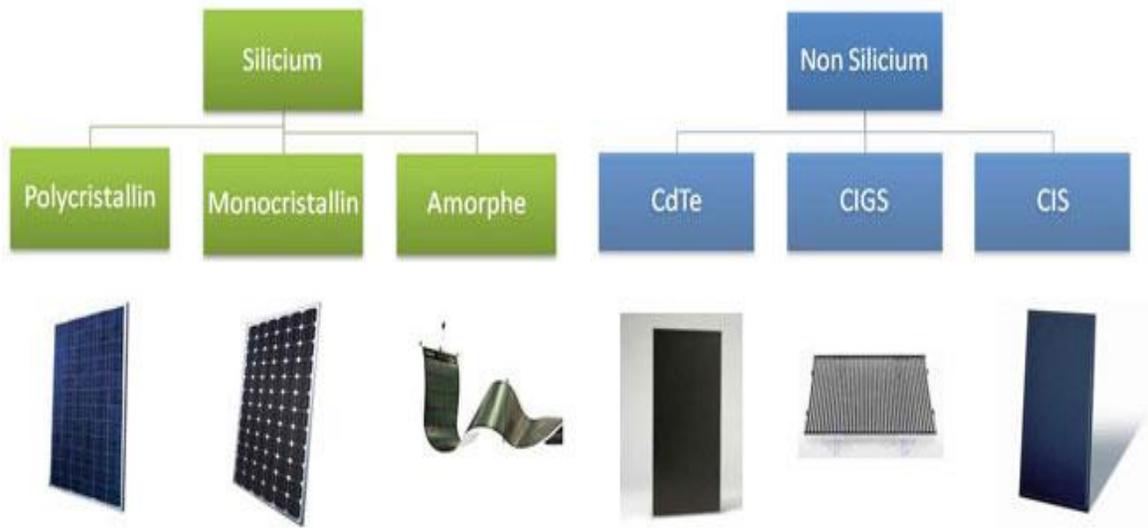
- ✓ Investissement vite rentabilisé (le coût de l'électricité ne cesse d'augmenter).
- ✓ Production de tout ou partie de sa consommation d'électricité.
- ✓ Revendre son électricité.
- ✓ Économie d'énergie et même possibilité de gagner de l'argent en revendant sa production d'électricité.
- ✓ Installation rapide.
- ✓ Peu d'entretien.

#### 5.3.2. Inconvénients :

- Ils ne peuvent équiper toutes les maisons, car ils nécessitent une certaine exposition pour fonctionner pleinement.
- Leur durée de vie est d'environ 20 ans, mais seulement d'une dizaine d'années pour l'onduleur.

#### 5.4. Les différents types de cellules photovoltaïques :

Il existe deux grandes familles des cellules photovoltaïques : les cellules en silicium et ceux n'en contenant pas [4] [6] :



La figure I.10: Les différents types de cellules photovoltaïques.

##### 5.4.1. Les cellules en silicium :

Les panneaux solaires en silicium sont les plus couramment utilisés. Il faut distinguer trois groupements polycristallins, monocristallins et amorphes.

##### 5.4.1.1. Les cellules photovoltaïques polycristallin :

C'est la technologie la plus répandue. Elle est notamment majoritairement utilisée pour la fabrication des panneaux solaires photovoltaïques des grandes centrales solaires ou des petites installations domestiques. Le silicium utilisé est constitué de multiples petits cristaux, ou cristallites ; reliés entre eux par des joints de grains ; d'aspect bleuté et assemblés sous forme de cellules carrées.

Les cellules photovoltaïques en silicium polycristallin offrent un rendement correct, de l'ordre de 14 à 18 %, pour un coût de fabrication acceptable. Toutefois, leur production d'électricité n'est optimale qu'avec une bonne exposition au soleil, en milieu de journée essentiellement. Elles demeurent à ce jour la solution offrant le meilleur rapport rendement/prix.

L'assemblage de différents cristaux confère au silicium polycristallin une couleur bleu marbré. La durée de vie d'une cellule photovoltaïque en silicium polycristallin peut atteindre plusieurs dizaines d'années mais ses performances baissent très significativement après 25 ans d'utilisation.

#### 5.4.1.2. Les cellules photovoltaïques monocristallin :

Contrairement aux cellules en silicium polycristallin, les cellules en silicium monocristallin sont d'un seul tenant. Lors de son refroidissement, le silicium forme un unique cristal de grande dimension qui est ensuite découpé en fine tranche pour obtenir des cellules photovoltaïques d'un bleu uniforme. Cette technique est sensiblement plus coûteuse que celle utilisée pour le silicium polycristallin.

Le photovoltaïque monocristallin offre en revanche un meilleur rendement que le polycristallin, jusqu'à 25 %, mais nécessite, lui aussi, une bonne exposition au rayon du soleil. Cette technologie sert à fabriquer les panneaux solaires haut de gamme, comme les panneaux aérovoltaiques qui utilisent l'énergie solaire pour produire à la fois de l'électricité et de la chaleur. De couleur gris-noir, les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin ont un aspect métallique homogène. Leur espérance de vie est de 40 ans environ, mais comme pour le silicium polycristallin, leurs performances ont tendance à baisser rapidement passé 25 ans d'utilisation.

#### 5.4.1.3. Les cellules photovoltaïques amorphe :

Ce sont les cellules photovoltaïques les moins chères à fabriquer. Elles équipent principalement les montres et les calculettes « solaires ». Le silicium de ces cellules bénéficie d'un traitement par dépôts sous vide de différents gaz. Ces cellules photovoltaïques en silicium amorphe peuvent générer de l'électricité même avec un éclairage faible ou diffus, y compris sous éclairage artificiel. De couleur noire, facilement intégrables sur de petits appareils électriques sur support souple ou rigide, elles ont comme inconvénient d'offrir un très faible rendement (5 à 7 %) et d'afficher des performances qui déclinent rapidement avant de se stabiliser à un niveau assez bas. Elles ne sont pas destinées à produire d'importantes quantités d'électricité, même avec une surface importante.

L'espérance de vie d'une cellule photovoltaïque en silicium amorphe peut dépasser en théorie plusieurs décennies mais son rendement baisse inexorablement année après année.



La figure I.11: Les différents types des panneaux en silicium.

### 5.4.2. Les cellules sans silicium :

Ces cellules photovoltaïques sont également désigner comme cellules « couche mince ». Différents composants sont utilisés pour leur fabrication : le Tellure de Cadmium (CdTe), le Cuivre / Indium / Sélénium (CIS), le Cuivre / Indium / Gallium / Sélénium (CIGS). Bien que leur rendement (entre 6% et 13%) soit moins élevé que les cellules cristallin, ils possèdent certains avantages :

- ✓ Prix inférieur.
- ✓ Faible sensibilité aux élévations de températures (contrairement aux panneaux cristallin dont le rendement diminue avec l'augmentation de la température). Ils peuvent donc être facilement intégrés en toiture.
- ✓ Meilleure production en lumière diffuse. Leur utilisation est plus appropriée dans les régions les moins ensoleillées.

Une polémique fait rage sur la possible toxicité de certains composants utilisés dans ces panneaux (comme le CdTe : Tellure de Cadmium).

### 5.5. Évolution technologique dans la production de cellules photovoltaïques :

Les chercheurs du monde entier travaillent sur des combinaisons entre ces différentes familles pour créer des cellules multi-jonctions. L'association de plusieurs types de cellules permet en effet de dépasser largement le plafond théorique du rendement (33,5 %), tout en maintenant des coûts faibles. Les études portent surtout sur des cellules doubles dites « tandem », associant du silicium et des couches minces, dont le rendement théorique est de 43 %. Les cellules multi-jonctions ont une limite théorique supérieure à 50 %.

Quand la recherche scientifique aura résolu les problèmes liés au rendement, au coût de fabrication, à l'intermittence et à la fragilité des cellules photovoltaïques, elle pourra offrir à ces dernières des débouchés toujours plus nombreux, en ayant recours, notamment, à des matériaux plus accessibles, moins toxiques, et à des procédés de fabrication économiquement rentables, comme l'impression trios dimensions. La question des coûts environnementaux et du recyclage des cellules solaires usagées demeure néanmoins une donnée incontournable pour faire du photovoltaïque une véritable source d'énergie renouvelable capable d'accélérer la transition énergétique sans effets collatéraux [4] [6].

### 5.6. Principe générale de fabrication des cellules photovoltaïque :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques. A partir de silice, que l'on trouve dans le sable ou le quartz, on produit du silicium pur à 98 %. Pour avoir un matériau assez pur pour être utilisé en photovoltaïque, on soumet le silicium à des réactions chimiques et étape de distillation pour obtenir un silicium pur à 99,999 %. On produit ensuite des barres de silicium, appelées « lingots » qui seront tranchés en plaques très fines (150 à 300  $\mu\text{m}$  pour la filière traditionnelle, 1  $\mu\text{m}$  en moyenne pour les couches minces) appelées « wafers ». Les wafers sont ensuite reliés les uns aux autres par des tiges

métalliques et encapsulés pour être protégés des intempéries. Les wafers sont ainsi transformés en cellules photovoltaïques qui pourront être assemblées en panneau de la taille désirée [7].



La figure I.12: La chaîne de fabrication des cellules photovoltaïques.

## 6. Les avantages et les inconvénients de la production d'électricité à partir de l'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque représente ainsi la seule alternative existante à la production d'électricité à partir de la force mécanique, puisque toutes les autres techniques sans exception, renouvelables ou non, font appel à des génératrices tournantes (alternateurs ou dynamos) qui peuvent être actionnées de diverses manières: vapeur, vent, force de l'eau, courants marins [8] [9].

### 6.1. Les avantages :

Outre cette spécificité qui le distingue très nettement des autres techniques, le photovoltaïque possède de nombreuses qualités qui présentent autant d'avantages:

- ✓ L'énergie solaire est une énergie renouvelable :

L'origine de cette prime énergie est le soleil. Bien que le soleil ait une durée de vie limitée, à l'échelle humaine, il est considéré comme une source d'énergie inépuisable.

- ✓ Aucune nuisance ni impact sur l'environnement immédiat :

Basé sur un phénomène physique imperceptible, son fonctionnement n'occasionne strictement aucune nuisance ou impact sur l'environnement immédiat : ni mouvement, ni bruit, ni odeur, ni émission quelconque.

- ✓ Une très grande fiabilité.
- ✓ Faible coût de maintenance : La plupart des systèmes d'énergie solaire actuels ne nécessitent pas beaucoup d'entretien. Les panneaux solaires résidentiels ne nécessitent généralement un nettoyage que quelques fois par an.
- ✓ Une garantie de rendement à long terme :

Les caractéristiques physiques des matériaux photovoltaïques ne s'altèrent pas dans le temps, et la baisse de rendement des panneaux, que l'on peut éventuellement observer et qui est due essentiellement aux imperfections mineures de fabrication, est très lente et très limitée, ce qui permet aux fabricants d'apporter une garantie de rendement pouvant aller jusqu'à 30 ans.

- ✓ Un bilan économique prévisible et sans surprise :

Hormis le coût d'investissement, l'accès à la ressource énergétique primaire est totalement libre et gratuit, puisqu'il s'agit de la lumière du soleil, et comme les besoins d'entretien et de maintenance sont très réduits (ils concernent essentiellement l'électronique de régulation et de connexion), le bilan économique est prévisible avec un haut degré de certitude.

- ✓ Une technologie universelle :

L'alternance jour/nuit étant un phénomène universel, même si sa répartition temporelle peut être très différente selon les lieux, le photovoltaïque peut fonctionner en tout point du globe terrestre avec un écart de potentiel annuel allant de 1 à 4 en entre le moins bon et le meilleur site.

- ✓ Une grande flexibilité et diversité d'applications :

La quantité d'énergie récupérable en un lieu donné est directement proportionnelle à la surface exposée à la lumière du soleil, ce qui confère au photovoltaïque un caractère intrinsèquement modulaire et flexible : la surface des capteurs va de quelques cm<sup>2</sup> pour l'alimentation d'une calculatrice à plusieurs centaines de milliers de m<sup>2</sup> pour les centrales au sol et cette taille peut être modifiée à tout moment par simple ajout (ou retrait) de panneaux, sans même interrompre le fonctionnement de l'installation existante.

## 6.2. Les inconvénients :

Voici quelques inconvénients à prendre en compte:

- L'efficacité énergétique est médiocre par rapport à d'autres sources d'énergie. Le rapport entre la quantité d'énergie reçue et la quantité d'énergie électrique obtenue est faible. Surtout par rapport à l'énergie nucléaire.
- Le coût économique par rapport aux autres options. Surtout dans les grandes centrales solaires, l'investissement initial est élevé. Les installations solaires ont une durée estimée de 20 ans.
- La performance est fonction de la météo. Par exemple, dans les zones à ciel généralement nuageux, les performances sont très faibles.

➤ Limitations en journée. Les heures de clarté sont plus courtes dans certaines zones. Une autre limitation est l'inclinaison du Soleil par rapport à la surface du panneau solaire. Dans certaines régions, l'inclinaison du rayonnement solaire n'est pas adéquate.

➤ Limites de stockage de l'énergie générée :

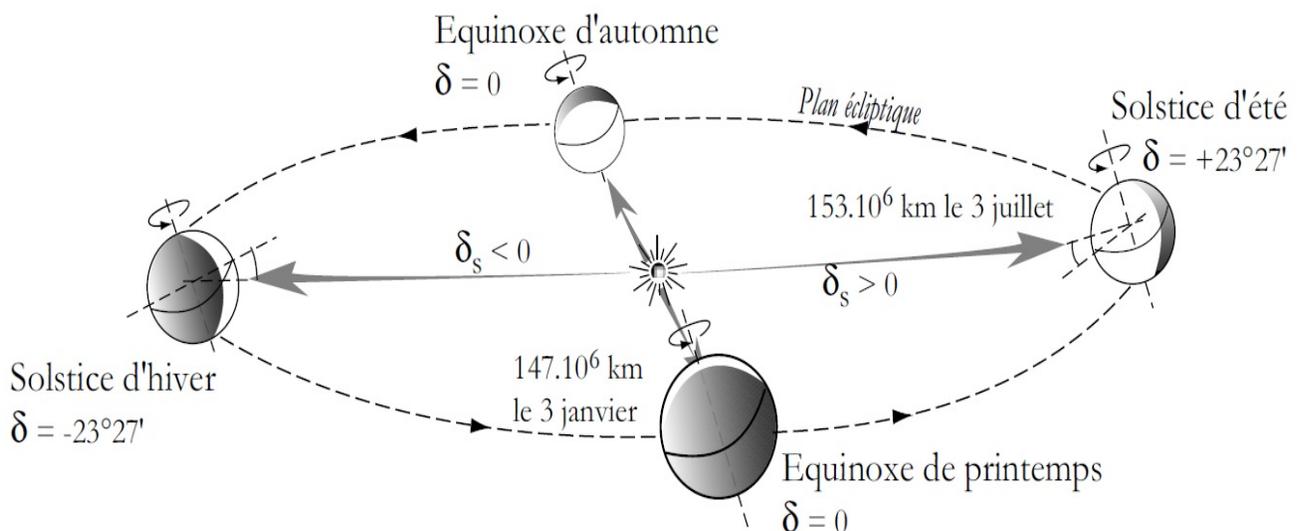
Parce que les heures où vous pouvez obtenir de l'électricité ne coïncident pas toujours avec les heures nécessaires, il est sage de stocker l'énergie. Pour cela, dans une installation photovoltaïque il existe des batteries solaires et des réservoirs d'eau chaude, mais le rendement est encore très faible.

➤ Impact environnemental. Bien que l'énergie solaire soit considérée comme une énergie propre, elle contient également des éléments nocifs pour l'environnement. Impacts liés à l'utilisation des sols, à la consommation d'eau, aux matériaux utilisés, etc.

## 7. La position géométrique du soleil :

La planète terre tourne autour d'un axe définissant les pôles nord et sud du globe en 24 heures. Ce phénomène génère ainsi une alternance de jours (l'hémisphère du site considéré est alors éclairé) et de nuit (l'hémisphère est à l'ombre).

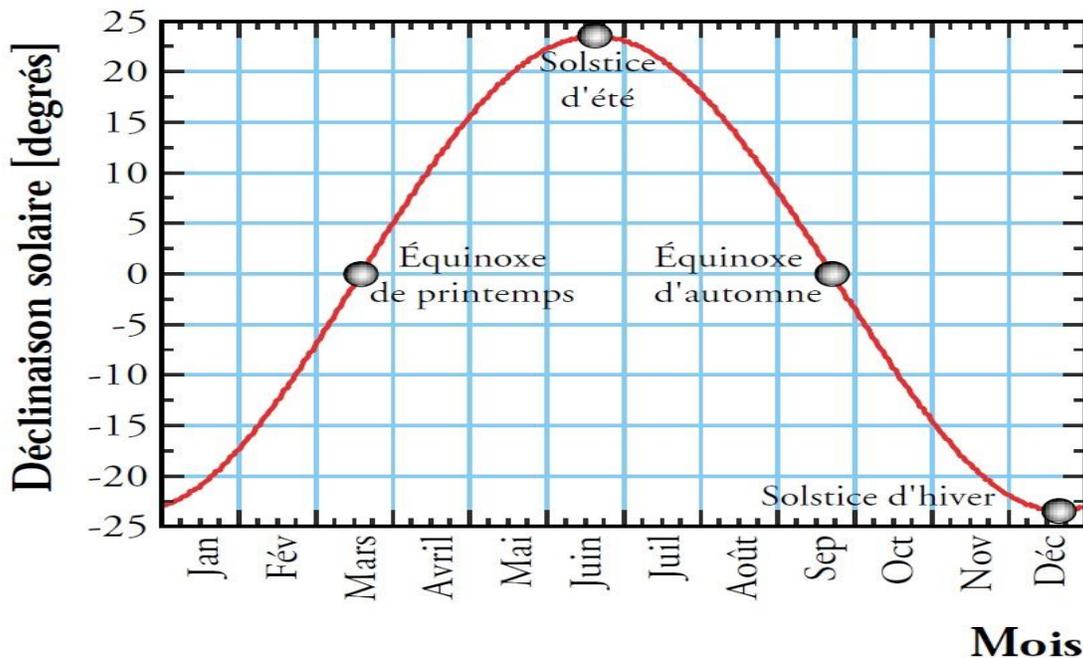
La trajectoire de la terre autour du soleil constitue une ellipse de très faible excentricité (c'est-à-dire proche d'un cercle), réalisée en environ 365 jours. L'inclinaison de l'axe des pôles terrestres par rapport au plan de l'écliptique est constante et égale à  $23^{\circ}27'$  ; elle est à l'origine du phénomène de saison que nous connaissons. La distance terre-soleil varie entre  $153.106$  km (le 3 juillet) et  $147.106$  km (le 3 janvier) ; sa valeur moyenne vaut  $150.106$  km, ce qui donne un rayon apparent du soleil depuis la terre égal à  $0,27^{\circ}$  [10] [11].



**La figure I.13:** La position du soleil en un site varie suivant la rotation de la terre sur elle-même et autour du soleil.

Notons que la distance moyenne entre la terre et le soleil définit l'unité astronomique [UA] : 1 UA = 149 597 890 +/- 500 km. Les distances minimale et maximale entre les deux astres valent donc respectivement 0,983 et 1,017 UA.

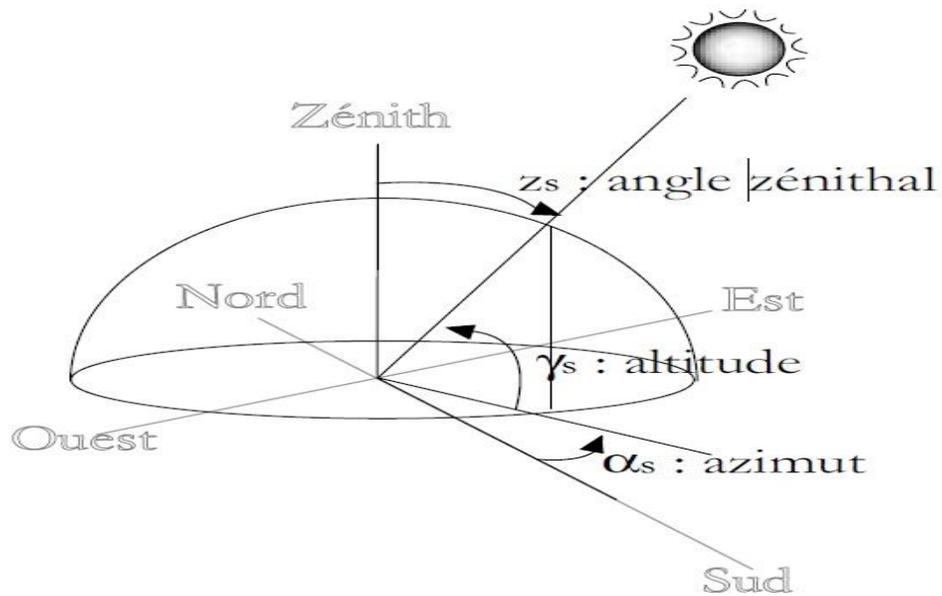
La déclinaison solaire  $\delta_s$  représente l'angle entre les rayons du soleil et le plan équatorial. Dans l'hémisphère nord de notre planète, elle est positive au printemps et en été, négative le reste du temps ; elle varie entre  $+23^\circ 27'$  au solstice d'été (le 21 juin) et  $-23^\circ 27'$  au solstice d'hiver (le 21 décembre). Elle est donnée par l'expression mathématique suivante [BRICHAMBAUT, 1982] :  $\delta_s = 23,45^\circ \cdot \sin [0,986 \cdot (J + 284)^\circ]$  [Égalité I-1], J est le jour Julien, variant de 1 à 365.



**La figure I.14:** Graphique représentant l'angle entre le soleil et le plan équatorial de la terre responsable des saisons.

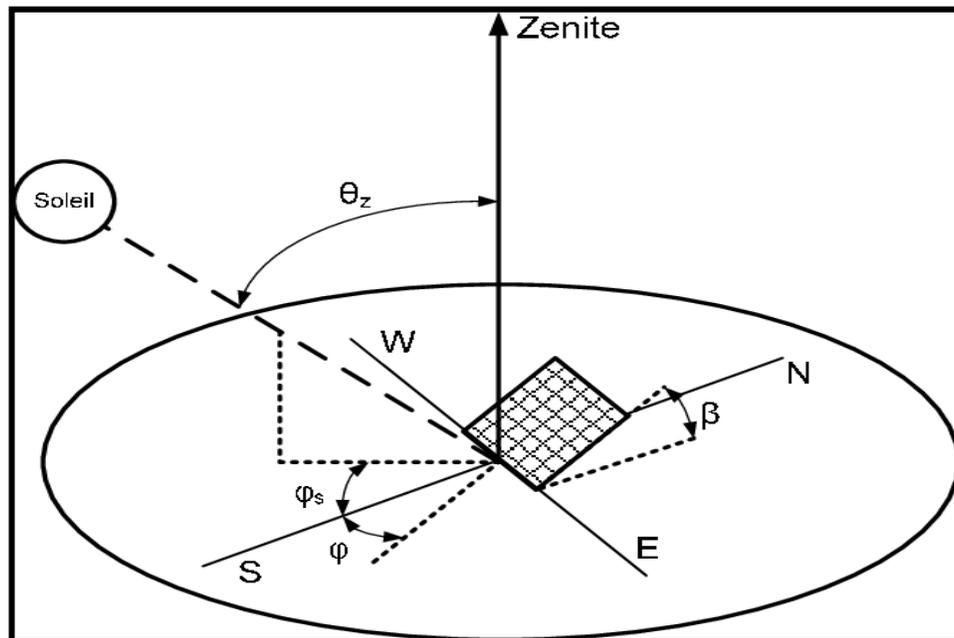
Ainsi, la combinaison des mouvements de la terre sur elle-même et autour du soleil induit un mouvement apparent du soleil en tout point terrestre. Des données spatiales relatives à ces deux astres, il est possible de déterminer d'une part la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du site (sa latitude et sa longitude) et de l'instant (jour de l'année et heure), et la durée du jour d'autre part. La position du soleil est exprimée par deux angles, à savoir :

- ✓ sa hauteur angulaire au-dessus de l'horizon communément appelée l'altitude du soleil, ou encore l'angle entre le zénith du site et la direction du soleil appelé angle zénithal.
- ✓ l'azimut, qui est son angle horizontal par rapport au sud (pour l'hémisphère nord).



La figure I.15: La position du soleil est repérée en tout site par des définitions angulaires traditionnelles.

La position du soleil est exprimée en fonction de l'angle azimut solaire ( $a$ ), angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle est mesuré positivement vers l'Ouest, et l'angle de l'altitude solaire ( $h$ ), angle que fait la direction du soleil avec sa projection, le complément de  $h$  ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelé angle zénithal ( $\theta_z$ ).



La figure I.16: La position du soleil par rapport le panneau.

Les expressions pour estimer les deux grandeurs sont données ci-après:

$$\sin(h) = \sin(\lambda) \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cos(\delta) \cos(\omega)$$

Aussi:  $h = 90 - (\lambda - \delta)$  où avec  $\lambda$  est la latitude locale.

$$\sin(a) = \frac{\sin(\delta) \sin(\omega)}{\sin(h)}$$

La formule complète pour estimer l'angle azimutal, a, est:

$$a = \begin{cases} \sin^{-1} \left( \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \right) & \text{si } \cos(h) > \frac{\tan(\delta)}{\tan(L \text{ tloc})} \\ 180^\circ - \sin^{-1} \left( \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \right) & \text{si } \cos(h) < \frac{\tan(\delta)}{\tan(L \text{ tloc})} \end{cases}$$

### 7.1. Mouvement quotidien est-ouest du soleil :

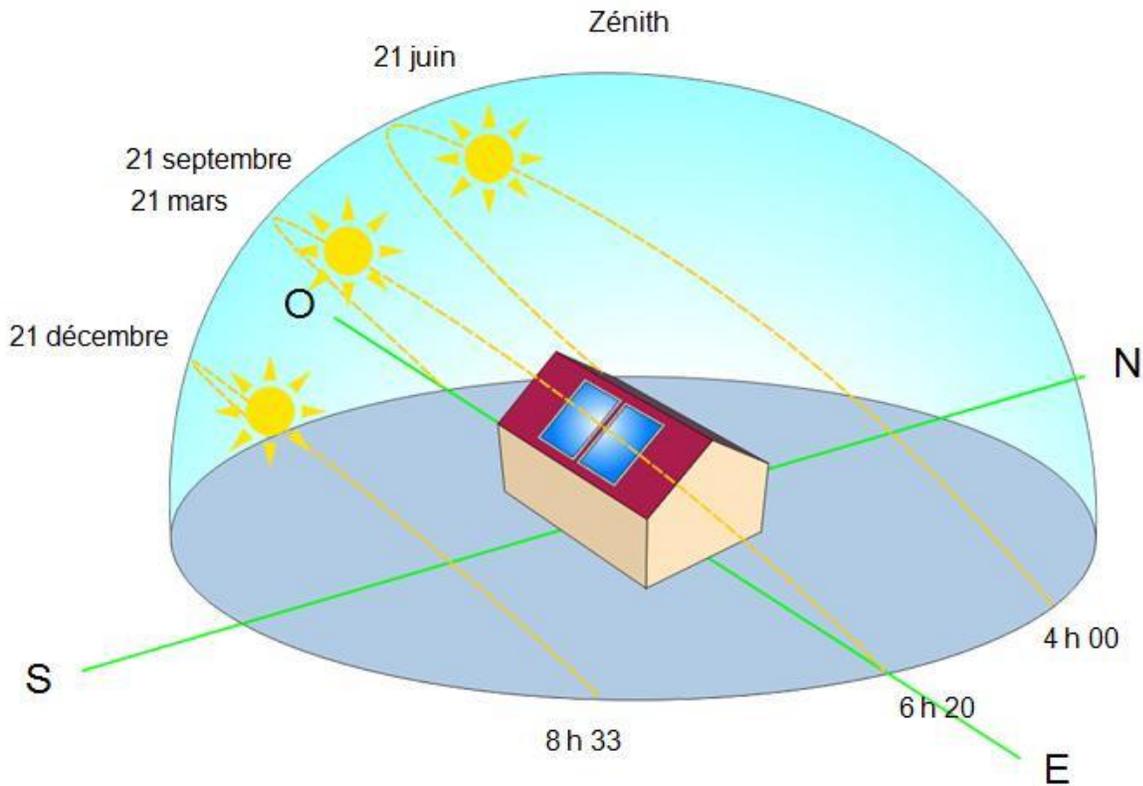
Le Soleil parcourt 360 degrés d'est en ouest par jour, mais du point de vue de tout emplacement fixe, la partie visible est de 180 degrés pendant une période moyenne d'une demi-journée (plus au printemps et en été; moins, en automne et en hiver). Les effets d'horizon locaux le réduisent quelque peu, ce qui rend le mouvement effectif d'environ 150 degrés. Un panneau solaire dans une orientation fixe entre les extrêmes de l'aube et du coucher du soleil verra un mouvement de 75 degrés de chaque côté, et ainsi, selon le tableau ci-dessus, perdra plus de 75% de l'énergie le matin et le soir. La rotation des panneaux vers l'est et l'ouest peut aider à récupérer ces pertes. Un tracker qui tente uniquement de compenser le mouvement est-ouest du Soleil est connu sous le nom de tracker mono-axe [12] [13].

### 7.2. Mouvement saisonnier nord-sud du soleil :

En raison de l'inclinaison de l'axe de la Terre, le Soleil se déplace également de 46 degrés au nord et au sud pendant un an. Le même ensemble de panneaux placé au milieu entre les deux extrêmes locaux verra ainsi le Soleil se déplacer de 23 degrés de chaque côté. Ainsi, selon le tableau ci-dessus, un tracker mono-axe aligné de manière optimale (voir tracker aligné polaire ci-dessus) ne perdra que 8,3% aux extrêmes saisonniers d'été et d'hiver, soit environ 5% en moyenne sur un an. À l'inverse, un tracker mono-axe aligné verticalement ou horizontalement perdra beaucoup plus en raison de ces variations saisonnières de la trajectoire du Soleil. Par exemple, un tracker vertical sur un site à 60 ° de latitude perdra jusqu'à 40% de l'énergie disponible en été, tandis qu'un tracker horizontal situé à 25 ° de latitude perdra jusqu'à 33% en hiver.

Un tracker qui prend en compte à la fois les mouvements quotidiens et saisonniers est connu sous le nom de tracker à deux axes. D'une manière générale, les pertes dues aux changements d'angle saisonniers sont compliquées par des changements dans la longueur de la journée, augmentant la collecte en été dans les latitudes nord ou sud. Cela biaise la collecte vers l'été, donc si les panneaux sont inclinés plus près des angles d'été moyens, les pertes annuelles totales sont réduites par rapport à un système incliné à l'angle d'équinoxe printemps / automne (qui est le même que la latitude du site).

Il y a un débat considérable au sein de l'industrie pour savoir si la petite différence dans la collecte annuelle entre les trackers à un et deux axes rend la complexité supplémentaire d'un tracker à deux axes valable. Un examen récent des statistiques de production réelles du sud de l'Ontario a indiqué que la différence était d'environ 4% au total, ce qui était bien inférieur aux coûts supplémentaires des systèmes à deux axes. Cela se compare défavorablement à l'amélioration de 24 à 32% entre un tracker à matrice fixe et à un axe [12] [13].



La figure I.17: Trajectoire soleil.

**8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons étudié quelques généralités et bases de la conversion de l'énergie solaire, Dans un premier temps, nous avons appris à connaître le rayonnement solaire et sa division en quatre types est rayonnement global ,rayonnement diffus et le rayonnement direct et rayonnement réfléchi et Le rayonnement direct et c'est le plus important car il arrive directement à la surface sans négliger les autres.

Après cela, nous avons pris une vue générale de l'effet photovoltaïque de son principe de fonctionnement en entrant dans la technologie des cellules photovoltaïques et ses nombreux types qui dépendent dans leur fabrication du silicium et sans utiliser le silicium, et nous les mentionnons : polycristallins, monocristallins et amorphes elles sont fabriqué en silicium et l'autre par exemple : les cellules « couche mince» sont utilisés pour leur fabrication : le Tellure de Cadmium et plusieurs produits et Les avantages et les inconvénients de chaque famille, le rendement de la production d'énergie électrique, les conditions de son utilisation, les facteurs auxiliaires dans le choix du type approprié aux besoins, le rôle de la technologie dans la production et le développement d'autres types plus efficaces et la qualité au coût le plus bas possible et le plus rentable, et la tâche de la recherche scientifique est de trouver des solutions, de réduire les matières toxiques dans la fabrication des cellules photovoltaïques et de les recycler pour favoriser leur utilisation et leur demande

Faire progresser la filière photovoltaïque et s'appuyer sur elle à l'avenir comme une véritable source d'énergie renouvelable et propre ,De plus, malgré les avantages de l'énergie photovoltaïque, elle présente des inconvénients sur lesquels il faut travailler pour la réduire et améliorer ce qui peut être amélioré en termes de durabilité, de rentabilité et d'efficacité pour répondre aux besoins humains.

À la fin, nous avons appris la position géométrique du soleil, le mouvement quotidien est-ouest et saisonnier nord-sud du soleil, et les coordonnées les plus importantes qui sont l'altitude et l'azimut du soleil pour déterminer la position du soleil.

Sur cette base, nous avons proposé notre projet, qui permet d'augmenter l'efficacité des panneaux photovoltaïques et aide à diriger vers le rayonnement perpendiculaire du soleil pour éviter les problèmes d'orientation et de changement et ses positions vers le soleil tout au long de la journée de temps en temps, qui nous allons étudier et réaliser dans les prochains chapitres.

*Chapitre II :*  
*Les systèmes de*  
*Poursuites Solaire*

## 1. Introduction:

La puissance électrique produite par un système solaire photovoltaïque dépend de l'intensité du flux lumineux selon la position du soleil qui varie le long de la journée.

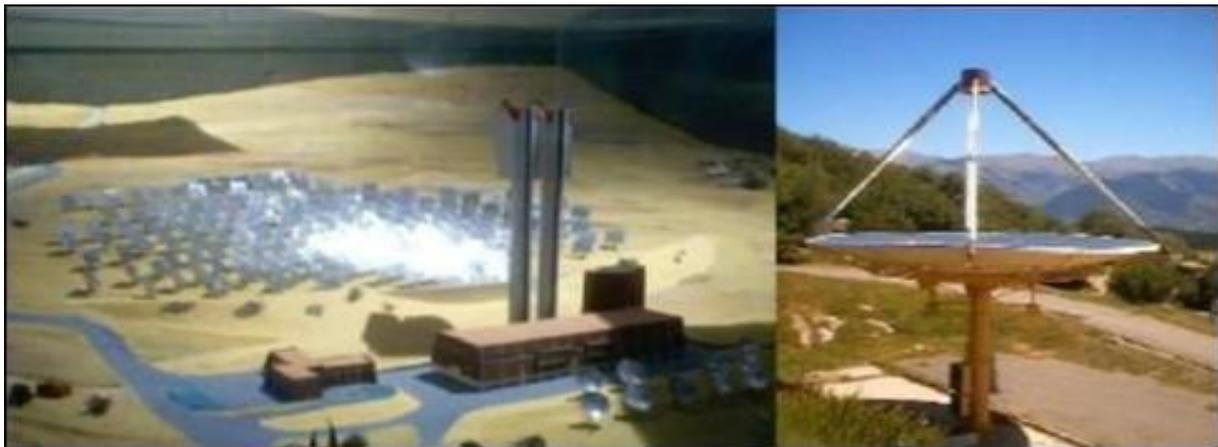
Afin de collecter le maximum d'énergie, on utilise des dispositifs dits systèmes de poursuite solaire '*sun tracking systems*'. Le système de poursuite solaire doit être ajusté de sorte qu'il soit toujours visé avec précision face au soleil. Les systèmes de poursuite solaire à un seul axe sont moins coûteux et leur commande est facile à mettre en œuvre, par contre leur efficacité est inférieure à celle des systèmes de poursuite solaire à deux axes.

Ces derniers nécessitent une commande appropriée des deux mouvements découplés et sont utilisés dans les centrales solaires à concentration pour le guidage des héliostats, ainsi que pour les installations photovoltaïques pour augmenter leur efficacité qui peut atteindre des valeurs de 30 % par rapport aux systèmes fixes [14].

## 2. Historique de l'utilisation d'une poursuite solaire :

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

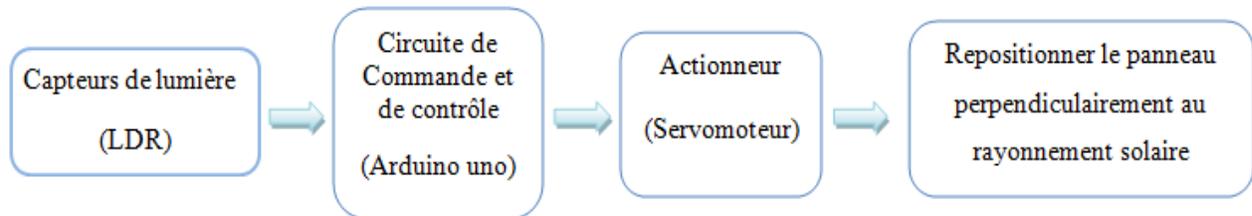
Un champ d'héliostats repère le mouvement du soleil en convergeant les rayons lumineux vers un même point, concentrant ainsi la lumière incidente en employant des miroirs de réflexion, tout au long de la journée. Ce principe se rencontre dans diverses installations utilisant l'énergie solaire, notamment les centrales solaires à concentration appelées champs d'héliostats. Un exemple en France est la centrale solaire Thémis qui, après avoir fonctionné de 1983 à 1986, fait l'objet d'une nouvelle expérimentation depuis 2007 [2].



La figure II.1 : Centrale solaire Thémis France avec l'héliostat.

### 3. Le principe de fonctionnement d'une poursuite solaire :

Un dispositif intelligent de poursuite solaire qui existe s'appuie sur le même principe de suiveur solaire, illustré dans la figure (II.2). La technique utilisée pour cette étude repose sur la différence d'éclairement incident sur les capteurs de lumière photorésistance ou LDR (Light-Dépendent-Résistor) séparés par des parois opaques et placés sur le panneau PV. Le circuit de contrôle et de commande assure la fonction de comparaison des signaux émis par les capteurs en calculant leurs différences, puis renvoie des impulsions au moteur pour repositionner le panneau perpendiculairement aux rayons solaire.



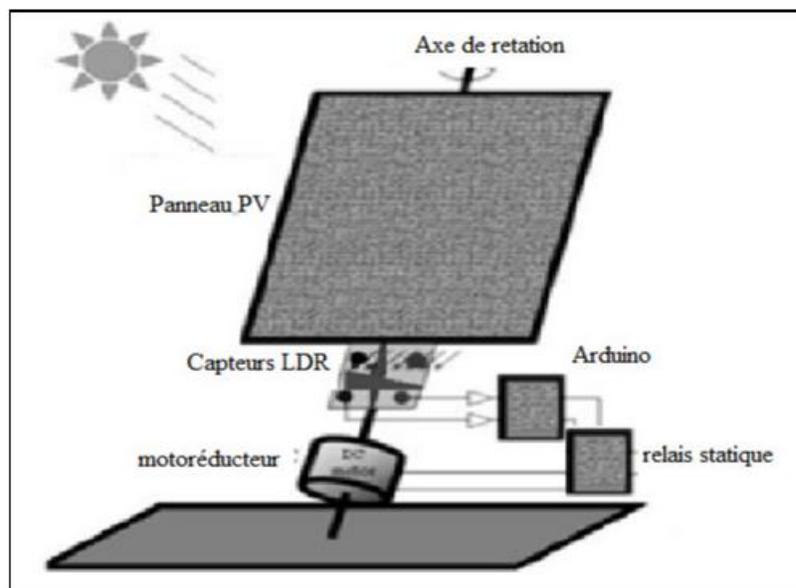
La figure II.2 : Le principe de fonctionnement d'une poursuite solaire.

### 4. Les méthodes de poursuite solaire :

La technologie des systèmes de poursuite actuels sont différentes d'un concepteur à un autre. Il existe deux grandes méthodes pour assurer le suivi [15]:

#### 4.1. La méthode de photorésistances (LDR) :

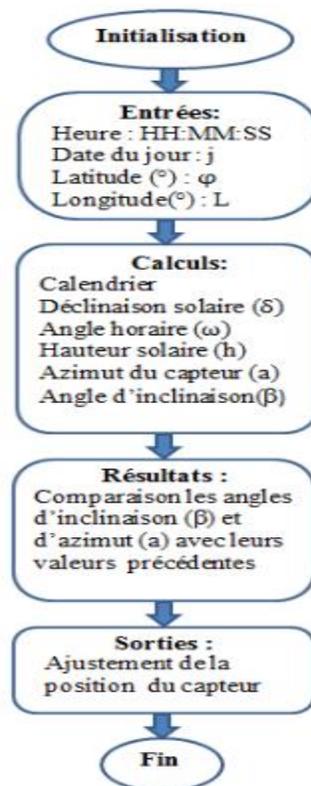
Cette méthode est basée sur des capteurs de lumière ou photorésistances (LDR) pour déterminer la position du soleil à tout moment, permettant ainsi un suivi instantané et notamment une orientation optimale du panneau figure (II-3). Dans ce type de techniques, la poursuite s'effectue indépendamment de la zone dans laquelle le système sera situé.



La figure II.3 : Une poursuite solaire a base de photorésistances (LDR).

#### 4.2. La méthode astronomique :

Cette méthode repose sur le calcul de la position du soleil en se basant sur les équations géométriques et astronomiques prédéfinies. Le système nécessite comme entrées, lors de l'installation, la latitude et la longitude du site, la date du jour et l'heure.



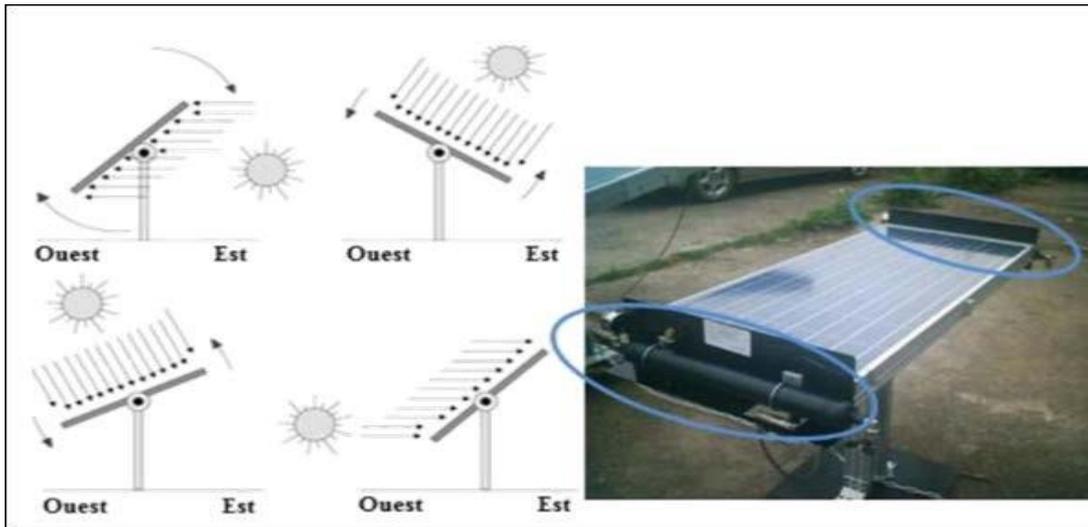
La figure II.4 : l'organigramme de La méthode astronomique.

#### 5. Les différents types de poursuite solaires :

On distingue principalement deux grandes familles de poursuites solaires: les passifs et les actifs qui comportent les suiveurs mono-axe et double axe [16] [17] [18] :

##### 5.1. Un suiveur solaire passif :

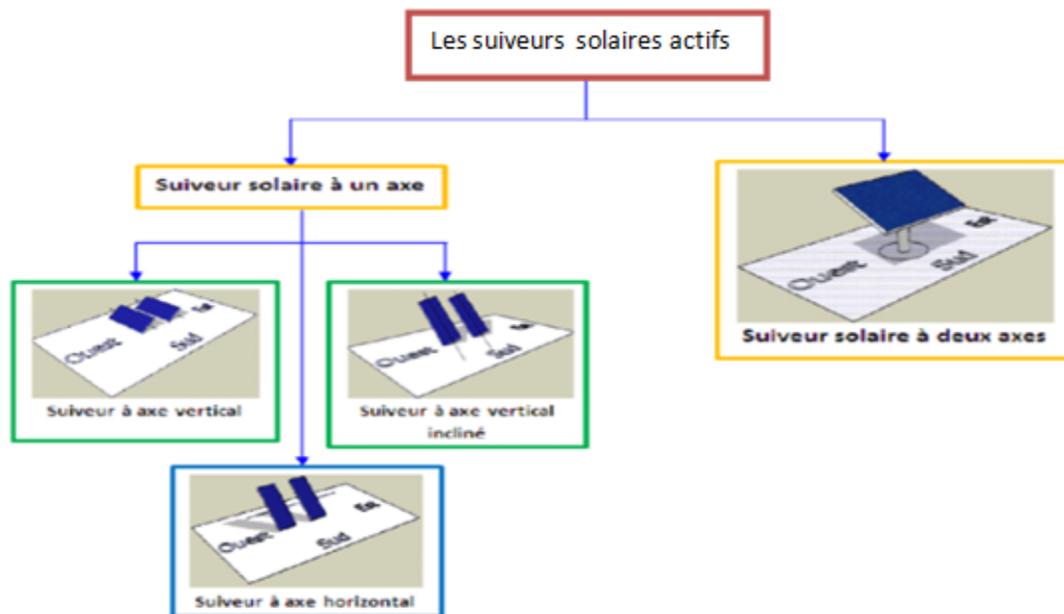
Un suiveur solaire passif est constitué dans son architecteur de deux tubes en cuivre monté sur les cotés est et ouest du capteur. Le tube de matière cuivre la figure(II.5) est remplie de fluide chimique capable de se vaporiser à basse température. En effet, lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente, la température d'un coté augmente et le composé dans le tube en cuivre se vaporise. La partie gazeuse du composé occupe un plus grand volume interne, et sa partie liquide est décalée vers le coté ombragé. Cette opération de transfert de masse ajuste l'équilibre du capteur en le faisant tourne vers la source des rayons solaires. Ce type de poursuite ne consomme aucune énergie pour le positionnement du panneau.



La figure II.5 : Un suiveur solaire passif.

**5.2. Un suiveur solaire actif :**

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



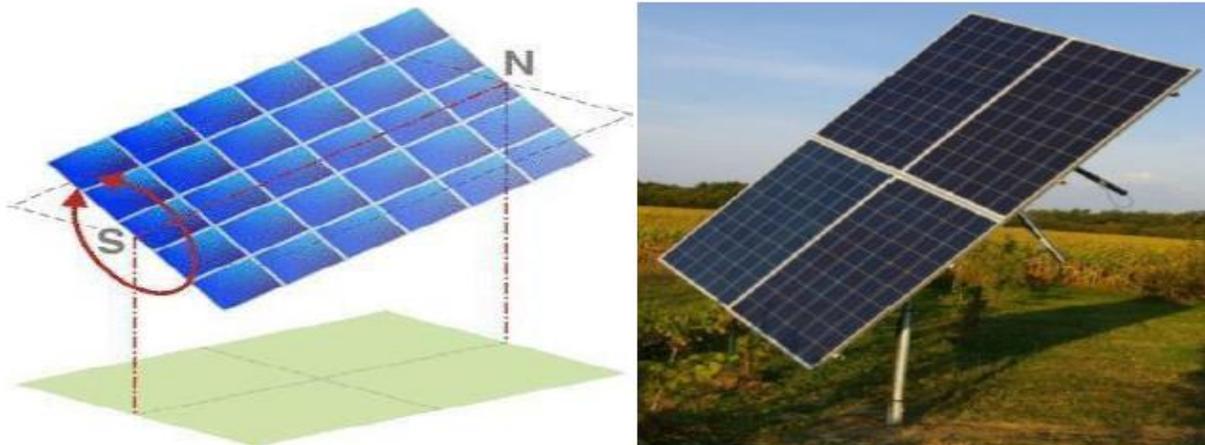
La figure II.6 : Les suiveurs solaires actifs.

### 5.2.1. Suiveur solaire mono-axe:

Comme son nom l'indique, le suiveur solaire tourne autour d'un axe simple. Le trajet suivi par cet axe est souvent en azimut, c'est-à-dire d'Est en Ouest au fil de la journée. 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. Il est placé selon la latitude du lieu où est disposé le capteur. 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 .

#### 5.2.1.1. Suiveur à axe horizontal :

Ce type de suiveur n'apporte que très peu de gain par rapport à un système fixe. Il est plus intéressant d'utiliser des suiveurs à un axe vertical. En revanche, sa conception est la plus simple de l'ensemble des suiveurs et peut ne pas entraîner une diminution trop significative du GCR si ce type de suiveur est équipé d'un organe de régulation appelé (back tracking), qui empêche d'incliner davantage les modules dès que les rangs se font mutuellement de l'ombre. Sans back tracking, en conservant un GCR de 45%, il faudrait un suiveur permettant une plage d'inclinaison allant de 10 à 30° pour obtenir la meilleure solution. Cependant, le gain resterait assez faible : de l'ordre de 2,2% (ce gain ne compense pas le surcoût).



La figure II.7 : Suiveur à axe horizontal.

#### 5.2.1.2. Suiveur 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.



**La figure II.8 :** *Suiveur à axe vertical incliné.*

### 5.2.1.3. Suiveur à axe vertical simple :

Pour ce deuxième mode, la surface tourne autour d'un axe simple qui est toujours parallèle à la surface. Si la surface tournant autour d'un axe simple qui est toujours parallèle à la surface mais n'est pas vertical ou horizontal, l'angle extérieur d'azimut et la pente de la surface change avec le temps.



**La figure II.9 :** *Suiveur à axe vertical simple.*

### 5.2.2. Suiveur solaire double axe:

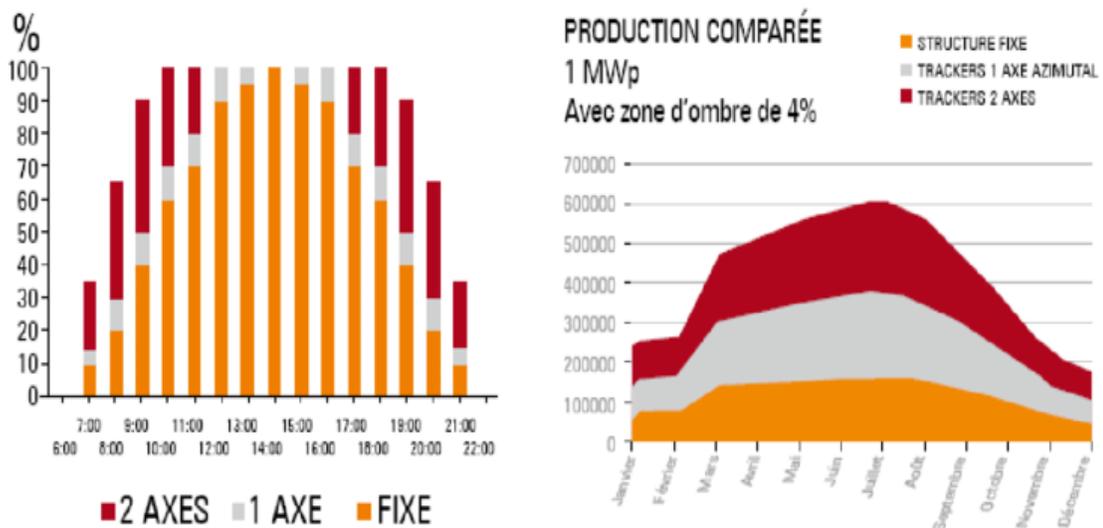
Contrairement au précédent, ce suiveur solaire possède deux axes ce qui lui permet de suivre les mouvements en azimut et en inclinaison au cours de la journée. Ainsi, le capteur reste constamment orienté vers le soleil. Ce type de suiveur est très imposant et fournit de meilleures performances par rapport au suiveur mono-axe.



La figure II.10 : Suiveur solaire double axe.

**6. Importance de la poursuite solaire:**

Le soleil se déplace au cours de la journée et suivant les saisons. Le panneau solaire, en revanche, se trouve généralement en position fixe, ce qui entraîne des pertes énergétiques précieuses. Une installation fixe, orientée, dans le cas idéal, vers le sud délivre une puissance qui croît très lentement tôt le matin et diminue fortement l'après-midi.



La figure II.11: Diagramme de comparaison entre la production électrique des systèmes solaire fixe et la poursuite solaire 1 axe et 2 axe.

Le rôle du mécanisme de poursuite est d'adapter la position du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur pour capter le maximum de rayon incident [19].

## 7. La comparaison des suiveurs mono-axe et suiveurs double axes :

Le suiveur mono-axe est considéré comme le moyen le plus simple pour l'amélioration des performances d'une installation solaire commerciale en utilisant des dispositifs relativement simples.

Les systèmes à double axes contiennent plus de pièces mobiles que les suiveurs mono-axes. Leur conception est plus compliquée avec l'intégration des moteurs supplémentaires et de capteurs pour la poursuite du soleil. Le risque de défaillances et de dysfonctionnement est alors plus important [20].

Suiveur mono-axe	Suiveur double-axes
Suit le soleil d'est en ouest avec un seul point de pivotement	Suit le soleil s'est en ouest et du nord au sud en utilisant deux points de pivotements
Utilise un modèle prévisible basé sur le temps d'une année pour suivre le soleil	Utilise un « œil » du capteur pour suivre visuellement le soleil
Augmente le rendement solaire jusqu'à 34%	Augmente le rendement jusqu'à 37%
Conception simple et efficace	Conception plus complexe (plus de moteurs, de capteurs et plus d'entretien) mais plus précise.
Moindre cout par rapport au double axe	Cout plus élevé à cause de pièces supplémentaires et du temps d'installation.
Peu de pannes et de disfonctionnement	Pannes et disfonctionnement plus nombreux.

**Tableau II.1 :** Comparaison des suiveurs mono-axes et double axes.

## 8. Les avantages et les inconvénients des suiveurs solaires :

### 8.1 Les inconvénients :

Le suiveur solaire présent les inconvénients suivant :

- Le cout d'investissement initial (surtout pour le suiveur à deux axes) est élevé.
- La maintenance des suiveurs, car les systèmes mécaniques atteignent rarement une durée de vie de 20ans.
- Pour les raisons de sécurité, les panneaux solaires doivent être parallèles au sol lors de vent forts.

### 8.2. Les avantages :

Le suiveur solaire présent les avantages suivant :

- Les systèmes de suivi solaire sont utilisé pour orienté les capteurs continuellement vers le soleil et peuvent aider à minimiser l'investissement en augmentant le rendement des capteurs.
- La surface du parc solaire est réduite tout en grand le même potentiel.
- Exploitation optimal du rayonnement solaire même en présence des nuages.
- Gain intéressant, notamment aux heures de la journée les moins ensoleillées.
- Simplicité de mise en œuvre [21].

### 9. Les moyens de contrôle de l'augmentation d'énergie par suiveur :

Le gain d'un suiveur est différent à chaque installation, Il existe plusieurs moyens pour Contrôler le niveau de la production d'électricité pour un suiveur solaire, on distingue plusieurs facteurs [22] :

- La latitude du site d'installation.
- L'ensoleillement et la climatologie du site.
- La course angulaire de suivi solaire.
- La fréquence de positionnement.
- La densité de puissance installée et le facteur d'ombre induit.
- Les gains (non comptabilisés) de repli par temps de neige qui peuvent être très importants.

### 10. Nettoyage et entretien des panneaux solaires :

Sous les conditions météorologiques, les saletés et la poussière qui s'accumulent sur les panneaux solaires peuvent influencer sur leurs performances. Diverses études de fabricants ont démontré que leur rendement pouvait même réduit jusqu'à 15% par an, à cause de ces débris qui s'y encrassent. Un bon entretien peut s'optimise donc leur fonctionnement et leur production d'énergie électrique. Et il n'y pas que la productivité qui est en jeu, mais aussi la durée de vie de panneau solaire, qui pourrait écourter considérablement [22]. (la figure II.8). En outre le système qu'on étudier permet un refroidissement et un nettoyage pour une production maximal.



**La figure II.12 :** *Différence entre panneau encrassé et panneau nettoyé.*

**11. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs sujets, en particulier le système de poursuite solaire parmi les plus importants :

Les premières applications des suiveurs solaires et le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat, le fonctionnement d'un système de poursuite solaire et la technique utilisée pour cette étude repose sur la différence d'éclairement incident sur les capteurs de lumière photorésistance ou LDR.

Aussi que les méthodes pour assurer le système de poursuite solaire, il y a deux méthodes photorésistance ou LDR et la méthode astronomique, ainsi que les différents types de poursuite solaire, il existe deux familles ce sont des suiveurs solaires passifs à base d'un fluide chimique capable de se vaporiser à basse température, et des suiveurs solaires actifs représentés par : les suiveurs mono-axes disposent de plusieurs modes ce sont le suiveur à axe vertical simple et à axe vertical incliné et le suiveur à axe horizontal et le suiveur double axe, Nous l'avons réalisé en tant que projet de fin d'études.

Nous avons expliqué l'importance d'un système de poursuite solaire et les avantages et les inconvénients des suiveurs solaires et une comparaison entre les suiveurs mono-axe et les suiveurs double axes et les moyens de contrôle de l'augmentation d'énergie par suiveur et le rôle nettoyage et entretien des panneaux solaires.

*Chapitre III :*  
*Etude et description des*  
*Différents composants*  
*Electroniques utilisés*

**1. Introduction :**

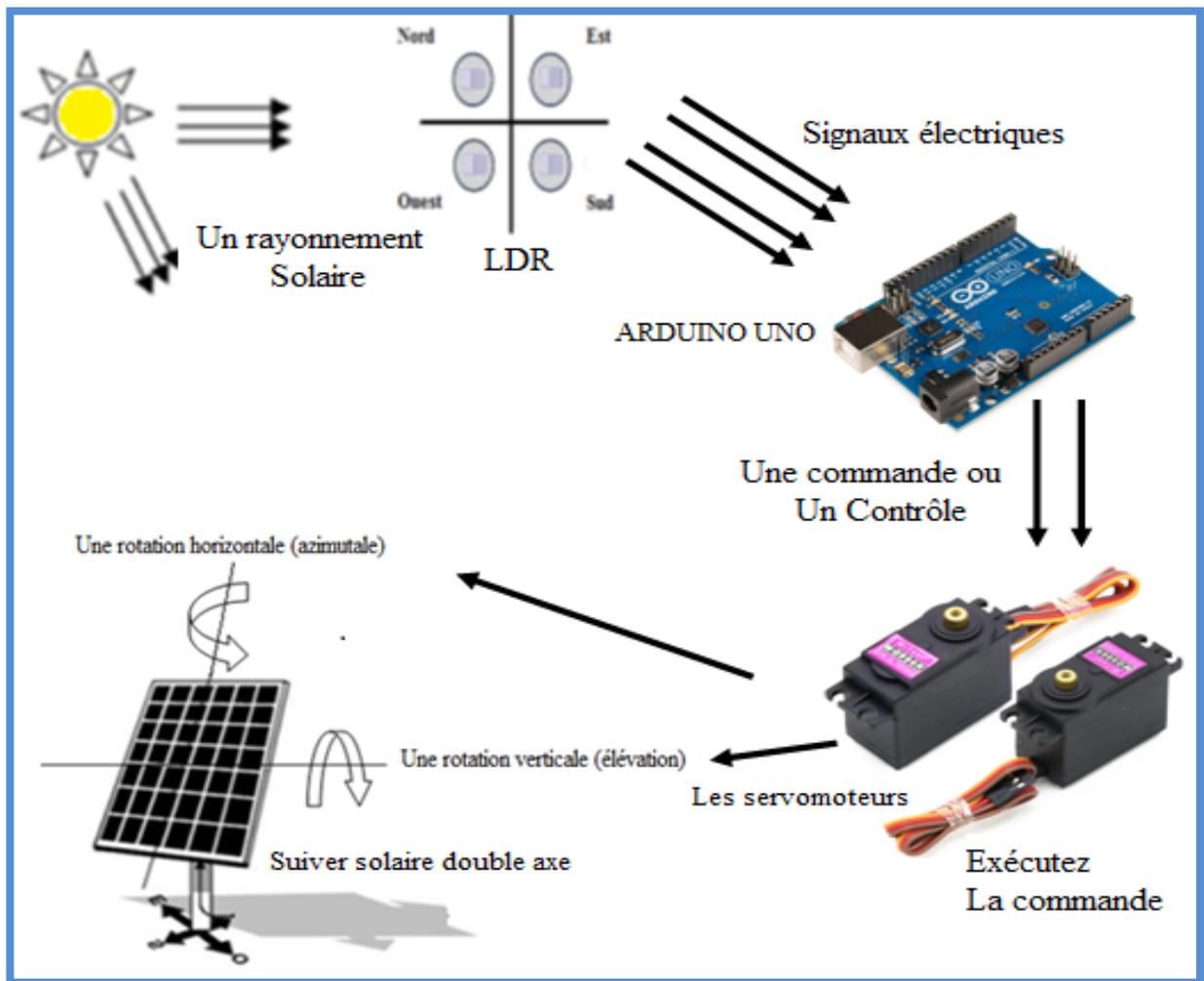
Dans ce chapitre, nous allons présenter un schéma synoptique qui résume le fonctionnement de notre dispositif intelligent de poursuite solaire et ses éléments principale, et une étude et une description des différents composants électroniques utilisés dans ce projet, Il ya plusieurs composants qui sont les suivants :

Les capteurs de lumière photorésistance ou LDR et la carte de commande « ARDUINO UNO », les servomoteurs et les outils de connexion.

## 2. Schéma synoptique du notre dispositif intelligent de poursuite solaire:

Le schéma synoptique général de notre dispositif intelligent de poursuite solaire est présenté par la figure (III.1) que nous proposons pour améliorer le rendement du panneau photovoltaïque.

Ce système est basé sur la comparaison des tensions délivrer par des capteurs de lumière photorésistance ou LDR et d'envoyer ces tensions ver la carte ARDUINO. Elles vont être converti dans cette dernière en valeur numérique puis on fait la comparaison et gère la commande des deux servomoteurs à fin de rétablir la position d'équilibre entre les capteurs pour avoir le rayonnement perpendiculaire du soleil.



La figure III.1 : Le schéma synoptique général de notre dispositif intelligent de poursuite solaire.

### 3. Etudier et décrire les composants électroniques de notre projet :

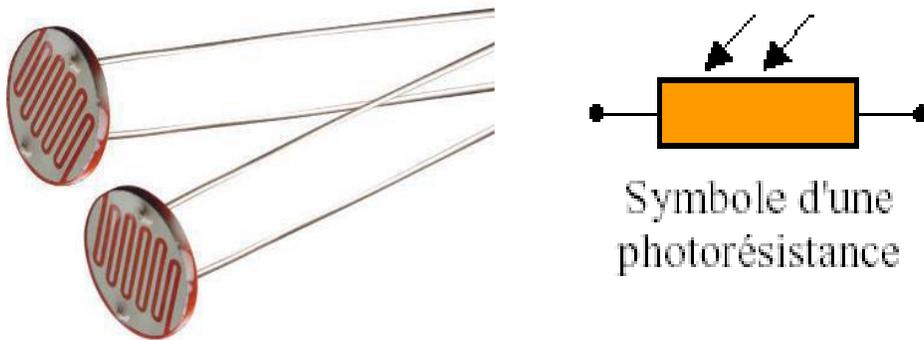
Il y a plusieurs composantes dans ce projet, qui sont les suivantes :

#### 3.1. Les capteurs de lumière photorésistance ou LDR :

##### 3.1.1. Définition :

Une photo résistance LDR (Light Dépendent Résistor ou résistance dépendant de la lumière) est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle il est exposé. Les matériaux utilisés pour la construction sont généralement du Sulfure ou du Séléniure de Cadmium qui se comporte comme des semi-conducteurs. La principale utilisation de la photorésistance est la mesure de l'intensité lumineuse (Appareil photo, de comptage, système d'alarme ...).

Elle est fortement concurrencée par la photodiode. Dans notre projet on a choisi d'utiliser la LDR grâce à son temps de réponse qui est beaucoup plus court [23].



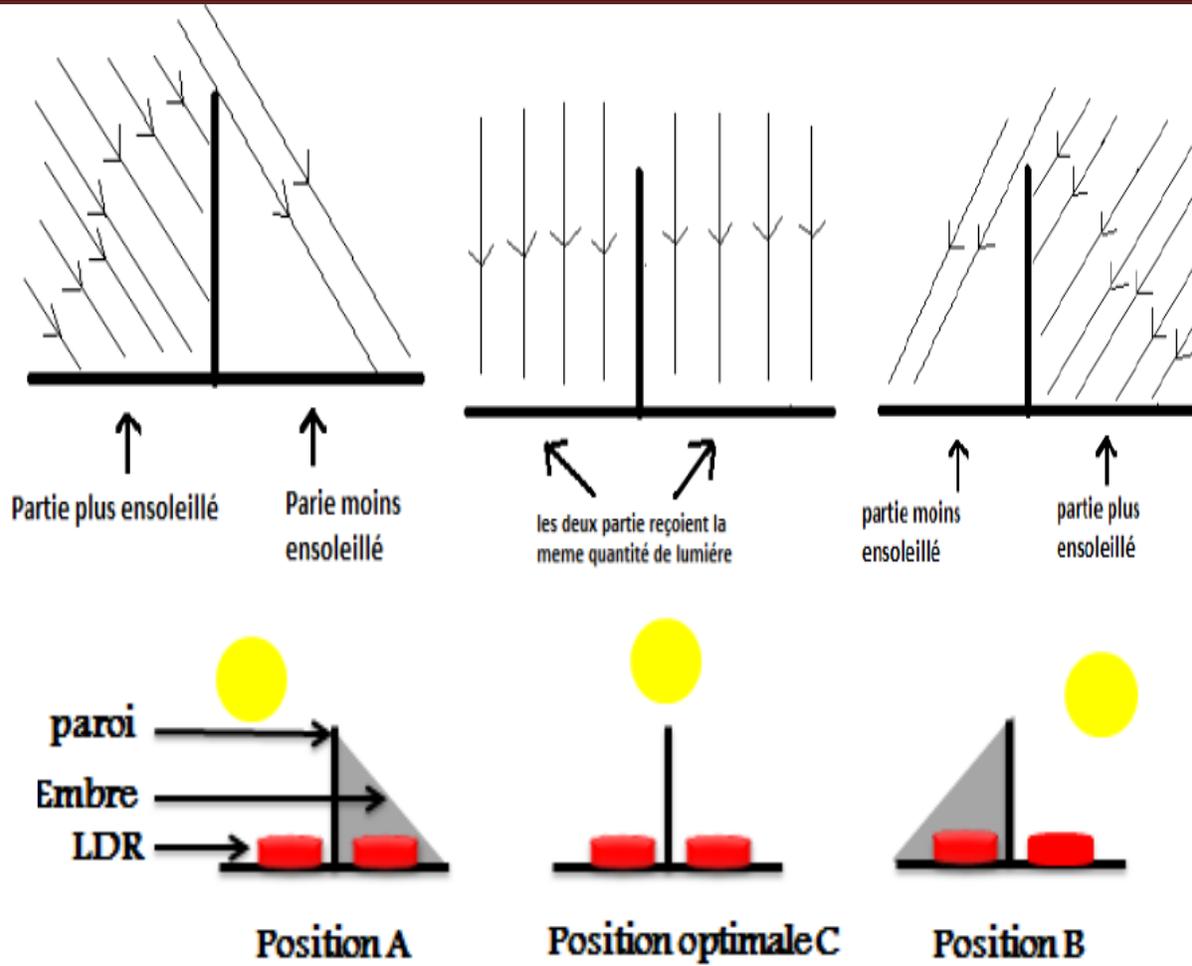
**La figure III.2 :** Les capteurs de lumière photorésistance ou LDR et le symbole électrique.

##### 3.1.2. Principe de fonctionnement:

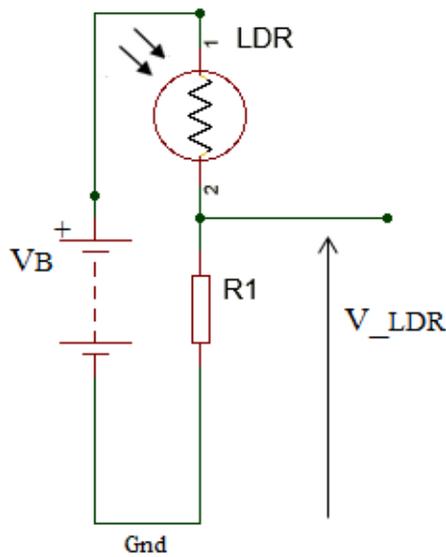
Un cristal à semi-conducteur à basse température contient peu d'électrons libres. La conductivité du cristal est très faible, proche de celle d'un isolant. Lorsque la température du cristal augmente. De plus en plus d'électrons qui étaient immobiles dans les liaisons covalentes s'échappent et peuvent participer à la conduction.

A température ambiante si le même cristal semi-conducteur est soumis à une radiation lumineuse, l'énergie apportée par les photons peut suffire à libérer certains électrons utilisés dans les liaisons covalentes entre atomes du cristal.

Plus le flux lumineux sera intense, plus le nombre d'électrons libres pour assurer la conduction sera grand, ainsi la résistance de la LDR est inversement proportionnelle à la lumière reçue. La sensibilité dépend de la fréquence de la radiation lumineuse. Pour convertir cette variation de la lumière en une tension on utilise le circuit diviseur de tension [23].



La figure III.3 : Les différents positions de l'isolant de lumière avec LDR. .



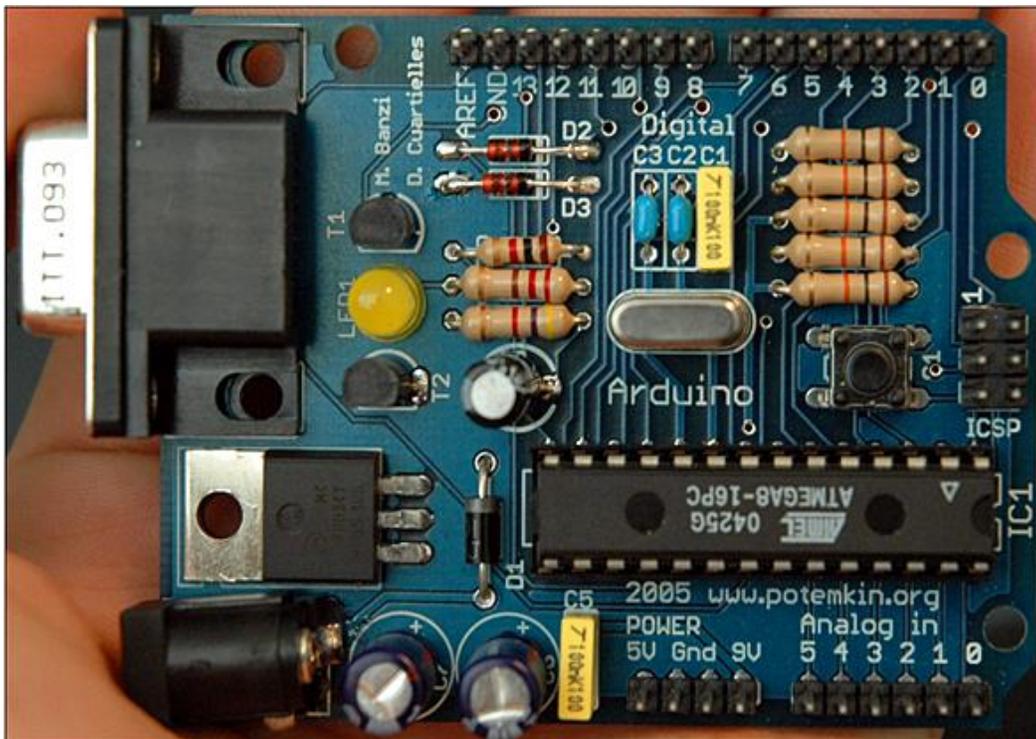
La figure III.4 : Circuit équivalent du capteur LDR utilisé.

### 3.2. La carte de commande ARDUINO UNO :

#### 3.2.1. Historique :

L'ARDUINO est à l'origine un projet d'étudiants de l'école de Design d'Interaction d'Ivrea en Italie. Au début des années 2000, les outils de conception de projets dans le domaine du design d'interaction étaient onéreux, proches d'une centaine d'euros. Ces outils étaient pour la plupart conçus pour le domaine de l'ingénierie et de la robotique. Maîtriser et utiliser ces composants demandait beaucoup de temps et d'apprentissage et ralentissait fortement le processus de création pour ces jeunes étudiants.

Il leur vient alors à l'idée de créer une plateforme plus abordable et plus simple à utiliser, reposant sur l'environnement de développement et de traitement mis au point en 2001 par des étudiants du MIT. C'est donc en 2003 que, pour un projet de fin d'études, fut conçue la carte de câblage, ancêtre de L'ARDUINO. Visant à rendre la plateforme toujours moins chère et plus accessible, une équipe d'étudiants et de professeurs finirent par concevoir la toute première ARDUINO en 2005. Entièrement open source, L'ARDUINO présentait l'avantage d'être multiplateforme et d'être en perpétuelle optimisation par la communauté d'utilisateurs [24].



La figure III.5 : Premier modèle de la carte ARDUINO.

### 3.2.2. Présentation général de l'ARDUINO:

Le système ARDUINO est une carte électronique basée autour d'un microcontrôleur et de composants minimum pour réaliser des fonctions plus ou moins évoluées à bas coût. Elle possède une interface USB pour la programmer. C'est une plateforme open-source qui est basée sur une simple carte à microcontrôleur (de la famille AVR), et un logiciel, véritable environnement de développement intégré, pour écrire, compiler et transférer le programme vers la carte à microcontrôleur. ARDUINO peut être utilisé pour développer des applications matérielles industrielles légères ou des objets interactifs (création artistiques par exemple), et peut recevoir en entrées une très grande variété de capteurs. ARDUINO peut aussi contrôler une grande variété d'actionneurs (lumières, moteurs ou toutes autres sorties matériels). Les projets ARDUINO peuvent être autonomes, ou communiquer avec des logiciels sur un ordinateur (Flash, Processing ou MaxMSP). Les cartes électroniques peuvent être fabriquées manuellement ou bien être achetées pré assemblées ; le logiciel de développement open-source est téléchargeable gratuitement [25].

### 3.2.3. Les principes de sélection de carte ARDUINO:

Les paramètres à prendre en compte pour vous aider à choisir sont [25]:

- ✓ **Le prix**, par ce que ça ne sert à rien de payer plus cher ce qu'on n'a pas besoin !
- ✓ **La dimension**, par ce que si c'est plus petit c'est plus facile à faire rentrer au chausse pied !
- ✓ **Le nombre d'entrée et des sorties**, par ce que si on a besoins de 50 entrées sorties il vaut mieux prendre celle qui en a suffisamment !
- ✓ **Le poids**, par ce que si la réduction du poids est la priorité numéro 1 mieux vaut prendre la plus légère !
- ✓ **La taille mémoire**, par ce que si on a un programme très lourd mieux vaut qu'il y ait suffisamment de place dans la carte !
- ✓ **Les connecteurs disponibles**, par ce qu'avoir les bons connecteurs et des connecteurs supplémentaires c'est toujours plus pratique !
- ✓ **Le besoin de souder les connecteurs**, par ce que si tu n'as pas accès à un fer à souder ce n'est pas pratique !

Il existe de nombreux choix de cartes ARDUINO, par exemple :

- La Nano.
- L'UNO
- La Mega 2560.



**La figure III.6 :** *Présentation des trois modèles de la carte ARDUINO.*

L'UNO est le choix de prédilection de notre dispositif de poursuite solaire, peu chère et facile à utiliser c'est celle que l'on conseille le plus souvent à ceux qui souhaitent se lancer dans l'aventure ARDUINO.

#### **3.2.4. La carte ARDUINO UNO :**

L'ARDUINO UNO est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega328. ARDUINO est une plate-forme de prototypage open source et sa simplicité la rend idéale pour les amateurs comme pour les professionnels.

L'ARDUINO UNO possède 14 broches d'entrée/sortie numériques (dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 6 entrées analogiques, un oscillateur à cristal de 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation. Il contient tout le nécessaire pour prendre en charge le microcontrôleur, connectez-le simplement à un ordinateur avec un câble USB ou alimentez-le avec un adaptateur AC-DC ou une batterie pour commencer.



**La figure III.7 :** *La carte ARDUINO UNO.*

L'ARDUINO UNO diffère de toutes les cartes précédentes en ce qu'il n'utilise pas la puce de pilote USB-série FTDI. Au lieu de cela, il comporte la puce de microcontrôleur Atmega8U2 programmée comme un convertisseur USB-série. "UNO" signifie un en italien et est nommé pour marquer la sortie prochaine D'ARDUINO 1.0.

L'ARDUINO UNO et la version 1.0 seront les versions de référence d'ARDUINO, à l'avenir. L'UNO est la dernière d'une série de cartes ARDUINO USB et le modèle de référence pour la plate-forme ARDUINO. Les pilotes IDE open source ARDUINO peuvent être téléchargés gratuitement et nous avons créé un tutoriel de téléchargement et d'installation pour la plate-forme Windows [25].

### 3.2.5. Les caractéristiques techniques de la carte :

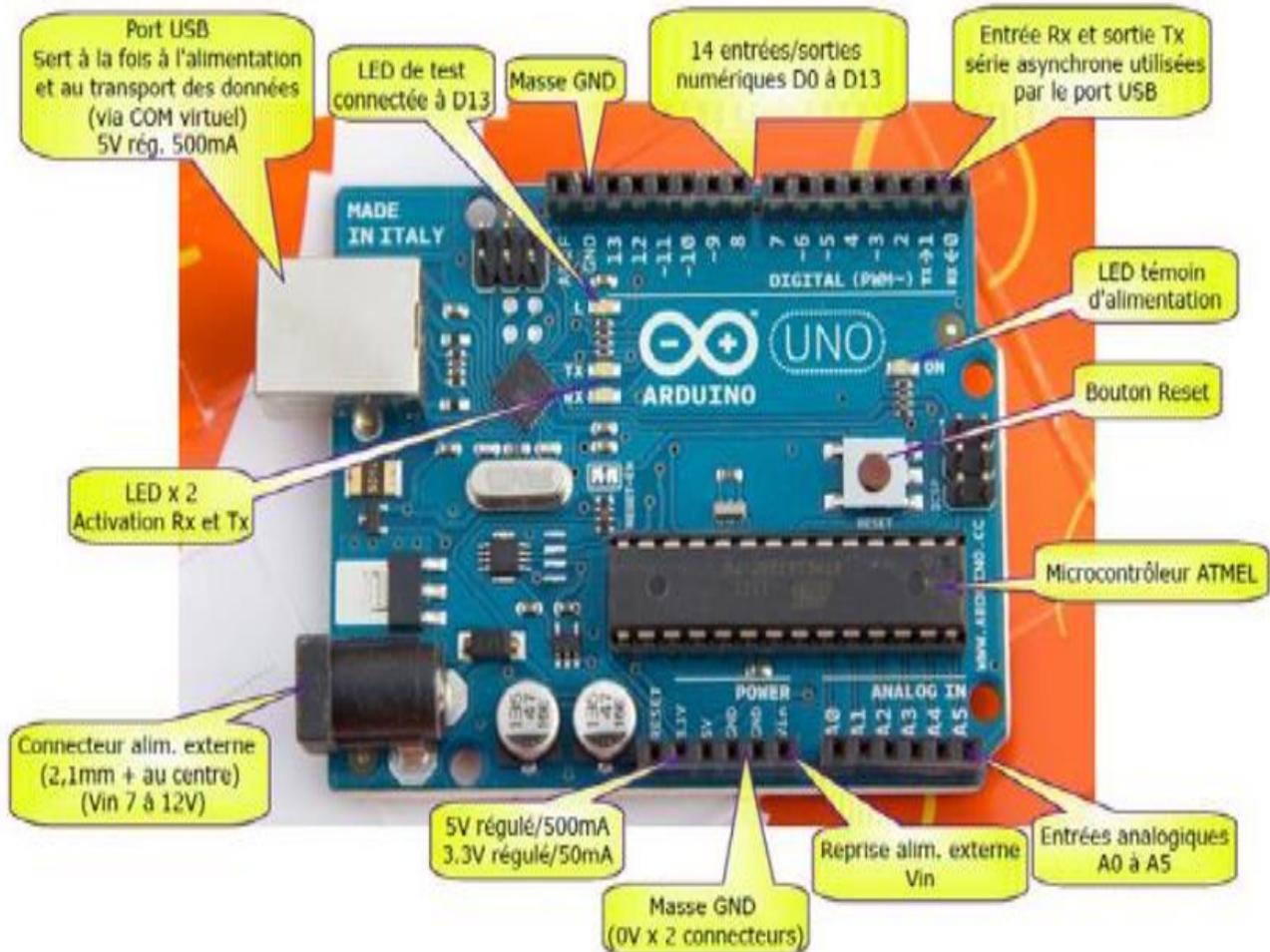
Le tableau (III.3) représente les caractéristiques techniques de L'ARDUINO UNO [27]:

<b>Microcontroller</b>	ATmega328
<b>Tension de fonctionnement</b>	5V
<b>Tension d'alimentation (recommandée)</b>	7-12V
<b>Tension d'alimentation (limites)</b>	6-20V
<b>Broches E/S numériques</b>	14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM)
<b>Broches d'entrées analogiques</b>	6 (utilisables en broches E/S numériques)
<b>Intensité maxi disponible par broche E/S (5V)</b>	40 mA (ATTENTION : 200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
<b>Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V</b>	50 mA
<b>Intensité maxi disponible pour la sortie 5V</b>	Fonction de l'alimentation utilisée – 500 mA max si port USB utilisé seul
<b>Mémoire Programme Flash</b>	32 KB (Atmega328) dont 0.5 KB sont utilisés par le bootloader
<b>Mémoire SRAM (mémoire volatile)</b>	2 KB (Atmega328)
<b>Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)</b>	1 KB (Atmega328)
<b>Vitesse d'horloge</b>	16 MHz

**Tableau III.1 :** Les caractéristiques techniques d'ARDUINO UNO.

### 3.2.6. Architecture de la carte ARDUINO UNO :

La carte ARDUINO UNO se compose de plusieurs éléments comme la figure(III.10) [26] :



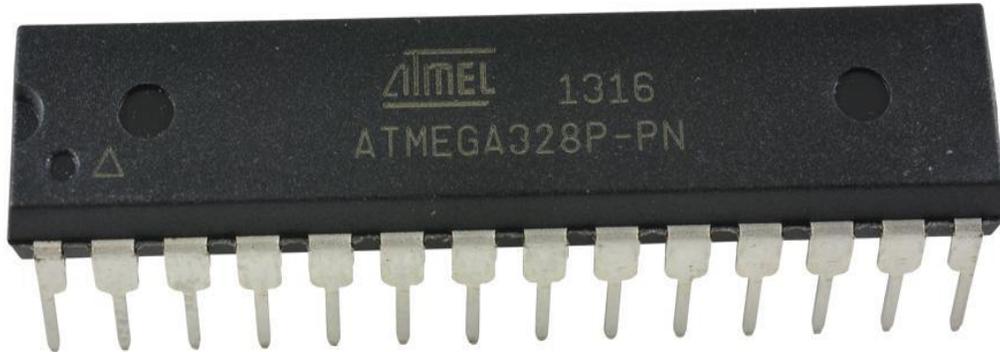
**La figure III.8 :** Architecture de la carte ARDUINO UNO.

Le composant principal de la carte ARDUINO est un microcontrôleur ATmel 328. Un microcontrôleur est, en fait, un ordinateur complet sur une seule puce. En voici les principaux éléments :

- Le processeur ou CPU.
- La mémoire de type Flash qui héberge le programme à exécuter.
- La mémoire vive qui stocke les données variables.
- Les périphériques intégrés au composant.
- Les ports d'entrée/sortie, qui connectent le microcontrôleur avec le monde extérieur.

### 3.2.6.1. Le microcontrôleur ATmega328 :

L' ATmega328 est un microcontrôleur mono puce créé par ATmel dans la famille MegaAVR (plus tard Micro chip Technology a acquis ATmel en 2016). Il possède un cœur de processeur RISC 8 bits à architecture Harvard modifiée et Technologie CMOS haute vitesse et faible consommation [27].



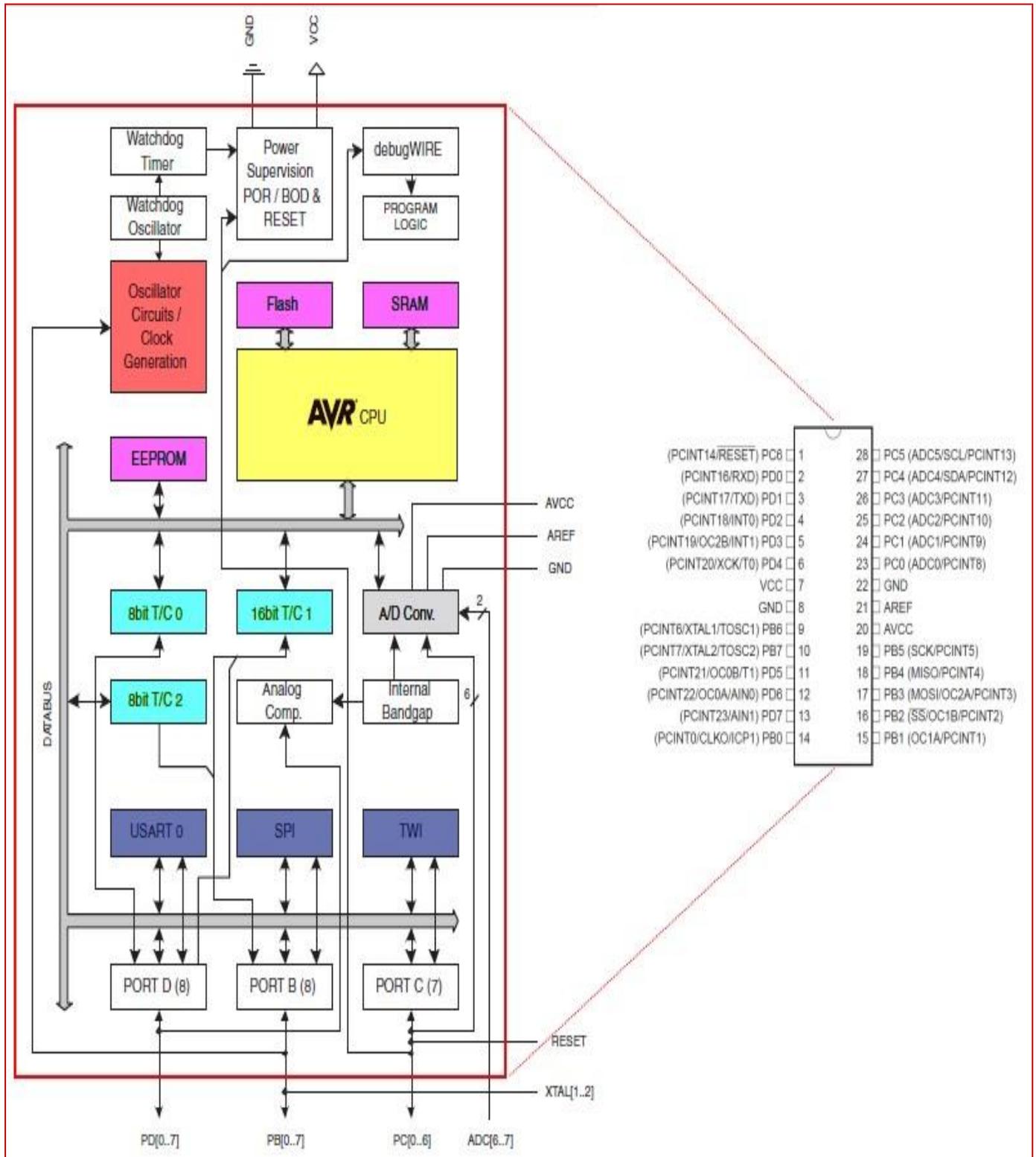
La figure III.9 : Le microcontrôleur ATmega328.

### 3.2.6.2. Les performances du microcontrôleur ATmega328 :

- Mémoire Flash (32 Ko) pour les programmes.
- Mémoire vive SRAM (2 Ko) pour les données.
- Mémoire EEPROM (2 Ko) pour les données de sauvegarde.
- Toute la logique d'horloge (16 mhz).
- Des circuits d'interface et des périphériques d'entrée-sortie permettant au processeur d'accéder au monde extérieur.
- Des Timers/Counters (T/C) 8 et 16 bits.
- Génération des signaux PWM.
- Des interfaces de communication série (UART, SPI, TWI compatible I2C...),
- Un convertisseur Analogique-Numérique (CAN) [16],

3.2.6.3. Architecture interne générale de l'ATmega 328 :

La figure (III.12) représente la structure interne du microcontrôleur l'ATmega 328 [28] :



La figure III.10 : Schéma bloc de description du microcontrôleur l'ATmega 328.

#### 3.2.6.4. La programmation :

Un environnement de développement est un outil logiciel permettant d'écrire du code, code qui sera transmis ensuite dans la carte ARDUINO pour être exécuté.

Il serait tout à fait possible d'écrire du code sur un éditeur de texte classique, de le compiler manuellement avec un compilateur standard, puis de transférer le binaire produit dans la carte ARDUINO. Heureusement, des outils ont été créés pour faciliter le développement, la compilation et le transfert de binaires vers des cartes externes.

On appelle environnement de développement une application, un logiciel, qui facilite l'ensemble de ces actions. Un environnement de développement possède la caractéristique d'appliquer une coloration syntaxique. En effet, chaque langage informatique contient des mots-clés spécifiques qu'il est possible d'identifier facilement. et comprendre plusieurs lignes de codes [24].

#### 3.2.6.5. La communication et la protection du carte ARDUINO UNO :

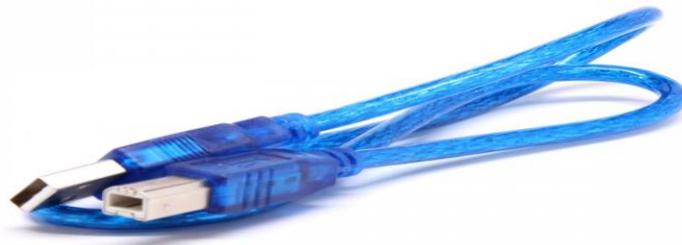
Pour communiquer, l'ARDUINO UNO peut employer différents protocoles comme nous l'avons vu précédemment :

- la voie série avec le port USB ainsi que les broches numériques 0 et 1. Précisons qu'à l'initialisation de la voie Série (par exemple quand on allume le terminal de l'IDE), la carte ARDUINO se réinitialise.
- SPI avec les broches numériques 10, 11 12 et 13.
- I2C / Wire avec les broches analogiques A4 et A5.
- de plus, la librairie Software Serial permet d'utiliser n'importe quelle broche numérique pour communiquer en voie série.

L'ARDUINO UNO a un fusible réparable automatiquement qui protège le port USB des courts-circuits ou des surcharges (en général, le courant maximum que peut fournir une prise USB est de 500 mA) [29].

### 3.3. Câble USB ARDUINO UNO:

L'indispensable câble USB type A/B qui permet à la fois d'alimenter vos projets ARDUINO et connecter votre ARDUINO UNO et à votre PC pour programmer la carte (via ARDUINO IDE) et d'utiliser le Moniteur Série [30].



**La figure III.11 :** *Câble USB type A/B.*

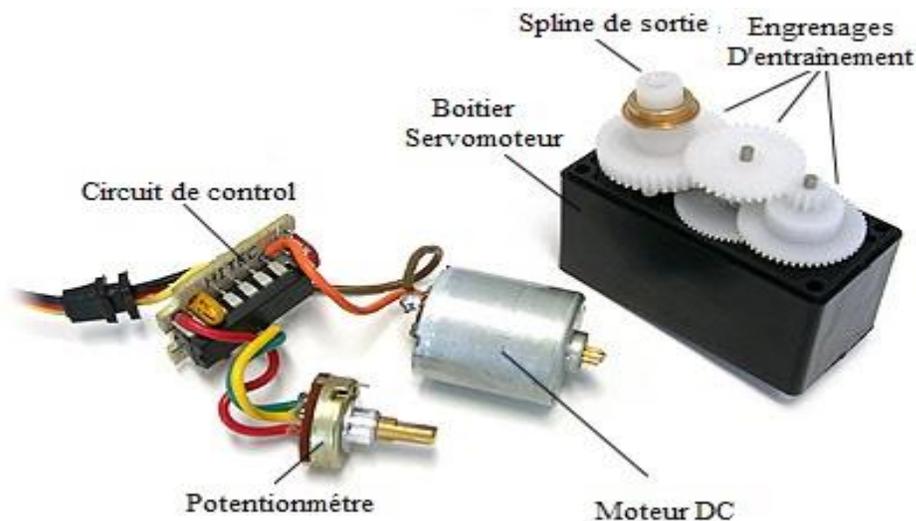
### 3.4. Les servomoteurs :

#### 3.4.1. Définition :

Un servomoteur est un actionneur rotatif ou linéaire qui permet un contrôle précis de la position angulaire ou linéaire, de la vitesse et de l'accélération. Il se compose d'un moteur adapté couplé à un capteur de retour de position. Les servomoteurs sont utilisés dans des applications telles que la robotique, les machines CNC ou la fabrication automatisée.

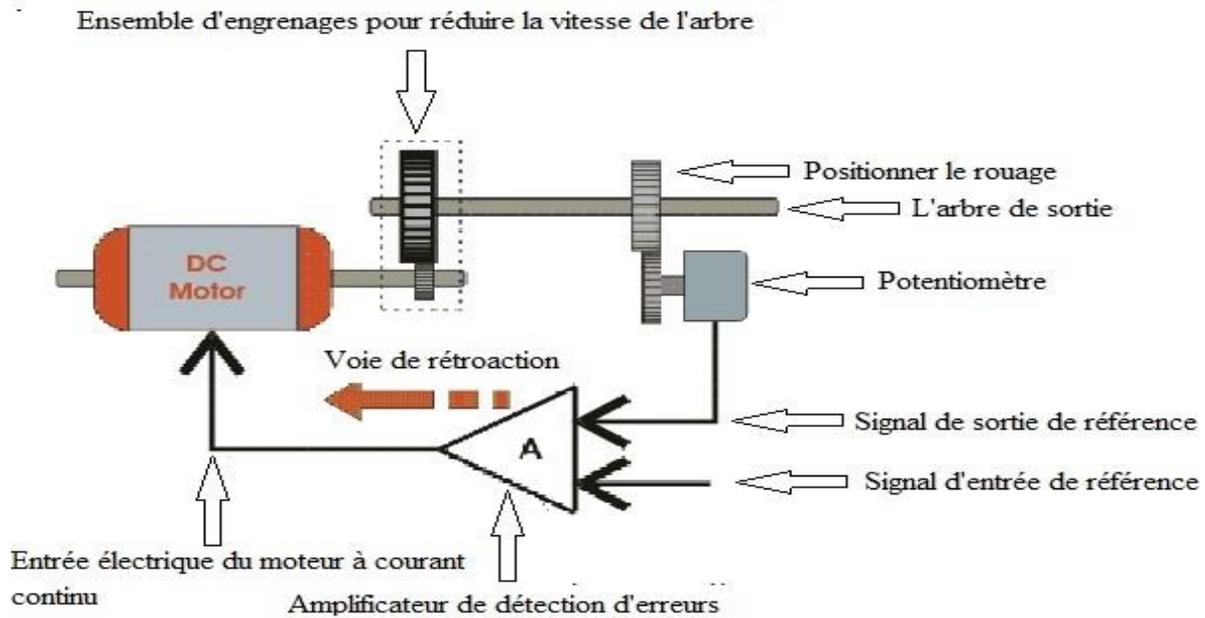
Il nécessite également un contrôleur relativement sophistiqué, souvent un module dédié conçu spécifiquement pour être utilisé avec des servomoteurs. Les servomoteurs ne constituent pas une classe spécifique de moteur, bien que le terme servomoteur soit souvent utilisé pour désigner un moteur adapté à une utilisation dans un système de commande en boucle fermée.

Les servomoteurs font partie d'un système de commande en boucle fermée et se composent de plusieurs parties, à savoir un circuit de commande, un servomoteur, un arbre, un potentiomètre, un engrenage d'entraînement, un amplificateur et soit un codeur, soit un résolveur. Un servomoteur est un appareil électrique autonome qui fait tourner les pièces d'une machine avec un rendement élevé et une grande précision.



**La figure III.12 :** Définition des composants du servomoteur.

L'arbre de sortie de ce moteur peut être déplacé à un angle, une position et une vitesse spécifiques qu'un moteur normal n'a pas. Le servomoteur utilise un moteur ordinaire et le couple avec un capteur de retour de position. Le contrôleur est la partie la plus importante du servomoteur spécialement conçue et utilisée à cet effet. Le servomoteur est un mécanisme en boucle fermée qui intègre un retour de position pour contrôler la vitesse et la position de rotation ou linéaire.

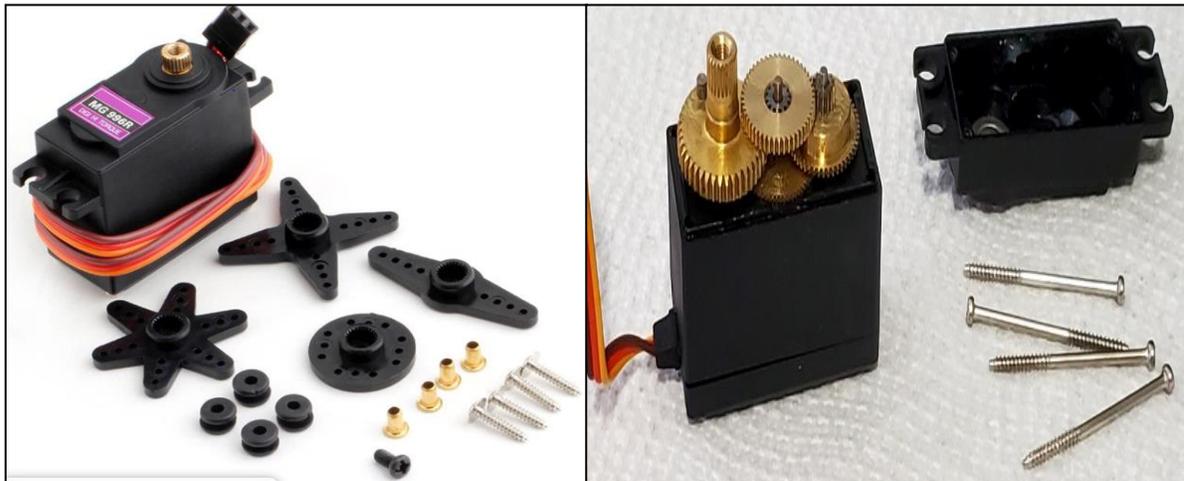


La figure III.13 : Schéma de principe d'un servomoteur.

Le moteur est contrôlé par un signal électrique, analogique ou numérique, qui détermine la quantité de mouvement qui représente la position finale commandée pour l'arbre. Un type d'encodeur sert de capteur qui fournit un retour de vitesse et de position. Ce circuit est intégré directement dans le carter du moteur, qui est généralement équipé d'un système d'engrenage [31].

### 3.4.2. Le servo MG996 :

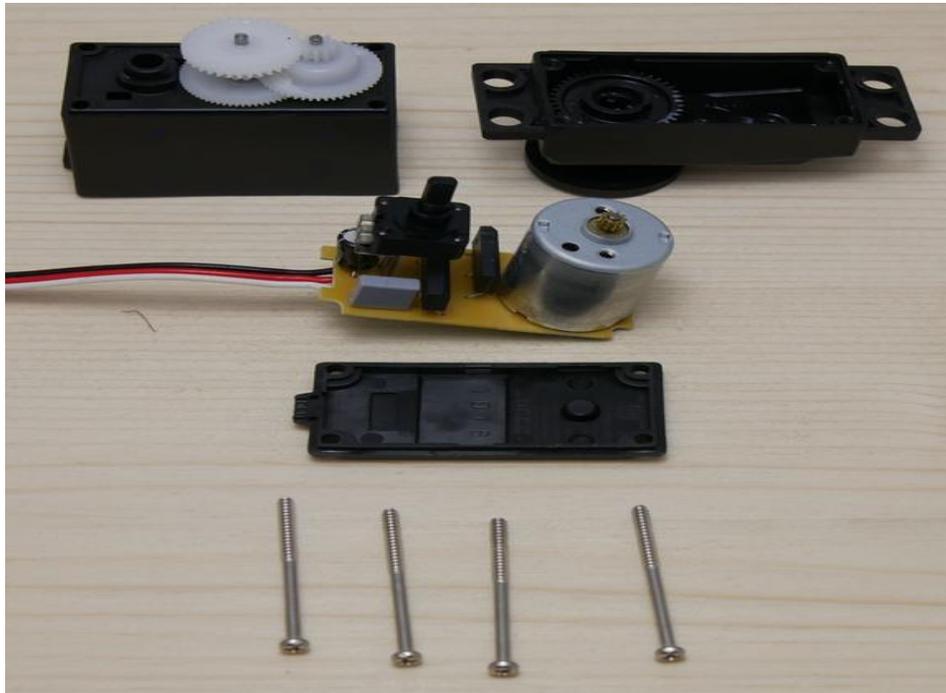
Ce servomoteur de bonne qualité est en concurrence très étroite avec le servomoteur numérique à engrenages métalliques haute vitesse TowerPro MG996 Servo d'origine. Il équipe un moteur à courant continu de très bonne qualité et un câble de connexion plus épais que les autres servomoteurs que nous vendons, c'est pourquoi nous le vendons comme un servomoteur de bonne qualité. Il a des engrenages en métal qui en font des moteurs robustes et fiables.



La figure III.14 : Le servo MG996 Tower Pro et les engrenages métalliques.

Ces servomoteurs MG996TowerPro sont des servomoteurs à grande vitesse avec un couple puissant de 13 kg/cm. Ils sont compatibles avec toutes les applications qui utilisent le servomoteur TowerPro MG996 d'origine en raison de leur même taille, de leur qualité comparable et de leurs performances optimisées. Ils sont équipés de roulements à billes de bonne qualité pour un fonctionnement fluide et sûr. Les performances optimisées et la fiabilité de ce servo en ont fait le choix préféré de nombreux amateurs de RC.

Le servomoteur numérique haute vitesse TowerPro MG996 tourne à 90° dans chaque direction, ce qui en fait un servomoteur à 180°. C'est un servomoteur numérique qui reçoit et traite le signal PWM plus rapidement et mieux. Il équipe des circuits internes sophistiqués qui fournissent un bon couple, une puissance de maintien et des mises à jour plus rapides en réponse aux forces externes. Ils sont emballés dans un boîtier en plastique solide et étanche qui les rend résistants à l'eau et à la poussière [32].



**La figure III.15 :** *Vue éclatée d'un servomoteur.*

Le servo MG996 Tower Pro est un servo de haute qualité. Il est facilement géré avec des cartes à microcontrôleur et également avec la plupart des systèmes de contrôle radio commerciaux. Il fonctionne particulièrement bien sur les avions compte tenu de ses caractéristiques de couple, de taille et de poids.

### 3.4.3. LES SPÉCIFICATIONS :

Stable et résistant aux chocs, Engrenage en métal, Double roulement à billes, Poids 55g [33].

#### 3.4.3.1. TECHNIQUES :

- Modèle de moteur générique MG996 (Chine).
- Type de lecteur Analogique.
- Degré de rotation 180° (±10°).

#### 3.4.3.2. Notes de fonctionnement :

- Tension 4.8-6VDC (5V Typique).
- Courant (inactif) 10mA (typique).
- Courant (typique pendant le mouvement) 170-400Ma.
- Courant (décrochage) 1,3 – 1,5 A (mesuré).
- Couple de décrochage 13 kg-cm (typique).
- Vitesse 0,2 s / 60 degrés (varie avec VDC).

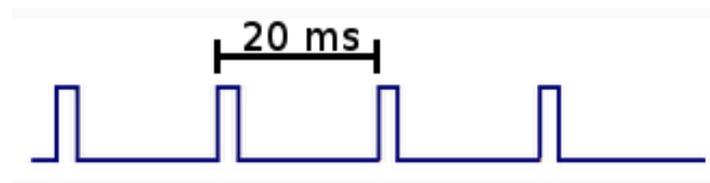
#### 3.4.3.3. Dimensions :

- Longueur du câble 28cm (11").
- Boîtier du moteur L x l x H 40,9 x 20 x 39 mm (1,6 x 0,79 x 1,53").
- Hauteur du moteur (avec arbre) 45 mm (1,77").
- Largeur du boîtier du moteur avec oreilles de montage 54 mm.

### 3.4.4. La commande d'un servomoteur :

La consigne envoyée au servomoteur n'est autre qu'un signal électronique de type PWM. Il dispose cependant de deux caractéristiques indispensables pour que le servomoteur puisse comprendre ce qu'on lui demande. À savoir : une fréquence fixe de valeur 50Hz (comme celle du réseau électrique EDF) et d'une durée d'état HAUT elle aussi fixée à certaines limites.

Le signal que nous allons devoir générer doit avoir une fréquence de 50 Hz. Autrement dit, le temps séparant deux fronts montants est de 20 ms. Je rappelle la formule qui donne la relation entre la fréquence (F) et le temps de la période du signal (T) :  $F = \frac{1}{T}$

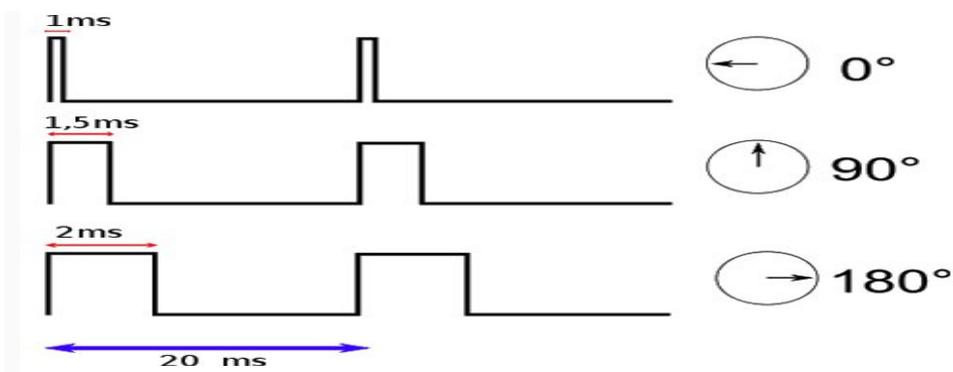


La figure III.16 : Signal de fréquence 50 Hz

Cette durée, chers petits zéros, est ce qui compose l'essentiel du signal. Car c'est selon elle que le servomoteur va savoir comment positionner son bras à un angle précis. Vous connaissez comment fonctionne un signal PWM, qui sert également à piloter la vitesse d'un moteur à courant continu. Eh bien, pour le servomoteur, c'est quelque peu semblable.

En fait, un signal ayant une durée d'état HAUT très faible donnera un angle à  $0^\circ$ , le même signal avec une durée d'état HAUT plus grande donnera un angle au maximum de ce que peut admettre le servomoteur. Mais, soyons rigoureux ! Précisément, je vous parlais de valeurs limites pour cet état HAUT et ce n'est pas pour rien, car ce dernier est limité entre une valeur de 1ms au minimum et au maximum de 2ms (ce sont bien des millisecondes puisque l'on parle de durée en temps) pour les servomoteurs standards.

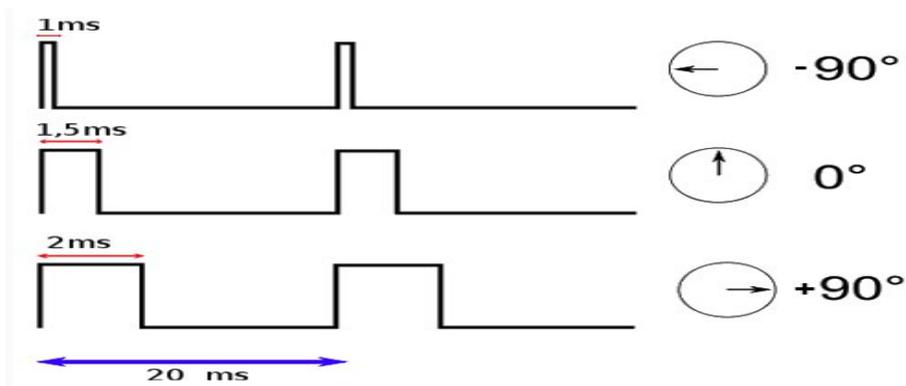
Comme un schéma vaut mieux qu'un long discours :



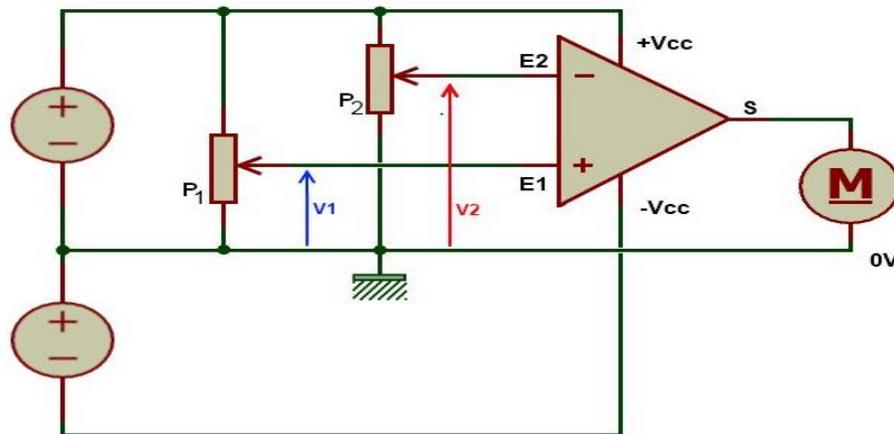
La figure III.17 : Position en fonction de la pulsation.

Vous aurez deviné, à travers cette illustration, que la durée de l'état HAUT fixe la position du bras du servomoteur à un angle déterminé. Et comment je fais si je veux que mon servomoteur fasse un angle de  $45^\circ$  ? Ça ne marche pas ?

Si, bien sûr. En fait, il va falloir faire jouer le temps de l'état HAUT. Pour un angle de  $45^\circ$ , il va être compris entre 1ms et 1,5ms. À 1,25ms précisément. Après, c'est un rapport qui utilise une relation très simple, le calcul ne vous posera donc aucun problème. Tous les angles compris dans la limite de débattement du bras du servomoteur sont possibles et configurables grâce à ce fameux état HAUT. Et si mon servomoteur n'a pas l'angle  $0^\circ$  pour origine, mais  $90^\circ$ , comment on fait ? C'est pareil ! Disons que  $90^\circ$  est l'origine, donc on peut dire qu'il est à l'angle  $0^\circ$ , ce qui lui donne un débattement de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$  [34] :



La figure III.18 : Position en fonction de la pulsation avec décalage.



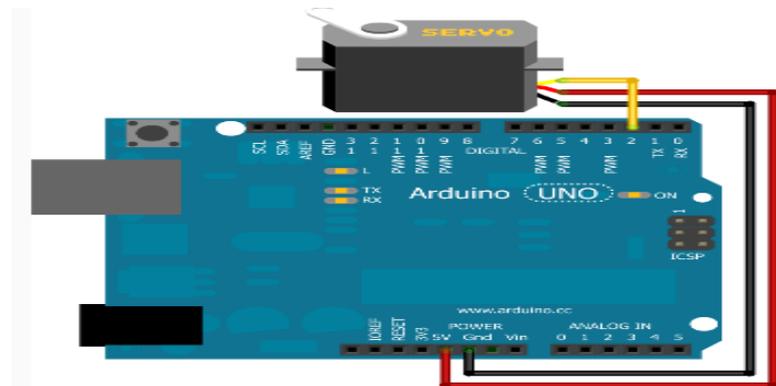
La figure III.19 : Schéma électrique d'un servomoteur.

### 3.4.5. Cablage Arduino et un servomoteur :

Nous l'avons vu plus haut, la connectique d'un servomoteur se résume à trois fils : deux pour l'alimentation positive et la masse et le dernier pour le signal de commande. Rappelons qu'un servomoteur accepte généralement une plage d'alimentation comprise entre 4.5V et 6V (à 6V il aura plus de couple et sera un peu plus rapide qu'à 4.5V). Si vous n'avez besoin d'utiliser qu'un ou deux servomoteurs, vous pouvez les brancher sur la sortie 5V de la carte ARDUINO.

Si vous voulez en utiliser plus, il serait bon d'envisager une alimentation externe car le régulateur de L'ARDUINO n'est pas fait pour délivrer trop de courant, vous risqueriez de le cramer. Dans ce cas, n'oubliez pas de relier la masse de l'alimentation externe et celle de l'ARDUINO afin de garder un référentiel électrique commun.

Le câble permettant le transit du signal de commande du servomoteur peut-être branché sur n'importe quelle broche de L'ARDUINO. Sachez cependant que lorsque nous utiliserons ces derniers, les sorties 9 et 10 ne pourront plus fournir un signal PWM (elles pourront cependant être utilisées comme de simples entrées/sorties numériques). C'est une des contraintes de la bibliothèque que nous allons utiliser. Voici maintenant un petit exemple de montage d'un servomoteur sur L'ARDUINO [34]:



La figure III.20 : Montage simple d'un servomoteur avec L'ARDUINO.

### 3.5. Les outils de connexion :

#### 3.5.1 Le domino électrique:

Appelé aussi borne de raccordement au réseau, le domino électrique est indispensable pour tous travaux d'électricité. Ce petit boîtier noir ou blanc s'utilise pour raccorder des fils rigides ou fils électriques souples entre eux. L'outil assure en d'autres termes le branchement électrique et la bonne connectique de vos appareils domestiques.

La partie extérieure du domino en thermoplastique est isolante. La partie métallique à l'intérieur permet de connecter les fils électriques souhaités. Grâce à la vis métallique du domino, les fils électriques produisent une connexion électrique satisfaisante [35].

Caractérisés par des connexions et des installations très rapides, les dominos sont très simples d'utilisation, et assurent la sécurité des installations électriques. Bien que sa mise en œuvre semble facile et simple et rende les câblages plus organisé.

Il est utilisé dans les appareils électroménagers, les appareils électriques pour la domotique et les luminaires et les circuits électriques en général.

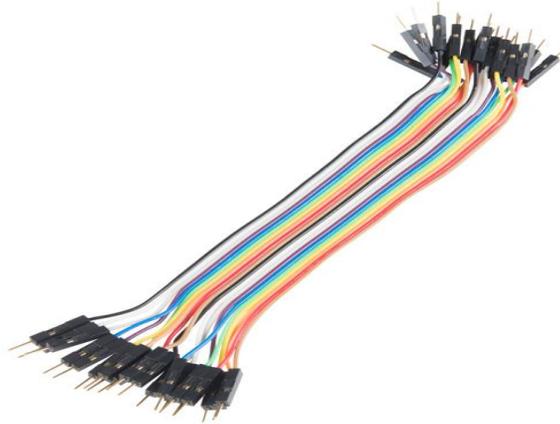


**La figure III.21 :** *Un domino électrique ou borne de raccordement.*

#### 3.5.2. Les fils de pin:

Ce sont des fils de liaison avec des connecteurs mâles aux deux fins. Utilisez-le pour passer de n'importe quelle tête féminine sur n'importe quel tableau à n'importe quelle autre tête féminine. Combinez-le avec un pull femme à femme pour créer un pull homme à femme. Plusieurs cavaliers peuvent être connectés les uns à côté des autres sur un en-tête de 0,1".

Ces fils de connexion peuvent être utilisés pour à peu près n'importe quoi ! Il fonctionne très bien avec les cartes ARDUINO et toute carte de prototypage de 0,1 [36].



**La figure III.22 :** *les fils de pin*

### 3.6. Alimentation :

Nous utilisons le port USB de l'ordinateur comme alimentation pour l'ARDUINO, ou alimentez-le avec un adaptateur AC-DC ou une batterie 7V /12V.



**La figure III.23 :** *Adaptateur et une batterie.*

### 3.7. Les résistances électriques :

Nous aurons besoin de quatre résistances électriques de 10 k Ohm pour protéger le circuit électrique



**La figure III.24 :** *Résistance électrique de 10 k ohm*

**4. Conclusion :**

De ce chapitre, nous avons extrait le mode fonctionnement du notre dispositif intelligent de poursuite solaire sous forme de schéma synoptique et de l'étude des différents composants électroniques utilisés dans ce projet, nous avons appris leur principe de fonctionnement et l'architecture interne de la configuration matérielle de notre dispositif intelligent de poursuite solaire et les caractéristiques technique et le rôle principale de chaque composants.

*Chapitre IV :*  
*Réalisation de notre*  
*Dispositif intelligent*  
*de Poursuite solaire*

## 1. Introduction :

Ce chapitre est considéré comme le plus important dans ce projet car il reprend les parties principales et la phase de tests et d'expérimentation de la réalisation de notre dispositif intelligent de poursuite solaire qui sont les suivant :

La partie électrique cette étape est le plus important dans notre projet parce que, nous verrons le montage et le câblage des composants électronique et la connexion entre ARDUINO UNO et tous les composants sont les suivant : les capteurs de lumière photorésistance ou LDR, et les résistances, les deux servomoteurs.

Le composant principale dans cette partie est la carte da commande ARDUINO UNO, Il utilise l'intelligence artificielle, elle est le responsable principale de toutes les opérations de système suiveur solaire double axe et les traitements des données des photorésistances, puis renvoie des impulsions aux les actionneurs pour repositionner le panneau perpendiculairement aux rayons solaire.

La partie mécanique c'est une étape complémentaire à l'étape précédente pour la réalisation de notre projet qui se compose par deux parties principales :

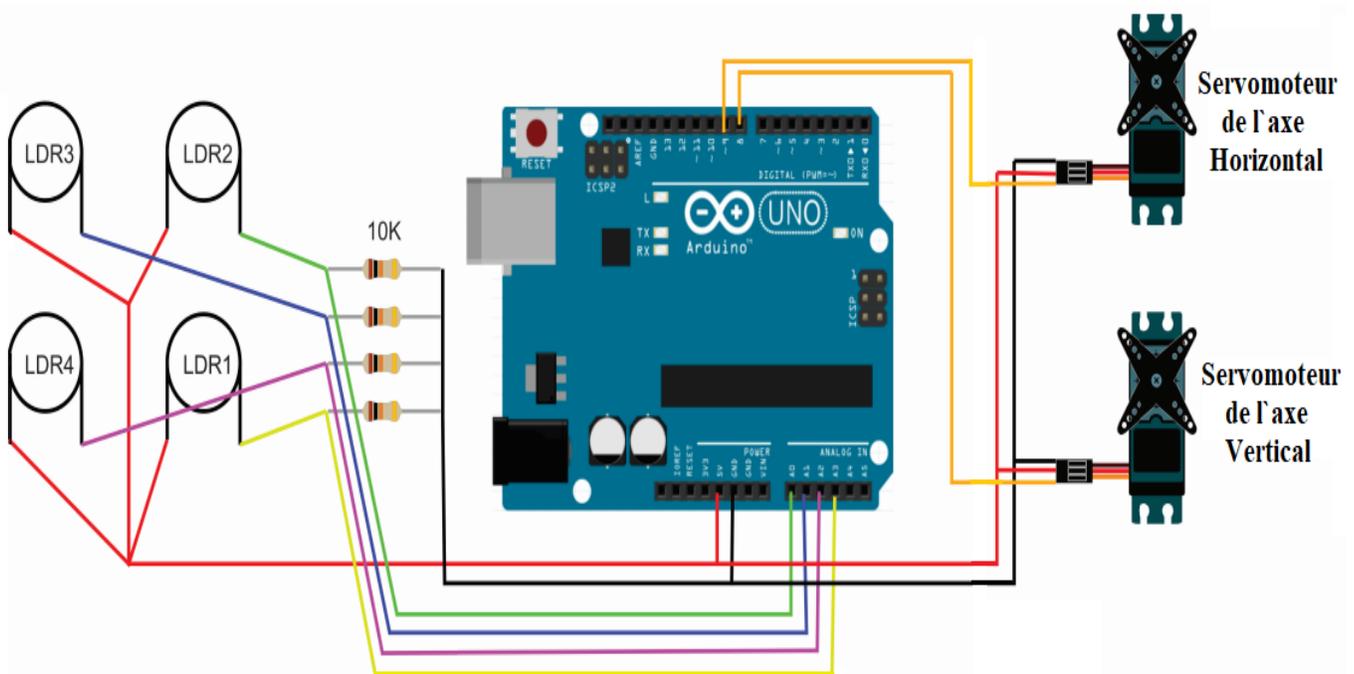
La partie fixe et la partie mobile, qui fonctionnent ensemble comme une structure de la poursuite solaire et sert à supporter le panneau et le diriger vers le rayonnement perpendiculaire du soleil.

La partie programmation c'est une étape très sensible qui dépend de la précision et de une source des informations fiable, Nous commençons l'installation du programme sur Ordinateur pour visualiser et modifier le code source de programmation, Téléchargez ensuite le programme sur la carte ARDUINO, afin qu'il puisse être allumé.

La phase de tests et d'expérimentation est basée sur l'alimentation du notre dispositif intelligent de poursuite solaire, et nous dirigeons des rayonnements lumineux sur les photorésistances ou LDR situées au-dessus, et nous observons comment cela fonctionne.

## 2. La partie électrique:

Cette étape repose sur une bonne compréhension et prise de conscience de montage électrique pour le matérialiser sur le terrain sans erreurs, de manière simple et ordonnée, en appliquant le schéma de câblage suivant (la figure IV.1) :



**La figure IV.1 :** Schéma de câblage électrique de notre dispositif intelligent de poursuite solaire.

Cette partie passe par trois étapes qui sont le suivant :

- La réalisation de prototype des photorésistances ou LDR.
- L`installation des composants électronique à son emplacement désigné.
- Le câblage et raccordement des composants électronique.

### 2.1. La réalisation de prototype des photorésistances :

Nous avons utilisé quatre LDR, et quatre résistances de 10K ohm et l'intérieur de la seringue en plastique est d'une taille appropriée. Nous l'enveloppons avec du ruban adhésif noir pour éviter la réflexion de la lumière, puis on installe les photorésistances à leur place de manière ordonnée, puis on soude les résistances et les fils ensemble selon le schéma de câblage électrique, et la soudure se fait avec un fer à souder à l'étain, comme les figure suivant :



**La figure IV.2 :** *La partie interne de la seringue  
En plastique sans LDR.*



**La figure IV.3 :** *Un fer à souder à l'étain.*

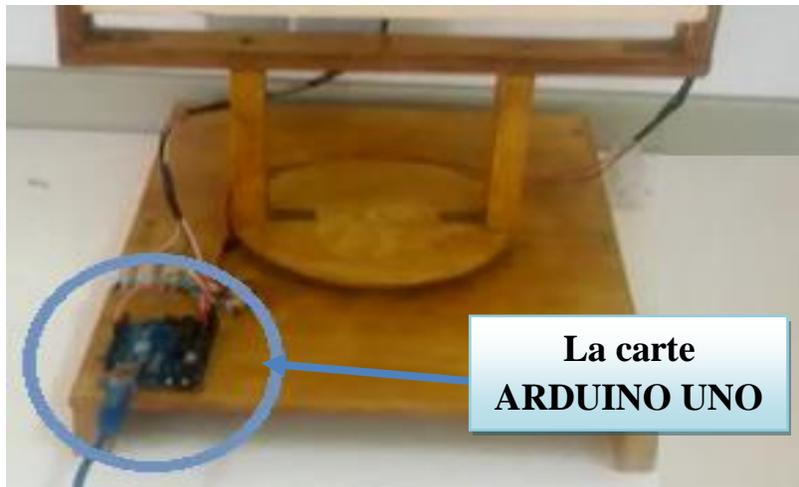


**La figure IV.4 :** *Vue de face et vue d'arrière de prototype des LDR final avec les résistances de 10k ohm.*

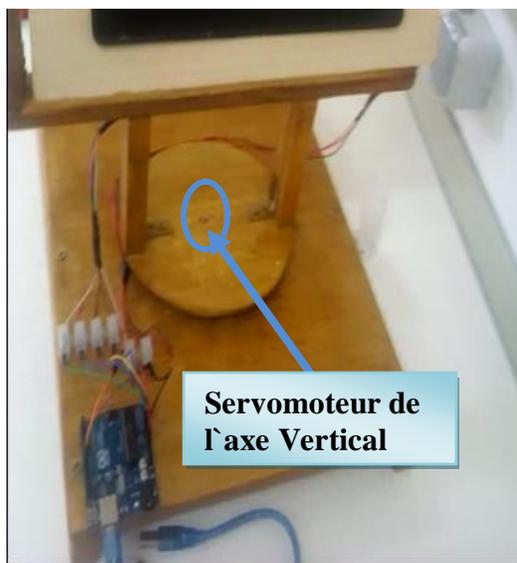
## 2.2. L`installation des composants électronique à son emplacement désigné :

Nous attribuerons l'emplacement de tous les composants électroniques pour les installer de manière ordonnée et correcte afin d'assurer le bon fonctionnement de tous, ainsi que d'éviter tout dysfonctionnement et obstruction de notre dispositif de poursuite solaire intelligent pendant le processus de rotation à deux axes.

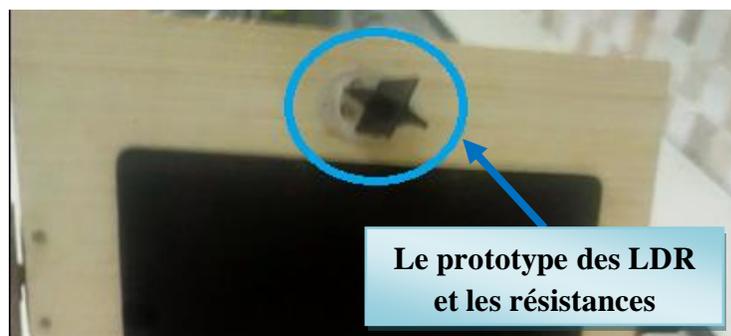
Nous afficherons tous les emplacements de tous les composants (la carte ARDUINO UNO, les deux servomoteurs et le prototype des LDR avec les résistances) sur notre dispositif de poursuite solaire dans les figures suivant respectivement :



La figure IV.5 : l'installation de carte ARDUINO UNO.



La figure IV.6 : l'installation des servomoteurs.



La figure IV.7: l'installation de prototype des LDR et les résistances.

### 2.3. Le câblage et branchement des composants électronique :

Commençons par Les quatre photorésistances nous prenons chaque une électrode et raccordons ensemble, puis nous prenons un fil électrique et les soudons ensemble à un point que nous appelons (A).

Puis les quatre l'électrode restante des photorésistances, nous connectons chaque électrode avec une résistance de 10 k ohm et nous raccordons avec quatre fils électriques dans chaque nœud individuel et nous soudons chacun d'eux seul et nommons chacun points avec (B;C;D;E) et connecter chaque point séparément à chaque entrée de domino électrique pour tout les points.

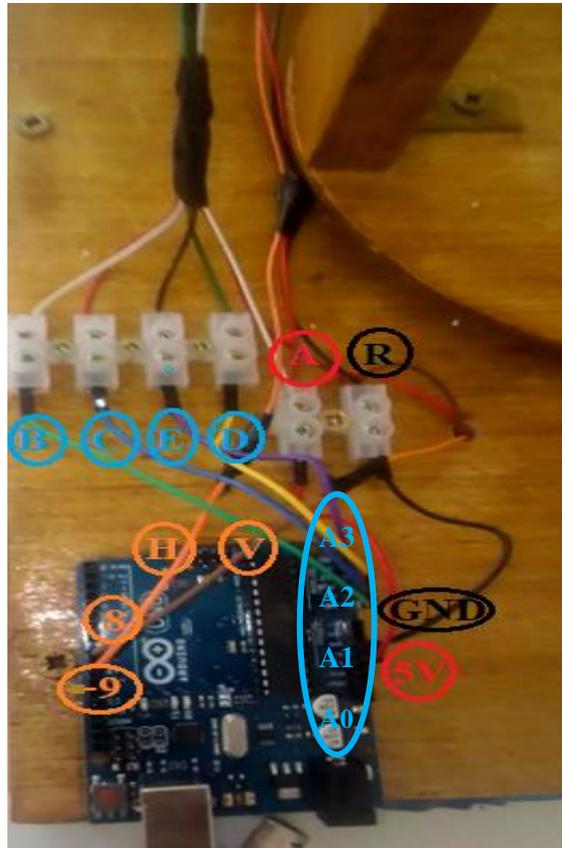
Au final, il reste les électrodes des résistances on les connecte ensemble avec un fil électrique et nous soudons le tout et on appelle le point (R).

Ensuite on prend les pôles positifs des deux servomoteurs et le point de rencontre des pôles des photorésistances, que l'on appelle (A), et on les relie ensemble à l'entrée de domino électrique, puis, nous faisons de même avec les pôles négatifs des deux servomoteurs au point (R) et on connectons à une entrée dans un autre domino, et Les fils de signal sont directement branché avec ARDUINO UNO, nous prenons le point (V) pour le servomoteur à axe vertical et le point (H) pour le moteur horizontal.

Et à la fin on fait un branchement avec l'ARDUINO UNO par les file à pin de tout les points obtenu comme indiqué dans le tableau et la figure ci-dessous:

Le point obtenu	Le branchement à l'ARDUINO UNO
A	5V
B	A0
C	A1
D	A2
E	A3
H	~ 9
R	GND
V	8

**Le tableau IV.1 :** *Le branchement des points obtenu avec l'ARDUINO UNO.*



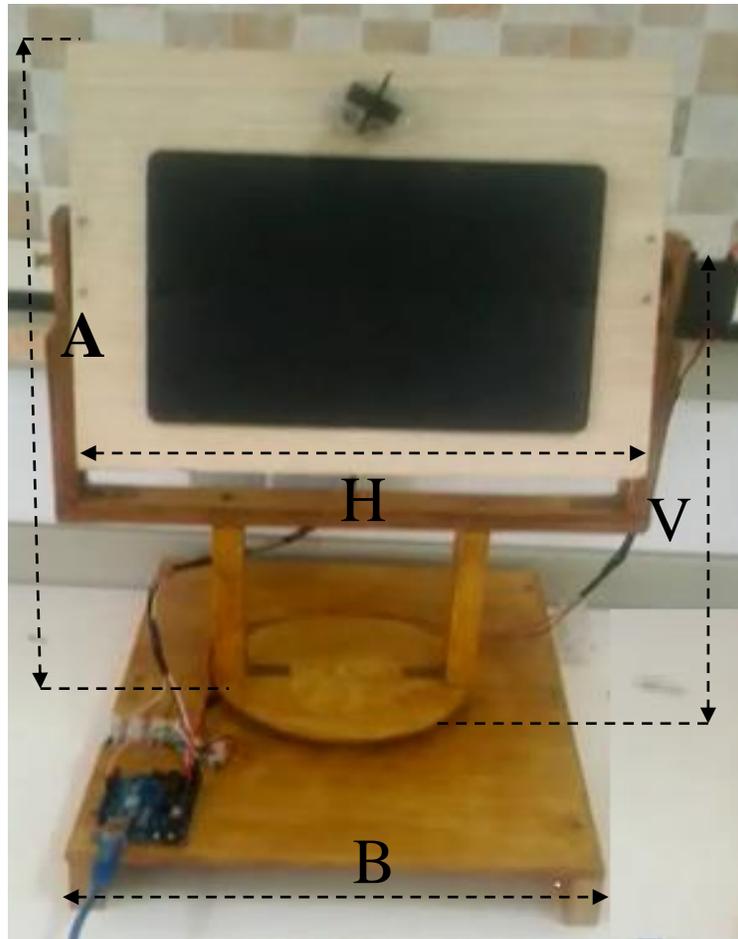
**La figure IV.8:** Le branchement des points obtenu avec l'ARDUINO UNO par les fils à pin.

### 3. La partie mécanique :

Nous avons préparé la structure de notre dispositif intelligent de poursuite solaire avec certaines mesures, qui fait en bois et l'avons peinte avec un vernis pour l'esthétique, et elle se compose de deux parties, une partie fixe et l'autre mobile.

La partie mobile est composé par un support pour faire une rotation sur l'axe vertical par un servomoteur installé dessous sur la partie fixe et le support qui soulève le cadre des panneaux photovoltaïques, qui à son tour dirige les panneaux dans la direction appropriée, qui tourne sur l'axe horizontal par le servomoteur installé sur le dessus du support et les deux partie qui fonctionnent ensemble pour devenir la structure du poursuite solaire .

L'objectif de cette structure est de supporter le panneau et de le diriger vers le rayonnement perpendiculaire du soleil par son le system d'intelligence pour augmenter la productivité des panneaux photovoltaïques et augmenter la production d'énergie électrique.



La figure IV.9: Présentation des différents blocs de la structure mécanique de notre poursuite solaire

La signification des lettres dans le tableau suivant :

Les lettres	La signification
A	La partie mobile
B	La partie fixe
H	Le cadre des panneaux
V	Le support

Le tableau IV.2: La signification des lettres.

#### 4. La partie de programmation :

ARDUINO fournit un environnement de développement avec un éditeur de source, les opérations de compilation et de chargement dans la mémoire du microcontrôleur étant ramenées à des clics sur des boutons dans l'IHM (très simple). La communication entre le PC et la carte se fait via le port USB, moyennant installation d'un driver adapté (fourni par ARDUINO).



La figure IV.10: la communication entre la carte ARDUINO UNO et PC.

##### 4.1. Les étapes de programmation ARDUINO :

Après la préparation du programme, il y'a des étapes à faire afin de terminer la programmation, qui sont les suivantes :

- Obtenir la carte ARDUINO UNO et le câble USB.
- Télécharger l'environnement ARDUINO.
- Raccorder la carte à l'ordinateur.
- Installation des pilotes du périphérique Série-USB.
- Lancer l'application ARDUINO.

##### 4.2. Charge le programme dans la carte ARDUINO UNO

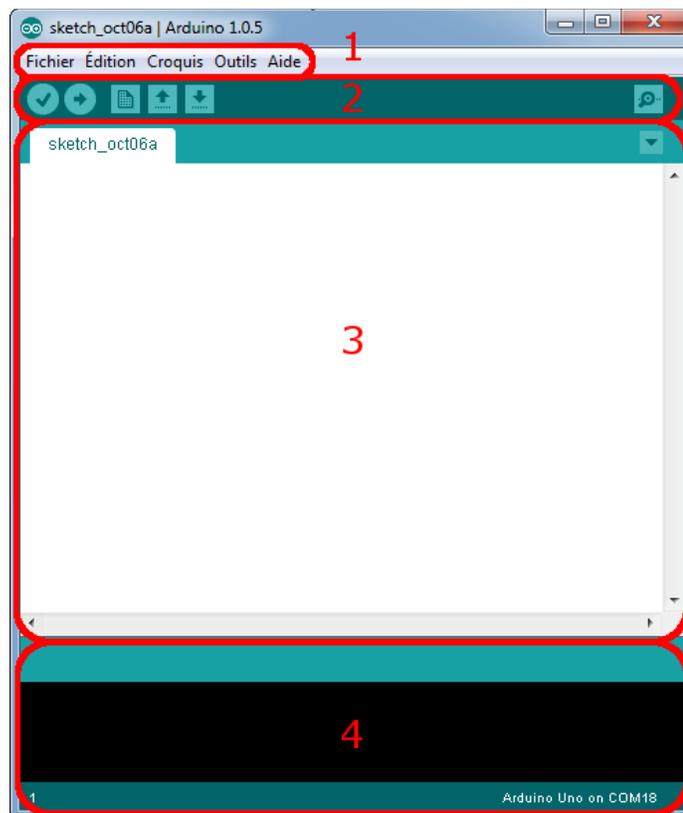
1. Lancer le logiciel.
2. Ouvrir et modifier le programme.
3. Vérifier le programme.
4. Connecter la carte à l'ordinateur avec le câble USB.
5. Transférer le programme vers la carte.
6. Vérifier le fonctionnement.

### 4.3. Présentation de logiciel :

Dans le domaine du développement informatique, l'IDE (ou Integrated Development Environment) regroupe un ensemble d'outils spécifiques. Ceux-ci sont dédiés aux programmeurs afin qu'ils puissent optimiser leur temps de travail et améliorer leur productivité. Autrement dit, l'IDE facilite la mise en œuvre de projets tels que le développement de logiciels ou d'applications.

Pour cela, il assure l'automatisation de certaines tâches et peut éventuellement réaliser des opérations de simplification du langage, comme (Java ou Python). De nombreux IDE proposent aussi des services annexes, comme la gestion de projet, la création de prototypes ou encore l'organisation et la planification des travaux. On peut donc considérer l'IDE comme une trousse à outils. Certains d'entre eux sont utilisables individuellement. D'autres, en revanche, offrent une complémentarité bienvenue afin de pouvoir disposer de leurs fonctionnalités respectives sur un même projet [26].

L'interface de L'IDE ARDUINO en détail Dans la figure (IV.11) :



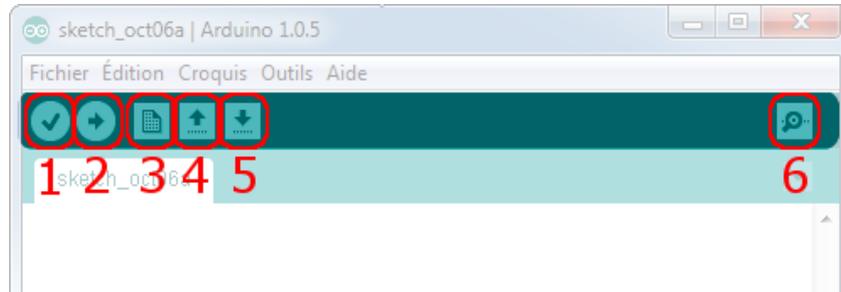
**La figure IV.11:** L'interface de L'IDE ARDUINO en détail.

#### Correspondance :

- Le cadre numéro 1 : ce sont les options de configuration du logiciel
- Le cadre numéro 2 : il contient les boutons qui vont nous servir lorsque l'on va programmer nos cartes
- Le cadre numéro 3 : ce bloc va contenir le programme que nous allons créer

- Le cadre numéro 4 : celui-ci est important, car il va nous aider à corriger les fautes dans notre programme. C'est le débogueur.

Il ya des boutons dans le cadre numéro 2 comme la figure suivant :



**La figure IV.12:** Les différents boutons dans le cadre numéro 2.

### Correspondance :

- Bouton 1 : Ce bouton permet de vérifier le programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans votre programme.
- Bouton 2 : Charge (téléverse) le programme dans la carte Arduino.
- Bouton 3 : Crée un nouveau fichier.
- Bouton 4 : Ouvrir un fichier.
- Bouton 5 : Enregistre le fichier.
- Bouton 6 : Ouvrir le moniteur série.

#### 4.4. Le code ARDUINO UNO :

Les figures suivantes représentent le code ARDUINO. C'est le code que nous allons entrer dans Logiciel l'IDE puis programmer la carte Arduino et la télécharger dessus et ceci en se connectant à l'ordinateur via le câble USB.

```
#include <Servo.h>

Servo myservo1, myservo2;
int LDR1 = A0, LDR2 = A1, LDR3 = A2, LDR4 = A3;
int rRDL1 = 0, rRDL2 = 0, rRDL3 = 0, rRDL4 = 0;
int max1=0, max2=0, max3=0;
int ser1 = 80, ser2=0;

void setup() {
  myservo1.attach(9);
  myservo2.attach(8);

  Serial.begin(9600);
  myservo1.write(ser1);
  myservo2.write(100);
}

void loop() {

}

if(rRDL3<max3 && rRDL4<max3)
{
  if(ser1>0)
  | ser1-=1;
  myservo1.write(ser1);
}

if(rRDL2<max3 && rRDL3<max3)
{
  Serial.println("servo2 +" + String(ser2));
  if(ser2<180)
  | ser2+=1;
  myservo2.write(ser2);
}
if(rRDL1<max3 && rRDL4<max3)
{
  Serial.println("servo2 -" + String(ser2));
```

La figure IV.13: Le premier étape de code ARDUINO.

```
rRDL1 = analogRead(LDR1) / 100;
rRDL2 = analogRead(LDR2) / 100;
rRDL3 = analogRead(LDR3) / 100;
rRDL4 = analogRead(LDR4) / 100;

max1 = max(rRDL1, rRDL2);
max2 = max(rRDL3, rRDL4);
max3 = max(max1, max2);

//Serial.println(String(max3));
//Serial.println(String(rRDL1) +", "+String(rRDL2) +", "+String(rRDL3) +", "+String(rRDL4));

if(rRDL1<max3 && rRDL2<max3)
{
  if(ser1<140)
  | ser1+=1;
myservo1.write(ser1);

  Serial.println("servo2 +" + String(ser2));
  if(ser2<180)
  | ser2+=1;
  myservo2.write(ser2);
}
if(rRDL1<max3 && rRDL4<max3)
{
  Serial.println("servo2 -" + String(ser2));
  if(ser2>0)
  | ser2-=1;
  myservo2.write(ser2);
}
delay(15);
}
```

**La figure IV.14:** *La deuxième étape de code ARDUINO.*

## 5. La phase de tests et d'expérimentation :

Nous allons commencer par alimenter de notre dispositif intelligent de poursuite solaire, puis en concentré un rayonnement sur les photorésistances ou des LDR et observerons comment cela fonctionne et comment il réagit.

Dans les figures suivant on va présente notre dispositif intelligent de poursuit solaire et quelque positions du poursuit pendant la période d'essai :



La figure IV.15: Quelques positions du suivi pendant la période d'essai.

## 6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé les étapes de base de la réalisation notre dispositif intelligent de poursuite solaire, qui sont toutes importantes et interdépendantes, de sorte que nous avons appris d'eux la stratégie de choix des composants électroniques du notre projet et comment les traiter, et que ils sont adaptés à nos besoins, sont faciles à commander et contrôler et ont une faible consommation d'énergie et sont disponibles sur le marché.

Les bases et les méthodes utilisées pour compléter la partie électrique, et le composant le plus important de celui-ci est la carte ARDUINO UNO. C'est le système de commande et de contrôle, comment installer et la connexion de tous les composants avec elle dans les différentes sorties et entrées, et le rôle du schéma de câblage et raccordement électrique dans sa réalisation.

Puis l'étape mécanique est représenté par la réalisation de la structure en bois de poursuite solaire et la précision dans l'assemblage de ses éléments .Une partie fixe et autre mobile sont formées, qui travaillent ensemble pour porter et diriger les panneaux photovoltaïques vers le rayonnement perpendiculaire du soleil.

De plus, la partie de programmation est un moyen de communiquer la carte ARDUINO UNO avec l'ordinateur et de la programmer par l` IDE, ce qui est un excellent environnement pour que le programmeur et le développeur travaillent sur plusieurs projets.

Et dans la dernière phase de test et d'expérimentation, qui est le résultat et l'évaluation du travail effectué.

Après cela, nous pouvons dire que nous avons pu atteindre notre objectif souhaité, qui est la réalisation notre dispositif intelligent de poursuite solaire, d'une bonne manière et élaborée et systématique, malgré les obstacles et les difficultés auxquels nous avons été confrontés pendant cette période de manque les conditions et les facteurs appropriés pour travailler, et malgré cela, nous avons défié et réalisé ce que nous pouvions réaliser.

**Conclusion générale :**

Dans le projet de fin d'études, nous avons abordé un sujet important dans les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire, et sa conversion en énergie électrique par effet photovoltaïque, qui consiste à augmenter l'efficacité et le rendement des panneaux photovoltaïques dans la production d'électricité, et c'est par supporter le panneau et le diriger vers le rayonnement perpendiculaire du soleil.

Sur cette base, les trackers solaires sont la meilleure solution à ce problème, et il en existe plusieurs types les suiveurs solaire un axe et le suiveur solaire à deux axes, et l'objectif de ce projet Réalisation d'un dispositif intelligent de poursuite solaire a base de carte ARDUINO UNO et photorésistances.

Nous avons étudié quelques généralités et bases de la conversion de l'énergie solaire, Dans un premier temps, nous avons appris à connaître le rayonnement solaire et sa division en quatre types est rayonnement global ,rayonnement diffus et le rayonnement direct et rayonnement réfléchi, Après cela, nous avons pris une vue générale de l'effet photovoltaïque de son principe de fonctionnement en entrant dans la technologie des cellules photovoltaïques et rôle de la technologie dans la production et le développement d'autres types plus efficaces et la qualité au coût le plus bas possible et le plus rentable, et la tâche de la recherche scientifique est de trouver des solutions, de réduire les matières toxiques dans la fabrication des cellules photovoltaïques et de les recycler pour favoriser leur utilisation et leur demande.

Nous avons appris la position géométrique du soleil, le mouvement quotidien est-ouest et saisonnier nord-sud du soleil, et les coordonnées les plus importantes qui sont l'altitude et l'azimut du soleil pour déterminer la position du soleil.

Les premières applications des suiveurs solaires et le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat, le fonctionnement d'un system de poursuite solaire et la technique utilisée pour cette étude repose sur la différence d'éclairement incident sur les capteurs de lumière LDR.

Aussi que les méthodes pour assure le système de poursuite solaire ,il ya deux méthode photorésistance ou LDR et La méthode astronomique, ainsi que les différents types de poursuite solaires ,il existe deux familles ce sont des suiveur solaire passif a base d'un fluide chimique capable de se vaporiser à basse température, et des suiveurs solaire active représenté par : le suiveurs mono-axes dispose de plusieurs modes ce sont le suiveur à axe vertical simple et à axe vertical incliné et le suiveur à axe horizontal et le suiveurs double axe, et nous avons expliqué l'importance d'un système de poursuite solaire et les avantages et les inconvénients des suiveurs solaires.

Une étude et une description des différents composants électroniques utilisés dans ce projet. (Les capteurs de lumière photorésistance ou LDR et la carte de commande « ARDUINO UNO », les servomoteurs et les outils de connexion).

Nous avons abordé les étapes de base de la réalisation notre dispositif intelligent de poursuite solaire, qui sont toutes importantes et interdépendantes, de sorte que nous avons appris d'eux la stratégie de choix des composants électroniques du notre projet et comment les traiter, et que ils sont adaptés à nos besoins, sont faciles à commander et contrôler et ont une faible consommation d'énergie et sont disponibles sur le marché.

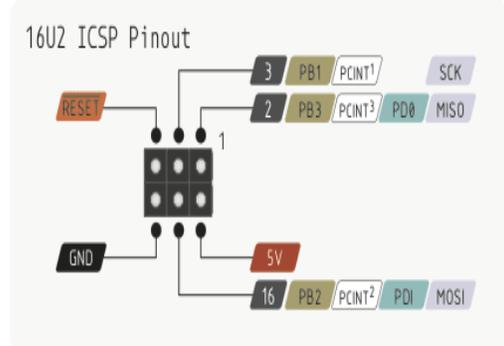
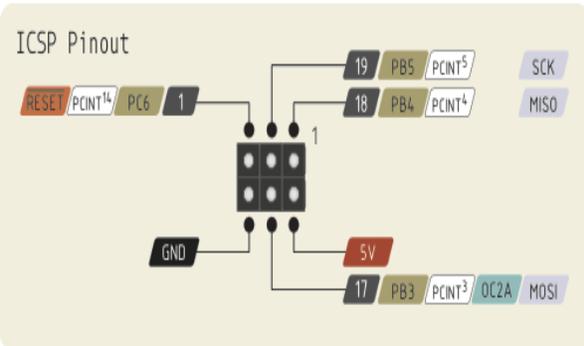
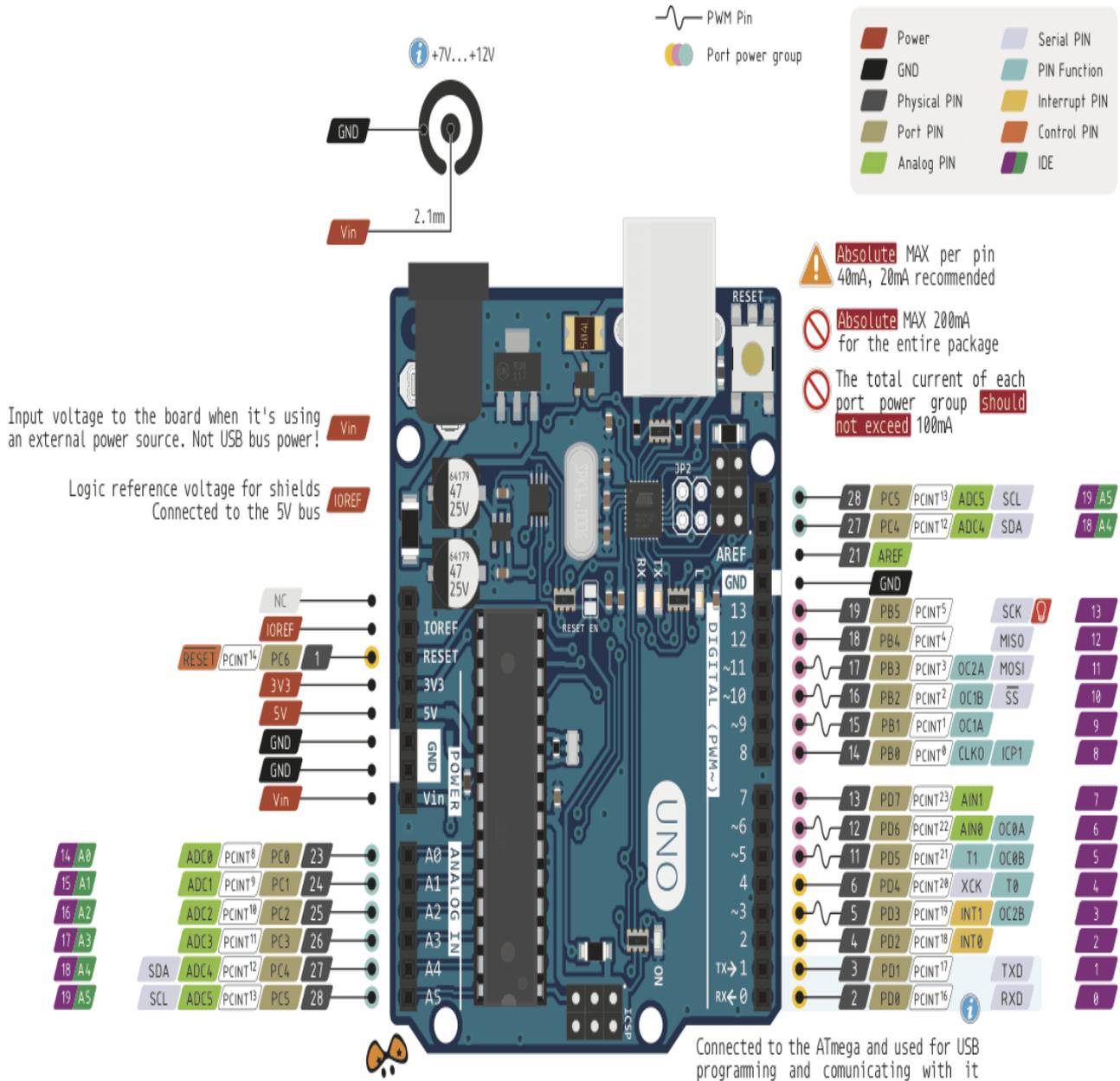
Et dans la dernière phase de test et d'expérimentation, qui est le résultat et l'évaluation du travail effectué.

Après cela, nous pouvons dire que nous avons pu atteindre notre objectif souhaité, qui est la réalisation notre dispositif intelligent de poursuite solaire, d'une bonne manière et élaborée et systématique, malgré les obstacles et les difficultés auxquels nous avons été confrontés pendant cette période de manque les conditions et les facteurs appropriés pour travailler, et malgré cela, nous avons défié et réalisé ce que nous pouvions réaliser.

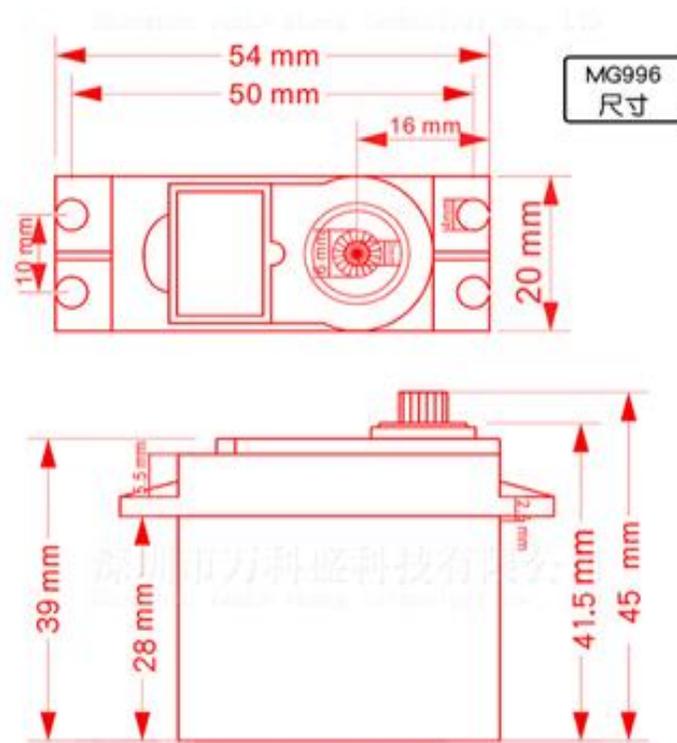
**Bibliographie :**

- [1] Site web : [https://opera-energie.com/energie\\_solaire/#:~:text=Cela%20signifie%20que%20la%20matière,de%20produire%20de%20l%27électricité.](https://opera-energie.com/energie_solaire/#:~:text=Cela%20signifie%20que%20la%20matière,de%20produire%20de%20l%27électricité.)
- [2] KATIA, BELKEBIR, and Chaabi Siham. (2017) ,Conception et réalisation d'un suiveur de soleil à base d'une carte Arduino UNO. *Projet de fin d'étude Diss. Université Mouloud Mammeri,*
- [3] Site web : [https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html.](https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html)
- [4] Site web : <https://www.choisir.com/energie/articles/117006/les-cellules-photovoltaiques-source-inepuisable-dinnovations>
- [5] Site web: [https://izi-by-edf.fr/blog/panneaux-solaires-avantages-inconvenients/.](https://izi-by-edf.fr/blog/panneaux-solaires-avantages-inconvenients/)
- [6] Site web : [http://www.pv-pro.fr/FR/en-savoir-plus/type-modules-panneaux-photovoltaiques.php.](http://www.pv-pro.fr/FR/en-savoir-plus/type-modules-panneaux-photovoltaiques.php)
- [7] Site web :[https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaique-comment-ca-marche.](https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaique-comment-ca-marche)
- [8] Site web : [https://www.photovoltaique.info/fr/info-ou-intox/lenergie-solaire/de-la-lumiere-a-lelectricite/.](https://www.photovoltaique.info/fr/info-ou-intox/lenergie-solaire/de-la-lumiere-a-lelectricite/)
- [9] Site web : [https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/avantages-inconvenients.](https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/avantages-inconvenients)
- [10] Site web : <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-10-hqe/position-geometrique-soleil.php>
- [11] Site web : [https://www.cder.dz/download/ICRESD07\\_49.pdf.](https://www.cder.dz/download/ICRESD07_49.pdf)
- [12] David Lubitz William (2011). "Effet des ajustements manuels d'inclinaison sur l'irradiance *incidente sur les panneaux solaires fixes et de suivi*". *Énergie appliquée* . 88 (5): 1710–1719. doi : 10.1016 / j.apenergy.2010.11.008 .
- [13] David Cooke, avril 2011 "Suivi solaire simple contre double axe" , *eMagazine d'énergie alternative* ,
- [14] BENDIB, T., Barkat, B., Djefal, F., Hamia, N., & Nidhal, A. (2008). Commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes à base d'un microcontrôleur PIC16F84A. *Journal of Renewable Energies*, 11(4), 523-532.
- [15] SINI BOUKROUT ABD EL RAOUF , LAMRI Mohamed Lamine (2017) Etude et conception d'un suiveur du soleil pour un générateur, *Projet de fin d'étude, Université A. M. OULHADJ – Bouira.*
- [16] KADDOURI, M. A. (2015). Conception et réalisation d'un suiveur solaire à deux axes. *Projet de fin d'étude, Université sidi Mohammed ben Abdallah, Fès, Maroc.*
- [17] AZZI OMAR ,Ben bahan youcef lundi 14 septembre 2020 Thème Réalisation d'un système de Suiveur à base arduino .*Projet de fin d'étude, Université Mohamed Khider de Biskra*
- [18] MEKRELOUF ALI ,BENYAMINA Abderrahmen (2011) thèse étude et réalisation d'un système suiveur, *mémoire d'un fin d'étude, Université de HASSIBA BEN BOUALI – CHLEF*

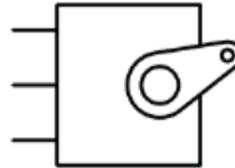
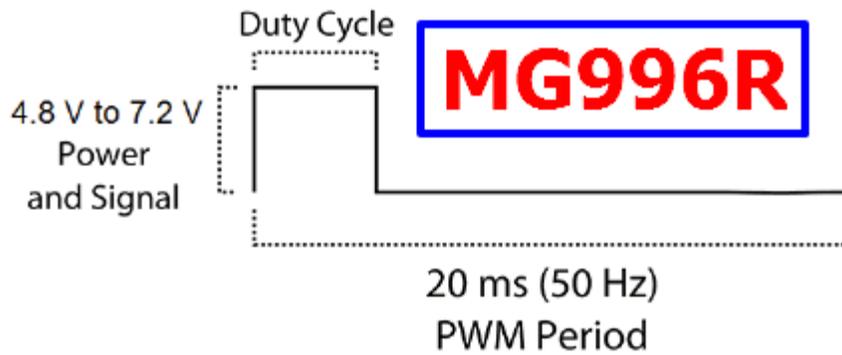
- [19] BENZAHIA, A. (2014) Réalisation d'un prototype d'un système de poursuite solaire (Master's thesis) *mémoire d'un fin d'étude, Université Mohamed Khider Biskra.*
- [20] BAHY, K., & BENNESSAR, K. (2020). Simulation numérique de poursuite solaire d'un héliostat *mémoire d'un fin d'étude, Ecole Supérieure des Sciences Appliquées Tlemcen.*
- [21] BEN GHEDIER, I. (2020). Etude et commande d'un suiveur solaire par un système de contrôle distribué des abb ac 500 (*doctoral dissertation*). *Université de Ghardaïa.*
- [22] MEZIANE, M., & Benkara, S. (2021). Conception Et Réalisation D'un Système Photovoltaïque A Base D'une Carte Arduino. *mémoire d'un fin d'étude, Université Larbi Ben M'hidi - Oum El bouaghi.*
- [23] MR BOUZIANE RABEH, Dokkar Ayoub, ,(2016= « Conception et Réalisation d'un Suiveur Solaire Bi-axial à Base De capteurs de lumière » *Projet de fin d'étude, Université Kasdi Merbah Ouargla.*
- [24] GOILAV, N., & Loi, G. (2016). Arduino. Apprendre a desarrollar para crear objetos inteligentes.
- [25] CHRISTIAN TAVERNIER, ,( 2011) Arduino Maîtriser sa programmation et ses cartes d'interface (shields), DUNOD , Paris.
- [26] Site web : <https://studylibfr.com/doc/3161765/la-carte-arduino-uno>
- [27] Site web : <https://stringfixer.com/fr/ATmega328>
- [28] Site web : <https://www-lisic.univ-littoral.fr/~hebert/microcontrolleur/atmel/>
- [29] Dominique, Guillaume, Jean-Luc, Thierry,( 10 janvier 2016 )La carte Arduino Uno
- [30] Site web : <https://jagelectronicsenterprise.com/product/usb-cable-for-arduino-uno-mega/>
- [31] site web: <http://www.gotronic.fr/art-carte-arduino-uno-12420.htm>.
- [32] site web: <https://www.engineeringchoice.com/servo-motor/>
- [33] site web: [https://zestedesavoir.com/tutoriels/686/arduino-premiers-pas-en-informatique-embarquee/747\\_le-mouvement-grace-aux-moteurs/3438\\_un-moteur-qui-a-de-la-tete-le-servomoteur/](https://zestedesavoir.com/tutoriels/686/arduino-premiers-pas-en-informatique-embarquee/747_le-mouvement-grace-aux-moteurs/3438_un-moteur-qui-a-de-la-tete-le-servomoteur/)
- [34] site web: <https://thinkrobotics.in/products/standard-metal-servo-mg996>
- [35] site web: <https://izi-by-edf.fr/blog/domino-electrique-choisir/>.
- [36] site web: <https://www.microjpm.com/products/wire-jumper-macho-a-macho-20cm-40-lineas/>



La figure A.1 : ARDUINO UNO



PWM = Orange (  $\square$  )  
 Vcc = Red ( + )  
 Ground = Brown ( - )

La figure A.2 : Servomoteur MG996R