



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure 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 de Maintenance en Instrumentation**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Maintenance en instrumentation

**Spécialité :** Génie Industriel

### **Thème**

**Détection intelligente et stockage automatique de  
l'énergie renouvelable avec Arduino.**

Présenté et soutenu publiquement par :

Chekkai Ahmed

et

Larabi Isaam Eddine

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
Otsmani Zineb	MCA	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Présidente</b>
Chennoufi mohammed	MCA	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Encadreur</b>
Lalaoui mohammed amine	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Examineur</b>

**Année 2020/2021**

## Remerciement

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté de réaliser ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr **Chennoufi Mohammed**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent au père Mr **Larabi Benali** et l'oncle Mr **Korso Tlemsani Ilies** pour leurs suivit, aide pratique et leurs soutient moral et ses encouragements, sans oublier Mr **Lalaoui Mohamed** pour son expérience sa compréhension et son soutien moral.

Nos remerciements s'adressent au groupe des ingénieurs de société AoA qui nous a aidé par toute les moyenne par ses expériences pour notre réalisation

Nos remerciements s'adressent également à tous les enseignants de l'institut **IMSI** pour leurs études et formation scientifique durant toutes nos années dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

## **Dédicace**

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes parents Grâce à leurs encouragements et leurs grands sacrifices, j'ai pu réaliser mon rêve et leur rêve de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux. Je prie Allah de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A toute ma famille et mes petites sœurs Meriem, **Yousra**, **Ikram** et **Chiraz** .

A tous mes enseignants de parcours, leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A mon binôme **Ahmed Chekkai** et tous mes amis, Ils trouveront ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

**Issam Larabi.**

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

La mémoire de mon père **Hadj**, Ma langue s'est tue sans ce mot, et mon cœur saigne en évacuant ses maux , tu as été un papa singulier et extraordinaire, rien au monde ne pourra te remplacer, tu as tout sacrifié, tout donné, tu m'as beaucoup épaulé et constamment poussé et motivé pour arriver au sommet. Je n'ai jamais pu te dire à quel point je t'admirais, ... aujourd'hui tu n'es plus là, alors que j'ai si besoin de ta présence pour partager ce jour si spécial que t'as tant attendu avec impatience.

Repose en paix papa et sois fier de moi, je continuerai mon parcours avec tes précieux conseils que tu m'as toujours donné.

Aucune dédicace ne serait exprimée l'amour que je te porte, je ne t'oublierais jamais, merci d'avoir été le père que tu as été, puisse Dieu le tout puissant t'accorde sa miséricorde et t'accueille en son vaste paradis.

Ma mère **Nadjima** l'amour de ma vie, pour son amour, ses sacrifices, et son soutien tout au long de mes années d'études et d'apprentissage. Que ce travail soit le témoignage de tes prières, tes encouragements et tes précieux conseils, et de tous les efforts que tu n'as cessé de déployer pour mon éducation et mon instruction. Aucune dédicace ne serait exprimée le profond amour et admiration que je te porte.

A Mme **Benaïcha** qui m'a soutenu tout au long de mon parcours d'études, en me témoignant l'amour d'une maman à son fils, en me donnant le courage d'avancer au meilleur, merci.

Oncle **Ilies**, mon deuxième papa que j'aime beaucoup, ...merci pour ton soutien, et ton partage d'expérience de vie, ainsi qu'à tout l'aide et que

tu m'as concédé. Je te souhaite de tout mon cœur tout le bonheur du monde, et que Dieu t'accorde tes souhaits les plus cher.

Mon frère **Bekhtaoui Akram**, que je remercie pour son soutien, tu as été présent pendant les moments de joie et de tristesse, le frère idéal.

Je souhaite un excellent parcours et plein de succès dans ta carrière sportive et surtout ta vie professionnelle. Aucun mot ne saurait exprimer mon immense attachement, ma reconnaissance et mon profond amour et respect envers toi.

Mon petit frère **Bnaicha Abdelkader**, que je remercie pour tout le courage qu'il m'a témoigné, les bons et les moins bons moments qu'on a passé ensemble.

Je te souhaite tout le bonheur qui puisse être sur terre et surtout beaucoup de succès, tu es et tu as toujours été un vrai frère à mes yeux.

Mon cousin **Mazari Adel**, ma cousine **Yousra** et ma tante **Faiza** et **morad**.

Je vous remercie pour tous les efforts et l'amour que vous m'avaient constamment témoigné, je vous souhaite tous un très bon avenir plein de joie et de succès.

Je vous aime.

**Chekkai Ahmed**

## Résumé

L'optimisation du rendement des générateurs photovoltaïques (GPV) est une préoccupation indispensable. Le choix des matériaux par contre reste un sujet ouvert. En effet les contraintes ne sont pas les mêmes, mais, l'objectif reste inchangé, à savoir optimiser au mieux la quantité des rayons incidents sur les panneaux.

Notre Projet ayant comme objectif d'avoir un rendement optimal d'énergie électrique en améliorant le gain d'absorption de l'énergie solaire par les panneaux photovoltaïques en les rendant mobile.

Notre maquette a été réalisée selon le principe de la poursuite de trajectoires solaire. Pour ce faire nous avons utilisé deux servomoteurs afin de corriger le positionnement du panneau photovoltaïque, des cellules photorésistances de type 'LDR' pour détecter l'intensité optimale du rayonnement solaire.

Une deuxième alternative est conçue et réalisée selon une approche temporaire implicite et programmée qui inclut le parcours dynamique du soleil annuel et journalier.

Les signaux issus des capteurs sont transmis aux entrées d'un microcontrôleur de type <Arduino UNO> qui permet la comparaison des niveaux de tensions et exécute le programme en conséquence pour la deuxième réalisation afin de commander les deux servomoteurs. En outre, il permet une orientation optimale du panneau vers le soleil.

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

Mots clés : suiveur solaire, système de photorésistance, panneau solaire, Arduino, Méthode UML, Simulation suiveur.

## Abstract

Optimizing the efficiency of photovoltaic generators (PVGs) is an essential concern.

However, the choice of materials to be used remains an open subject. Indeed, the constraints are not the same, but the objective remains unchanged, i.e. to optimize the quantity of incident solar radiation on the panels as much as possible.

Our Project objective is to have an optimal yield of electrical energy by improving the gain of absorption of solar energy by the photovoltaic panels by making them mobile.

Our model was produced according to the principle of following solar trajectories. To do so, we used two servomotors to correct the positioning of the photovoltaic panel, photoresistor cells of the "LDR" type to detect the optimal intensity of solar radiation.

A second alternative is conceived and realized according to an implicit and programmed temporary approach which includes the dynamic course of the annual and daily sun.

The signals from the sensors are transmitted to the inputs of the microcontroller <ArduinoUNO> which allows the comparison of the voltage levels and executes the program accordingly for the second embodiment in order to control the two servomotors. In addition, it allows an optimal orientation of the panel towards the sun.

Finally, the system we have created is able to faithfully follow the position of the Sun. In addition, it increases the efficiency of the mobile solar panel compared to the fixed system, the results have been satisfactory.

Keywords: solar tracker, photoresistor system, solar panel, Ardouino, UML method, Tracker simulation.

## Tables des matières

Résumé .....	I
Tables des figures .....	VII
Tables des tableaux .....	IX
Abreviation .....	X
Introduction generale .....	1

### Chapitre 1 : Généralité sur les énergies non renouvelable et renouvelable

I.1 Introduction.....	7
I.2 Energie et environnement.....	7
I.2.1 définition de l'Energie.....	7
I.2.2 Types d'énergie et leurs transformations.....	7
I.2.2.1 Energie potentielle.....	8
I.2.2.2 Energie cinétique.....	8
I.3 sources d'énergie.....	9
I.3.1 L'énergie non renouvelable.....	9
I.3.1.1 Les principale sources d'énergie non renouvelable.....	9
I.3.2 l'énergie renouvelable.....	12
I.4 relation énergie / environnement.....	15
I.4.1 effet de serre.....	15
I.4.2 conséquences de l'effet de serre.....	16
I.4.3 impact environnemental par source d'énergie.....	17
I.5 Etat des ressources énergétiques mondial.....	18
I.5.1 sources fossiles.....	19
I.5.2 sources renouvelable.....	20
I.6 Conclusion.....	20

### Chapitre 2 : Énergie solaire, Son exploitation, Suiveur solaire

II.1 Introduction.....	22
II.2 Energie solair.....	22
II.2.1 rayonnement solaire.....	22
II.2.2 rayonnement extraterrestre.....	22
II.2.3 mouvement de globe terrestre.....	24
II.2.4 irradiation solaire incidente.....	24
II.2.5 composantes du rayonnement solaire incident.....	25
II.2.5.1 rayonnement direct.....	25
II.2.5.2 rayonnement diffue.....	25
II.2.5.3 rayonnement réfléchi.....	26

II.2.5.4 indices de clarté KT.....	26
II.2.5.5 durées d'isolation.....	26
II.2.6 coordonnées géographiques terrestres.....	27
II.2.6.1 Latitude ( $\varphi$ ).....	27
II.2.6.2 Longitude (L).....	27
II.2.6.3 Altitude.....	28
II.2.7 Position du soleil.....	28
II.2.7.1 systèmes de coordonnées horaires.....	28
II.2.7.2 Angles et mouvements solaire.....	29
II.2.7.2.1 Déclinaison du soleil ( $\delta$ ).....	29
II.2.7.2.2 Angle horaire du soleil ( $\omega$ ).....	30
II.2.7.3 coordonnées horizontales.....	31
II.2.7.3.1 hauteur du soleil (H).....	31
II.2.7.3.2 Azimut du soleil ( $\alpha$ ).....	32
II.3 Historique du photovoltaïque.....	33
II.4 L'effet photovoltaïque.....	33
II.4.1 différents types de systèmes photovoltaïque.....	34
II.4.1.1 Installation électrique des plaque photovoltaïques autonomes.....	34
II.4.1.2 centrales électrique photovoltaïque raccordées au réseau.....	36
II.4.1.3 centrales électrique photovoltaïque hybride.....	36
II.5 les différents types de panneaux solaires photovoltaïques.....	36
II.5.1 Les cellules amorphes.....	36
II.5.2 les cellules monocristallines.....	37
II.5.3 les cellules polycristallines.....	37
II.6 Le rendement d'un panneau photovoltaïque.....	38
II.6.1 puissance produite.....	38
II.6.2 positionnement.....	39
II.6.3 positionnement (angle d'inclinaison).....	39
II.7 suiveur solaire.....	40
II.7.1 les premières utilisations.....	40
II.7.2 principes fondamentaux de traqueurs solaires.....	41
II.7.3 types courant de traqueurs.....	41
II.7.3.1 suiveur passif.....	42
II.7.3.2 suiveur actif.....	42
II.7.4 traqueur en boucle ouverte.....	43
II.7.5 traqueur en boucle fermée.....	43
II.7.6 les traqueurs synchronisés.....	44
II.8 Méthode de poursuite.....	44
II.8.1 principe général.....	44
II.8.2 tracker mono-axe.....	45
II.8.2.1 disposition des capteur LDR.....	47
II.8.3 tracker double axe.....	47
II.9 L'intérêt des panneaux mobiles par rapport aux panneaux fixes.....	50
II.10 Stockage de l'énergie.....	50

II.10.1 description d'une batterie.....	50
II.10.2 description des différents types de batteries utiliser dans le stockage d'énergie.....	51
II.10.2.1 les batteries au plomb.....	51
II.10.2.2 les batteries 'plomb ouvert'.....	51
II.10.2.3 La batterie AGM.....	52
II.10.2.4 la batterie Gel.....	53
II.10.2.5 La batterie lithium.....	54
II.11 les critères déterminants pour choisir une batterie solaire.....	56
II.11.1 La capacité de stockage.....	56
II.11.2 la profondeur de décharge.....	56
II.11.3 l'espérance de vie.....	56
II.12 Conclusion.....	57

### **Chapitre 3 : Conception et simulation**

III.1 Introduction.....	59
III.2 définition du langage UML.....	59
III.3 L'utilisation du langage UML.....	59
III.4 formalisme du langage UML.....	60
III.4.1 Vues.....	60
III.4.2 Diagrammes.....	61
III.4.2.1 Diagramme de structure ou diagramme statique.....	62
III.4.2.2 Diagramme d'interaction ou diagramme dynamique.....	62
III.5 Les diagramme utilisés dans notre projet.....	63
III.5.1 Diagramme de cas d'utilisation (use case).....	63
III.5.1.1 Définition.....	63
III.5.1.2 Les acteurs.....	64
III.5.1.3 Les différentes catégories des acteurs.....	65
III.5.1.4 Les relations.....	65
III.5.2 Diagramme de séquence.....	66
III.5.2.1 Définition.....	66
III.5.2.2 Dialogue entre les objets.....	67
III.5.2.3 Cadre d'interaction.....	68
III.6 Conception du fonctionnement en utilisant le diagramme de use case.....	69
III.6.1 Arduino.....	69
III.6.2 Capteur.....	70
III.6.3 servo-moteur.....	70
III.7 Conception du fonctionnement en utilisant le diagramme de séquence.....	71
III.7.1 Modélisation 1 : Un seul capteur et détection de trajectoire.....	71
III.7.1.1 Les codes utilisés.....	72
III.7.2 Modélisation 2 : Utilisation de quatre (4) capteurs dans notre suiveur.....	73
III.7.2.1 Les codes utilisés.....	74
III.8 Simulation du fonctionnement en utilisant le logiciel Proteus 8 professionnel.....	75
III.8.1 Définition du logiciel Proteus.....	75
III.8.2 ISIS.....	76

III.8.2.1 Sélection des composants à utiliser.....	76
III.8.3 Simulation 1 : un seul capteur et détection du trajectoire.....	77
III.8.3.1 Principe de fonctionnement.....	77
III.8.4 Simulation 2 : Utilisation de 4 capteurs dans notre suiveur.....	78
III.8.4.1 Principe de fonctionnement.....	78
III.9 Conclusion.....	79

## **Chapitre 4 : Réalisation**

IV.1 Introduction.....	81
IV.2 Les composants électronique utiliser dans la réalisation.....	81
IV.2.1 La carte Arduino UNO.....	81
IV.2.1.1 Constitution de la carte Arduino UNO.....	82
IV.2.2 Capteurs de lumière LDR.....	85
IV.2.3 Servomoteur.....	86
IV.2.3.1 Fonctionnement interne du servomoteur.....	87
IV.2.4 Câblages.....	89
IV.2.4.1 Câble USB.....	89
IV.2.4.2 Fils de pin d'Arduino.....	89
IV.2.5 Plaque d'essai.....	90
IV.2.6 Panneau solaire 6v/1w.....	90
IV.3 Description des composants mécanique utilisés.....	91
IV.4 Réalisation du suiveur solaire.....	92
IV.4.1 Assemblage mécanique.....	93
IV.5 Programmation .....	94
IV.5.1 Programmation 1.....	94
IV.5.2 Programmation 2.....	96
IV.5.3 Assemblage électronique.....	97
IV.6 Conclusion.....	98
Conclusion générale et perspective.....	99
Annexe .....	101
Nomenclature.....	105
Bibliographies.....	106

## Liste des figures :

Figure I.1 : sources d'énergies primaires et leurs transformations.....	8
Figure I.2 : Energie non renouvelable.....	9
Figure I.3 : Energie solaire.....	12
Figure I.4 : Energie hydraulique.....	13
Figure I.5 : Energie éolienne.....	14
Figure I.6 : Schéma du processus effet de serre.....	15
Figure I.7 : Réserves de charbon dans le monde.....	19
Figure I.8 : Part des énergies renouvelable dans la consommation.....	20
Figure II.1 : Les différentes zones énergétiques dans l'Algérie.....	23
Figure II.2 : Variation saisonnière du rayonnement solaire.....	24
Figure II.3 : Rayonnement solaire extraterrestre et incident.....	25
Figure II.4 : Composantes du rayonnement solaire incident.....	26
Figure II.5 : Latitude( $\varphi$ ) et Longitude(L).....	28
Figure II.6 : Déclinaison du soleil( $\delta$ ).....	29
Figure II.7 : Equinoxes.....	30
Figure II.8 : Angle horaire ( $w$ ).....	31
Figure II.9 : Coordonnées horizontal du soleil( $H, \alpha$ ).....	32
Figure II.10 : Coupe transversale d'une cellule PV typique.....	34
Figure II.11: Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.....	35
Figure II.12 : installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau.....	36
Figure II.13 : Cellule Amorphe.....	37
Figure II.14 : Cellule Monocristalline.....	37
Figure II.15 : Cellules Polycristallines.....	38
Figure II.16 : Dépendance des performances d'un panneau PV de l'angle $\alpha$ .....	39
Figure II.17 : Représentation de l'angle d'inclinaison $\alpha$ .....	39
Figure II.18 : Modèle d'un héliostat dans ses premières applications.....	40
Figure II.19 : Exemple et fonctionnement du suiveur passif.....	42
Figure II.20 : Exemple et fonctionnement du suiveur actif.....	43
Figure II.21 : Principe général de la commande du tracking.....	44
Figure II.22 : Schéma synoptique de la technique du tracking.....	45
Figure II.23 : Représentation des plans 1 et 2 séparent les LDR.....	45
Figure II.24 : Organigramme de la méthode de suivi mono-axe.....	46
Figure II.25 : Disposition des capteurs LDR pour un tracker mono-axe.....	47
Figure II.26 : Vue d'un haut de la disposition des quatre capteurs LDR.....	48
Figure II.27 : Organigramme de la méthode de suivi double axe.....	49
Figure II.28 : Diagramme de comparaison de la production avec suiveur .....	50
Figure II.29 : Batteries plomb ouvert.....	51
Figure II.30 : Batteries solaire AGM.....	53
Figure II.31 : Batteries solaire Gel.....	54

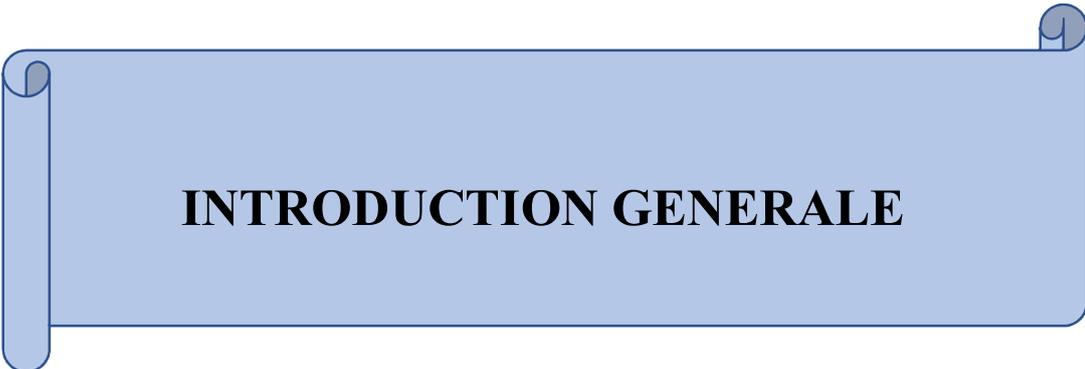
Figure II.32 : Batteries solaire lithium de LG.....	56
Figure III.1 : Différent diagramme de la méthode UML.....	62
Figure III.2 : Diagramme de cas d'utilisation (use case).....	64
Figure III.3 : Types de relation du diagramme use case.....	65
Figure III.4 : Représentation graphique du diagramme de séquence.....	67
Figure III.5 : Présentation des actions de l'Arduino diagramme de cas d'utilisation.....	69
Figure III.6 : Présentation des actions du capteur diagramme de cas d'utilisation.....	70
Figure III.7 : Présentation des actions de servomoteur diagramme de cas d'utilisation.....	70
Figure III.8 : Présentation de la première modélisation avec le diagramme de séquence....	71
Figure III.9 : Présentation de la deuxième modélisation avec le diagramme de séquence..	73
Figure III.10 : Interface de logiciel PROTEUS.....	75
Figure III.11 : Interface de sélection des composants .....	76
Figure III.12 : Présentation première simulation première avec PROTUS.....	77
Figure III.13 : Présentation deuxième simulation première avec PROTUS.....	78
Figure IV.1 : Action avec Arduino.....	81
Figure IV.2 : Les composants de la carte Arduino.....	83
Figure IV.3 : Boutons de l'interface logicielle Arduino.....	84
Figure IV.4 : Capteur de lumière LDR.....	85
Figure IV.5 : Servomoteur MG90S.....	87
Figure IV.6 : Signal de contrôle.....	88
Figure IV.7 : Basics cable USB 2.0 A-male vers B-male.....	89
Figure IV.8 : Fils de pin d'Arduino.....	89
Figure IV.9 : Plaque d'essai sans soudure.....	90
Figure IV.10 : panneau photovoltaïque.....	91
Figure IV.11 : Le dispositif mécanique.....	92
Figure IV.12 : Le schéma fonctionnel du suiveur.....	92
Figure IV.13 : Matériel utiliser pour l'assemblage.....	93
Figure IV.14 : L'assemblage final.....	94
Figure IV.15 : Organigramme général de la poursuite solaire à base d'Arduino UNO.....	95
Figure IV.16 : Organigramme de la poursuite solaire à deux axes pour la première réalisation.....	95
Figure IV.17 : Organigramme de la poursuite solaire à deux axes pour la deuxième réalisation.....	96
Figure IV.18 : Assemblage électronique des deux réalisations sur PROTEUS.....	97
Figure IV.19 : Produit finale.....	98

## Liste des Tableaux:

Tableau I.1 : principaux gaz à effet de serre.....	16
Tableau IV.1 : Caractéristiques techniques de la carte Arduino UNO.....	83
Tableau IV.2:Caractéristiques du servo moteur utilisée .....	87

# Abréviation

PV	panneau photovoltaïque
PEP	La puissance électrique produite par le panneau PV
PSR	La puissance solaire reçue
LDR	Light dependent resistor
UML	Unifie Modeling Langage
use-case	cas d'utilisation
DCU	Les diagrammes de cas d'utilisation
ARD	Arduino
D	Donnée
CP	Capteur
EN	Enregistrement
SM	Servo moteur
OPT (Condition)	Si valeur de LDN $\geq$ seuil Alors Autorisation de système accordée
CH-PA	Chargement de planning annuel
Trj	Trajectoire
Par	Parallèle traitement
Ex-MV-V	Exécution du mouvement Vertical
Ex-MV-H	Exécution du mouvement Horizontal
R	Rotation
MVM	Mouvement
Loop	c'est une Boucle



# **INTRODUCTION GENERALE**

Le soleil nous fournit plus d'énergie que nous ne pourrions jamais utiliser, et personne ne peut monopoliser la lumière du soleil. Un système d'énergie solaire commencera à économiser de l'argent à partir du moment où il sera allumé, mais les avantages de l'énergie solaire sont mieux visibles à long terme. Plus votre système d'énergie solaire est long, plus vous bénéficiez des avantages de la technologie solaire et respectez l'environnement.

L'énergie solaire est synonyme d'indépendance énergétique. L'électricité traditionnelle dépend fortement des combustibles fossiles tels que le charbon et le gaz naturel. Non seulement ils sont mauvais pour l'environnement, mais ce sont aussi des ressources limitées. Cela se traduit par un marché volatil, dans lequel les prix de l'énergie varient tout au long de l'année. Le soleil n'augmentera jamais ses tarifs et vous offre une sécurité énergétique.

Outre les avantages financiers évidents, il existe d'autres raisons pertinentes pour lesquelles on devrait se convertir à l'énergie solaire au lieu des combustibles fossiles. Le fait le plus connu de l'énergie solaire est qu'elle représente une source d'énergie propre et verte. L'énergie solaire ne dégage pas de gaz à effet de serre. C'est une source d'énergie écologique.

L'économie des états peut aussi être aidée par l'énergie solaire. Plus les gens optent pour le solaire, plus les entreprises auront besoin d'installer des panneaux solaires. Cela crée des emplois supplémentaires pour les travailleurs qualifiés et, par conséquent, maintient la croissance de l'économie. En 2015, le Royaume-Uni est devenu le deuxième plus grand employeur solaire après les états Unis d'Amérique, avec 35 000 personnes, et le plus grand marché d'installation de panneaux solaires photovoltaïques (PV) du continent européen.

La transition énergétique est incontournable, elle est à la fois un sujet politique, économique, et écologique. En effet, à l'heure actuelle, le réchauffement climatique est l'une des plus grandes inquiétudes, car les modifications du climat affectent les activités humaines, et les conséquences se font sentir à tous les niveaux.

En tant qu'être humain est responsable de ses émissions en CO<sub>2</sub>. La recherche des ressources d'énergie alternatives est devenue donc une question cruciale de nos jours. Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées, non seulement, dans le domaine de la production d'énergie nucléaire, mais également dans le secteur des sources d'énergie illimitées, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation d'énergie solaire. Dans ce dernier cas, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Pour une installation photovoltaïque, la variation de 50 % de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur PV de l'ordre de 50 % ; en plus le générateur PV ne fonctionne plus dans les conditions optimums.

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

Les traqueurs solaires sont conçus et construits pour optimiser le rendement de puissance des modules PV en s'assurant qu'ils sont inclinés vers le soleil à tout moment pendant la journée.

Les multi systèmes de suiveurs solaires ont été utilisées pour une large application incluant : des cellules solaires photovoltaïques, des concentrateurs solaires et des télescopes.

Ce travail présente la conception et l'exécution d'un algorithme de commande pour une structure mécanique à prix réduit qui peut soutenir les modules photovoltaïques et qui agit en tant que traqueur du soleil.

Plusieurs classes de structure peuvent être distinguées selon les critères de classification : Concernant des possibilités de mouvement, trois types principaux de

traqueurs du soleil existent : surfaces fixes, traqueurs un axe et traqueurs deux axes. La différence principale parmi eux est la capacité de réduire l'erreur d'orientation, en augmentant l'irradiation quotidienne que PVs reçoivent et, ainsi, l'énergie électrique qu'elles produisent.

Une étude comparative théorique entre l'énergie produite par le biais d'un traqueur à deux axes, à un traqueur équatorial et à surface fixe est présentée. Le bilan résultant démontre que l'énergie annuelle disponible au traqueur à deux axe est plus haute de 5-10% et 50% que le traqueur équatorial et la surface fixe, respectivement. Concernant les unités de commande, 10 conceptions de traqueurs solaires sont proposées, et le fonctionnement de la plupart dépend de capteurs (en boucle fermée), et le contrôle de temps (en boucle ouverte). La première conception exige que la position du soleil soit déterminée par des capteurs de photocellules, et la précision de ce type de commande dépend du nombre de capteurs dans tous les sens, tandis que la plus récent comporte la détermination locale (latitude et longitude) du site de l'installation, ainsi que le jour et la période à l'aide des équations qui déterminent la trajectoire solaire dans le ciel.

Par conséquent, nous avons opté pour une conception qui consiste en une combinaison entre : la stratégie de suivi en boucle fermer et on boucle ouvert.

A cet effet, Le travail présenté dans ce mémoire porté sur l'étude, la conception et la réalisation d'un tel système. Pour ce faire, nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante : Dans le premier chapitre nous nous intéresserons aux différents types et sources d'énergie, ainsi que la relation entre l'énergie et l'environnement.

Au deuxième chapitre nous aborderons des généralités sur l'énergie solaire est son rayonnement, puis ça trajectoire, ainsi qu'aux différents paramètres pouvant servir à décrire la trajectoire du Soleil dans le ciel avant d'établir les fondamentaux de la technologie photovoltaïque. Nous terminerons ce chapitre en parlant de la technique de suivi solaire ainsi que ses différents types techniques.

Au troisième chapitre nous présenterons une conception complète de notre suiveur solaire à base d'Arduino en utilisant la méthode UML, ainsi que la simulation Proteus.

Le dernier chapitre est consacré à la réalisation de notre système de suivi solaire. En effet, on présentera, en détails, les différentes étapes de sa construction, installation, et puis les tests effectués.

Notre travail de mémoire sera clos avec une conclusion générale qui contiendra, une proposition de réalisation des modules additifs.

# Chapitre 1:

Généralité sur les énergies non  
renouvelable et renouvelable

## **I.1 Introduction :**

La lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et la protection de l'environnement rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables en est la principale solution.

Une source d'énergie est dite renouvelable si elle se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Parmi ces sources, la plus connue et la plus rentable dans le monde est certainement l'énergie solaire, qui se constitue elle-même de différentes filières technologiques. Dans notre mémoire, nous nous focalisons sur la technologie photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous commencerons par la présentation de quelques notions générales autour de l'énergie, les différents types d'énergie et leur impact sur l'environnement.

## **I.2 Energie et environnement :**

### **I.2.1 Définition de l'énergie :**

Les physiciens emploient le terme d'énergie pour désigner une capacité à modifier un état ou à produire un travail entraînant un mouvement ou générant un rayonnement électromagnétique de la lumière ou de la chaleur. Le mot vient d'ailleurs du grec et signifie « force en action ».

Dans le système international, l'énergie s'exprime en joules, mais dans le langage courant, elle s'exprime plus souvent en kilo watt-heure (kWh). Quant à la tonne d'équivalent pétrole (tep), elle permet généralement de comparer les différentes sources d'énergie entre elles.

Il est à noter que, selon le premier principe de la thermodynamique, l'énergie d'un système fermé se conserve.

### **I.2.2 Types d'énergie et leurs transformations :**

L'énergie existe sous différentes formes : énergie rayonnante, énergie chimique, mécanique, thermique, électrique, nucléaire, hydraulique, éolienne, ...etc. Mais généralement, on peut catégoriser l'énergie en deux grandes familles :

### I.2.2.1 Energie Potentielle :

L'énergie potentielle d'un objet est le travail extérieur fourni à ce dernier pour l'amener, à vitesse constante, d'un point de référence à énergie potentielle nulle, au point considéré [1].

#### Exemple :

Energie chimique (l'énergie stockée dans les liaisons des atomes et des molécules), énergie mécanique (l'énergie stockée dans les objets par la tension), énergie nucléaire (l'énergie stockée dans le noyau d'un atome), énergie gravitationnelle, ...etc. [2].

### I.2.2.2 Energie cinétique :

L'énergie cinétique est le mouvement des ondes, des électrons, des atomes, des molécules, des substances et de différents objets. On peut donner certains exemples : énergie radiante (énergie électromagnétique qui se déplace dans les ondes transversales), énergie thermique (la vibration et le mouvement des atomes et des molécules dans les substances), énergie électrique (l'énergie fournie par de minuscules particules chargées appelées électrons), ...etc. [2].

Dans un système fermé, l'énergie se conserve. On ne peut ni produire de l'énergie, ni la détruire, mais seulement la « transformer » d'une forme vers une autre (figure I.1), comme l'énonça Lavoisier.

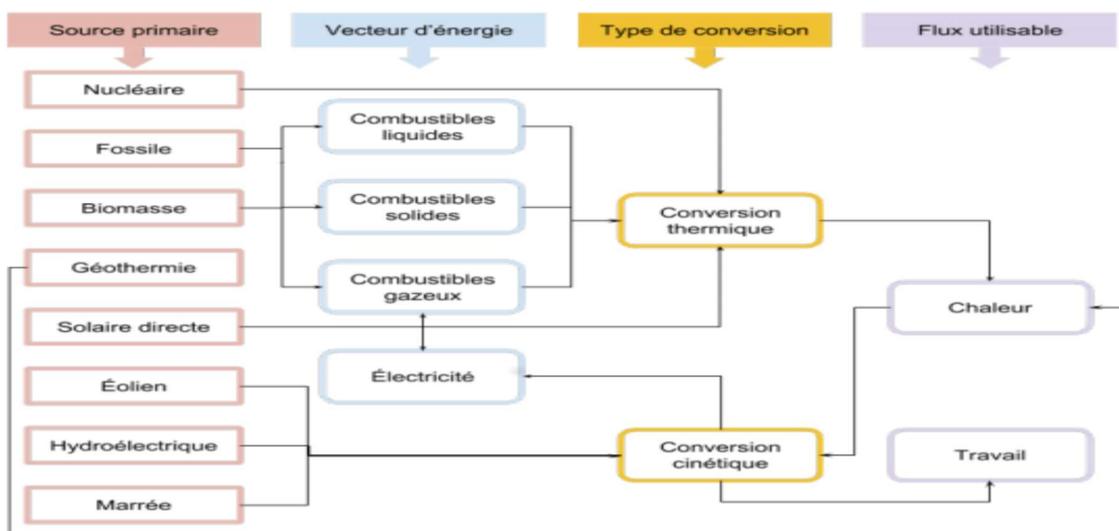


Figure I.1 : Sources d'énergies primaires et leurs transformations. [2]

### **I.3 Sources d'énergie :**

Les énergies sont également parfois classées en fonction de leur source. On peut parler des énergies fossiles tirées du charbon ou du pétrole, par exemple , de l'énergie nucléaire qui provient de réactions nucléaires , ou encore des énergies renouvelables, qui sont naturellement régénérées comme l'énergie solaire ou l'énergie éolienne.

#### **I.3.1 L'énergie non renouvelable**

Une énergie est dite non renouvelable si elle est produite à un rythme trop lent pour que son stock puisse être renouvelé à l'échelle d'une vie humaine. Les énergies non renouvelables engendrent de nombreux déchets et émettent des gaz à effet de serre.

Elles sont encore très utilisées car elles fournissent un très bon rendement énergétique.



*FigureI.2 : Energie non renouvelable.*

##### **I.3.1.1 Les principale source d'énergie non renouvelable :**

Ils se forment principalement à partir de la matière organique fossile piégée dans des strates sédimentaires et qui sous l'effet de la pression et de la température se transforme lentement (plusieurs millions d'années) en charbon, en pétrole et en gaz naturel.

Ces combustibles fossiles sont utilisés pour fournir de l'énergie thermique exploitée dans les moteurs des véhicules (essence provenant du pétrole), pour le chauffage domestique (gaz naturel), mais aussi pour la production d'électricité dans les centrales dites thermiques.

Le principal inconvénient de ces combustibles fossiles est l'émission, lors de leurs combustions, de dioxyde de carbone qui est l'un des gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique actuel.

- **Le charbon :**

Le charbon est un combustible fossile d'origine organique. Il est issu de la transformation lente de la biomasse en combustible particulièrement riche en carbone. On classe d'ailleurs le charbon en fonction de sa teneur en carbone. Il s'agit d'une des sources d'énergie les plus utilisées au monde.

- **Le gaz :**

Il s'agit d'une énergie non renouvelable composée de gaz type méthane retrouvé dans certaines roches. Le gaz naturel est fabriqué à partir de la décomposition d'anciens être vivants. Il constitue la troisième source d'énergie au monde.

- **Le pétrole :**

Vient du latin qui signifie huile et roche : il s'agit donc d'une huile minérale composée d'hydrocarbures piégés dans la roche. Le pétrole est l'une des sources d'énergie les plus utilisées au monde.

- **L'énergie nucléaire :**

L'énergie nucléaire est aussi une énergie non renouvelable car elle repose essentiellement sur la fission nucléaire de l'isotope 235 de l'uranium qui représente environ 0,70% de l'uranium naturel. (L'uranium est un élément radioactif présent dans le sous-sol de la Terre).

En France, le premier réacteur d'essai date de 1948. La France a développé l'exploitation de l'énergie nucléaire pour en faire sa principale source d'énergie (75% de la production française). Elle compte actuellement 58 réacteurs sur son territoire.

L'intérêt de l'énergie nucléaire est de produire de grandes quantités d'énergie sans émettre de gaz à effet de Serre.

Les principaux inconvénients de la fission nucléaire de l'uranium sont la production de déchets radioactifs ayant une longue durée de vie qu'il faut stocker de manière sécurisée sans compter le risque lié à une fuite de substance radioactive lors d'une catastrophe naturelle.

La fusion nucléaire est susceptible de constituer une source d'énergie plus propre et avec des réserves quasiment inépuisables mais les technologies nécessaires pour la mettre en œuvre ne sont pas encore maîtrisées.

➤ **La différence entre fission et fusion nucléaire :**

La fusion nucléaire consiste à rapprocher deux atomes d'hydrogène pour qu'ils « fusionnent » à des températures très élevées.

La molécule ainsi formée artificiellement est instable et le noyau d'hydrogène tente de retrouver sa forme stable, ce qui a pour effet d'éjecter un neutron et un atome d'hélium et ainsi de créer de l'énergie.

La fission nucléaire est un peu l'inverse : elle consiste à projeter un neutron sur un atome instable pour que celui-ci éclate en deux atomes plus légers.

L'exploitation de l'énergie nucléaire a engendré deux catastrophes majeures dans le monde : l'accident nucléaire de Tchernobyl et celui de la centrale de Fukushima D'Aichi.

La catastrophe nucléaire de Tchernobyl a eu lieu en 1986 en Ukraine. Elle a conduit à l'explosion d'un des réacteurs nucléaires pour donner suite à une augmentation incontrôlée de la puissance d'un réacteur. Cette augmentation a provoqué la fusion du cœur du réacteur.

L'explosion a généré un immense nuage radioactif causant de nombreux décès et maladies. Le monde porte encore les stigmates de cette catastrophe puisqu'aujourd'hui on utilise les traces de celle-ci pour dater par exemple le vin.

La catastrophe de Fukushima a eu lieu en 2011 au Japon. Pour donner suite à un tremblement de terre et un tsunami, le système de refroidissement de la centrale a été mis hors service entraînant la fusion du cœur de deux réacteurs. Il s'en est suivi des rejets massifs d'éléments radioactifs dans la nature.

• **Epuisement de stocks :**

L'épuisement des stocks de combustibles fossiles et d'uranium est inéluctable et les réserves disponibles seront entièrement utilisées dans une période de l'ordre du siècle, ce qui

rend indispensable le développement des énergies renouvelables qui sont pourtant encore largement minoritaire à l'heure actuelle.

### **I.3.2 L'énergie renouvelable :**

Une énergie est dite renouvelable si elle est d'origine naturelle et disponible de manière quasiment continue. Ses réserves ne diminuent pas ou se reconstituent à une échelle de temps humaine. Ces énergies sont des énergies propres car elles engendrent très peu de déchets.

Cependant, le principal frein au développement des énergies renouvelables est que ces énergies n'ont pas, pour l'instant, un fort rendement.

- **L'Energie solaire :**



*Figure I.3 : Energie solaire.*

Il s'agit de l'énergie qui nous est transmise par le Soleil sous forme de rayonnements. C'est elle qui permet la vie sur Terre puisque les végétaux, à base de toutes les chaînes alimentaires, utilisent cette énergie grâce au phénomène de la photosynthèse afin de produire les composés organiques élémentaires.

Elle peut être transformée en énergie électrique par les cellules photovoltaïques qui constituent les panneaux solaires ou au sein de centrales thermiques solaires (qui restent cependant assez rare mais qui commencent à se développer en Europe).

Il s'agit d'une source d'énergie particulièrement utile pour alimenter des habitations éloignées des grands réseaux de distribution électrique. On peut donc trouver différentes utilisations de l'énergie solaire : via des panneaux solaires thermiques qui chauffent directement un réservoir d'eau, via des centrales thermiques solaires permettant de stocker de l'énergie ou via des panneaux photovoltaïques.

- **L'énergie hydraulique :**

L'énergie hydraulique correspond à l'énergie que peut apporter les mouvements de l'eau, que ce soit sous forme d'énergie cinétique (par le biais de son mouvement lorsqu'elle s'écoule dans un fleuve ou lors de marées) ou que ce soit sous forme d'énergie potentielle (exploitée en montagne dans les chutes d'eau).

Les centrales hydrauliques peuvent donc fournir de l'énergie en utilisant les cascades d'eau naturelles, les chutes d'eau artificielles sous forme de barrage hydroélectrique mais aussi le débit de différents cours d'eau (eau douce ou eau de mer). Cette énergie ne produit pas ou très peu de gaz à effet de serre.

Il s'agit de l'énergie renouvelable la plus exploitée à l'heure actuelle. En France près de 13% de l'énergie est produite par l'énergie hydraulique.



*Figure 1.4 : Energie hydraulique.*

- **L'énergie éolienne**

Il s'agit de l'énergie cinétique lié au vent et donc aux mouvements de l'air. Le vent fait tourner les pâles de l'éolienne (au nombre de trois en général).

Ce mouvement mécanique est transformé en énergie électrique. Il s'agit d'une énergie en plein essor exploitée par le biais d'éoliennes. Cette technologie a été mise en service en France dès 1990. Actuellement, la France compte près de 4500 aérogénérateurs.

Il existe deux types d'éoliennes : les éoliennes terrestres dites « onshore » et les éoliennes marines ou « offshore ».

Les éoliennes terrestres sont implantées dans de grands sites ou parfois dans le cadre de petites exploitations. Les éoliennes marines fonctionnent de la même façon que les éoliennes terrestres mais sont construites de façons plus robustes pour pouvoir supporter les conditions climatiques maritimes difficiles.



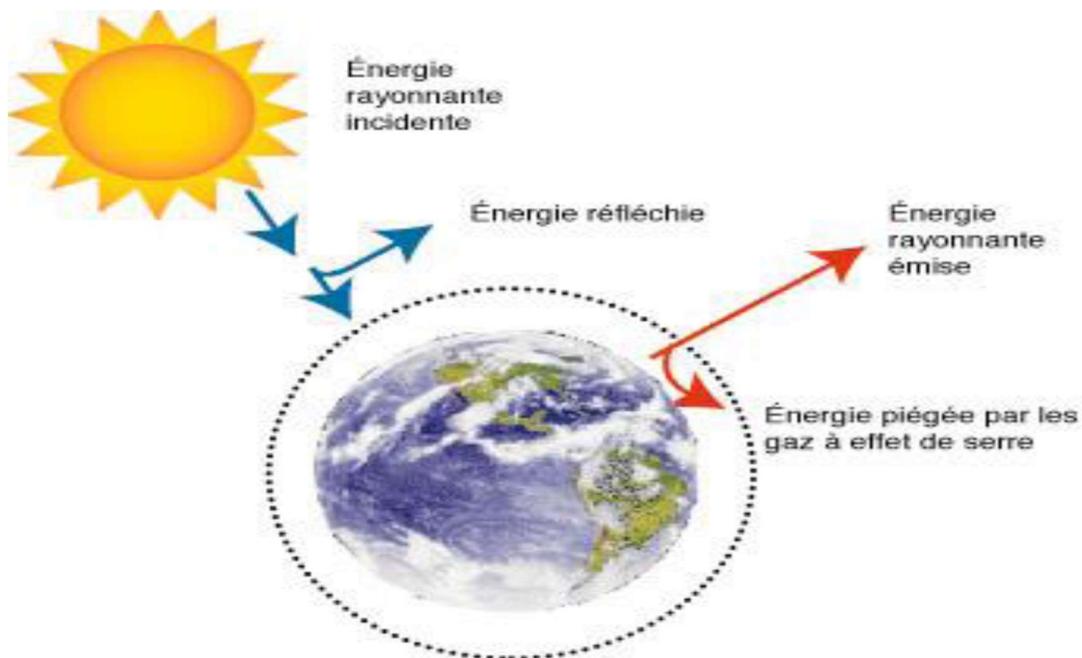
*Figure I.5 : Energie éolienne.*

## I.4 Relation énergie / environnement :

### I.4.1 Effet de serre :

L'expression « effet de serre » est employée usuellement dans le sens « D'effet de serre anthropique », qui désigne le réchauffement global du climat [3].

Le réchauffement de la surface de la Terre est dû au rayonnement émit par le soleil, ce rayonnement à savoir l'énergie solaire traverse directement l'atmosphère qui entoure la Terre et qui est absorbée, à moitié, pas cette dernière grâce aux gaz qui se trouvent dans l'atmosphère (l'autre moitié est réfléchi) (figure I.6). Cette absorption permet de conserver une partie de la chaleur, ce qui veut dire que ces gaz sont essentiels car sans eux, la température moyenne du globe serait de  $-18^{\circ}\text{C}$  au lieu de  $15^{\circ}\text{C}$  [4].



*Figure I.6 : Schéma du processus effet de serre.*

Cependant, à cause de l'activité humaine, cet équilibre naturel est perturbé ; D'avantage de gaz à effet de serre sont émis dans l'air (voir tableau I.1), Particulièrement le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ , ce qui a comme conséquence néfaste d'élever plus qu'il ne le faut la Température de notre globe Terrestre.

*Tableau I.1 : principaux gaz à effet de serre.*

<b>GAZ</b>	<b>Durée de vie</b>	<b>GAZ</b>	<b>Durée de vie</b>
<b>H2O</b>	<b>quelques jours</b>	<b>N2O</b>	<b>120 Ans</b>
<b>CH4</b>	<b>14 Ans</b>	<b>HFC</b>	<b>260 Ans</b>
<b>CFC</b>	<b>1000 Ans</b>		

Les principales causes anthropiques des émissions de gaz à effet de serre sont : L'utilisation de combustible fossiles, la déforestation, l'élevage intensif de bétail, L'utilisation d'engrais synthétiques et de procédés industriels, ...etc. [4]

#### **I.4.2 Conséquences de l'effet de serre :**

Le phénomène d'effet de serre a de nombreuses conséquences, les plus remarquées sont :

- **Sur la température :**

L'effet de serre a une influence sur la variation de la température du globe terrestre. En effet durant un siècle, le monde a enregistré une augmentation de la température d'environ 0.5°C [4], ce qui peut paraître peu mais on se rend déjà compte des dégâts causés observant les ressources naturelles.

- **Sur la nature :**

L'augmentation de la température provoque un déséquilibre et un bouleversement de la nature, par exemple : dans les zones qui sont déjà bien arrosées (pluie), les précipitations auront tendance à augmenter et inversement dans les zones les moins arrosées, les précipitations auront tendance à devenir rare, la disparition des îles et des espèces vivantes peut aussi être un des malheureux exemples qui témoignent des ravages de l'effet de serre sur la Terre.

### **I.4.3 Impact environnemental par source d'énergie :**

Pour quantifier l'impact environnemental des énergies, il faut s'intéresser au taux d'émission de CO<sub>2</sub> lors de la production d'électricité dans les systèmes dédiés à ça, mais également lors de la construction et du démantèlement de ces derniers [5].

Toute énergie utilisée actuellement possède plus ou moins un impact négatif sur l'environnement [6] :

- **Biocarburants (Biomasse, Éthanol et Biodiesel) :**

Il existe des cultures dédiées à la biomasse. Les plantes absorbent le CO<sub>2</sub> afin de grandir et de se régénérer. Cependant, pour les cultiver, nous utilisons des produits chimiques toxiques (pesticides et autres engrais) qui peuvent polluer le sol.

Charbon : Considéré comme la plus vieille source d'énergie sur notre planète, son extraction pollue la terre et l'eau, de plus sa combustion rejette des gaz nocifs dans l'air.

- **Géothermie :**

Dans ce secteur, aucune combustion n'est nécessaire pour produire de l'électricité, mais de minuscules quantités de CO<sub>2</sub> et de composés soufrés sont présents.

- **Hydroélectrique :**

La combustion n'est pas nécessaire pour la production d'électricité, mais l'implantation de centrales utilisant cette technologie peut nuire à la faune marine en influençant l'écoulement de l'eau.

- **Pétrole et gaz naturel :**

Actuellement, ce sont les deux sources d'énergies les plus utilisées dans le monde après le charbon. Malgré les progrès récemment réalisés pour avoir le moins d'impact possible sur les milieux naturels, les accidents de déversement du pétrole dans la nature, par exemple lors de son transport (camions citernes, bateaux ou pipelines), peuvent se produire et risquent de créer de grandes catastrophes écologiques (par exemple, la catastrophe de l'Erika en 1999). De plus, lors de la combustion, ces produits émettent du dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, et d'autres gaz toxiques qui contribuent à l'effet de serre.

- **Solaire :**

L'énergie solaire est une énergie propre car elle ne rejette aucun gaz à effet de serre. Cependant elle a un impact négatif indirect sur l'environnement durant la période de fabrication de capteurs solaires.

- **Énergie nucléaire :**

L'énergie nucléaire ne produit aucun rejet de CO<sub>2</sub>, mais reste néanmoins très dangereuse pour l'homme et pour l'environnement.

Les centrales nucléaires utilisent de grandes quantités d'eau, et une fois évacuée hors de la centrale, elle peut contenir des produits et polluants toxiques et nuire à l'environnement. En plus, ces derniers produisent des déchets radioactifs qui doivent être stockés dans des installations spécialement conçues, sans parler du risque d'explosion (par exemple, la catastrophe de Fukushima en 2011).

- **Vent :**

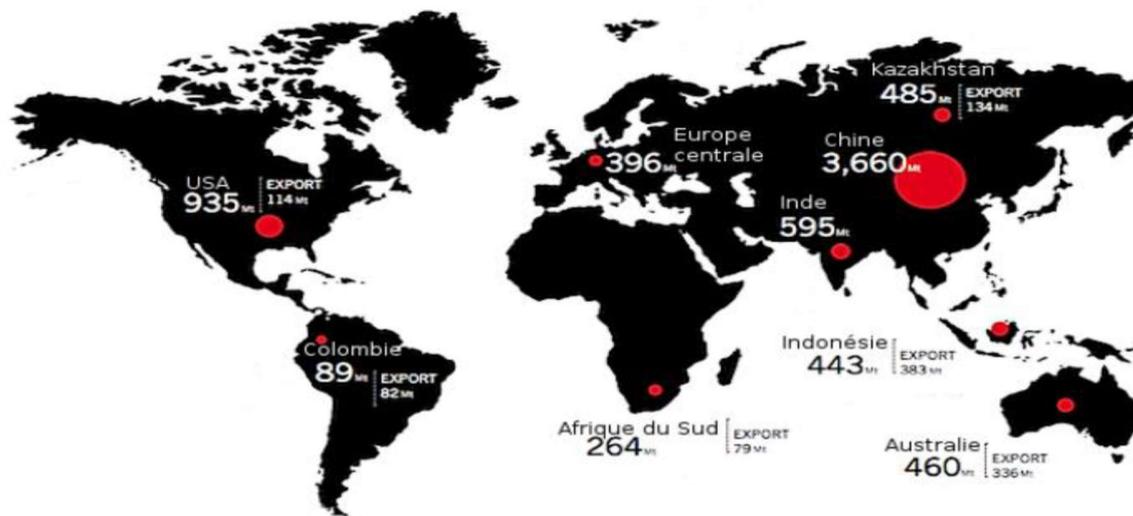
Le vent ne produit ni pollution atmosphérique, ni pollution aquatique, et ne consomme aucun combustible. L'impact environnemental de l'énergie éolienne (énergie du vent) se résume dans ses effets sur la mortalité des chauves-souris et autres oiseaux ainsi que la nuisance sonore qu'elle provoque, et tout comme le solaire, l'énergie utilisée et la pollution causée lors de la fabrication d'éoliennes peut être considérée comme un inconvénient.

### **I.5 Etat actuel des ressources énergétiques mondial :**

Dans le monde, chaque pays utilise les sources d'énergie qui lui y sont le plus accessible. La Chine, par exemple, utilise beaucoup le charbon pour faire fonctionner ses centrales afin de produire de l'électricité. La France, quant à elle, a misé sur l'énergie nucléaire pour satisfaire ses besoins en termes d'énergie et l'Algérie, ayant d'importantes réserves de pétrole et de gaz naturel, se repose presque entièrement sur ces sources fossiles pour subvenir à ses besoins énergétiques [6].

### I.5.1 Sources fossiles :

Le charbon est aujourd'hui la source d'énergie la plus utilisée pour la production d'électricité dans le monde, notamment en Chine (80%) et en Inde (68%).



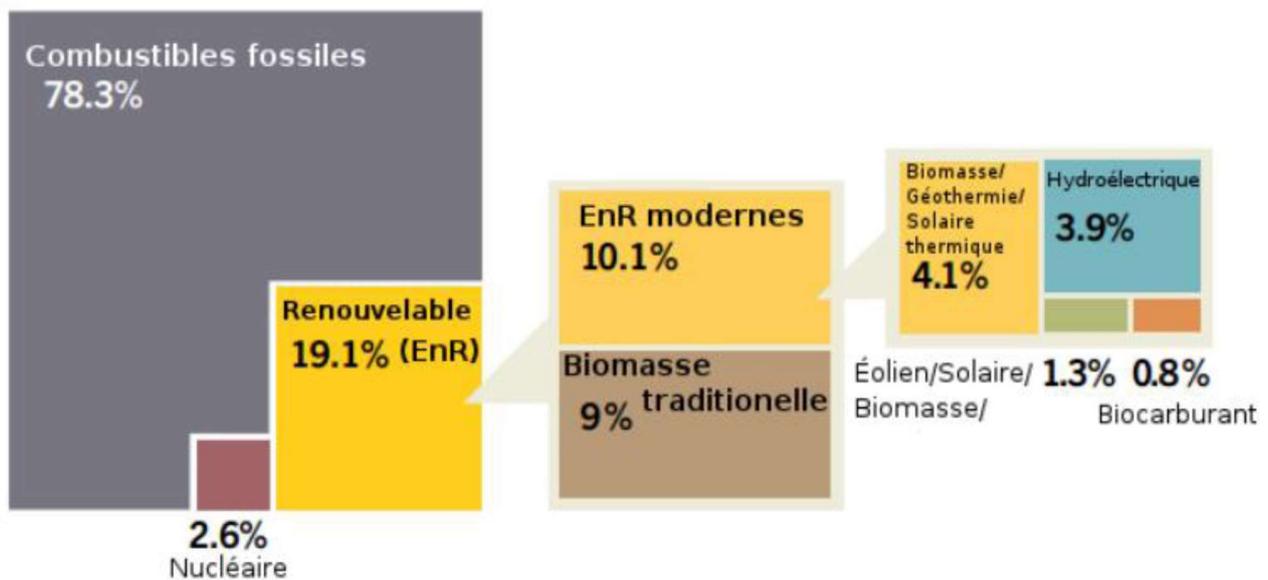
*Figure I.7 : Réserves de charbon dans le monde [3].*

Cette source se trouve en abondance sur les cinq continents et selon les dernières estimations, il resterait encore entre 850 et 900 milliards de tonnes de charbon dans le monde (figure I.7).

Concernant les autres sources fossiles, nous remarquons que les réserves de pétrole et de gaz naturel dans le monde, fin 2013, ont été estimées à 238.2 milliards Tep et 185.7 milliards Tep, respectivement[6].

### I.5.2 Sources renouvelables :

Actuellement et dans de nombreux pays, les sources d'énergie renouvelables se développent et commencent à prendre plus de part du marché au côté des sources fossiles. Selon les estimations, les énergies renouvelables représentent environ 19.1% de la consommation mondiale finale en termes d'énergie[6].



*Figure I.8 : Part des énergies renouvelables dans la consommation mondiale finale d'énergie (2013).*

### I.6 Conclusion :

L'énergie se trouve sur différent type et source, on a des sources renouvelables telles que Gaz, Pétrole...etc., et des sources renouvelables telles que l'énergie éolienne, solaire...etc.

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents systèmes énergétiques et leur principe de fonctionnement. Après analyse de l'impact de chaque type d'énergie sur l'environnement, il est clair que les énergies renouvelables sont la solution optimale à long terme, car elle présente un bilan énergétique propre.

## Chapitre 2 :

Énergie solaire, son exploitation,  
Suiveurs solaire.

## **II.1 Introduction :**

L'exploitation de l'énergie solaire et l'optimisation de sa collecte par les collecteurs solaires (photovoltaïques ou thermiques) exige une connaissance exacte de la distribution de l'irradiation solaire, qui est fonction de plusieurs paramètres à savoir : les paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques.

Ce chapitre présente certaines notions fondamentales sur notre étoile (le soleil), des rappels sur l'énergie solaire et les différents modes de ces exploitations.

Enfin, nous allons finaliser ce chapitre par l'étude de la technologie des suiveurs solaire et le stockage d'énergie fournie par cette dernière.

## **II.2 Energie solaire :**

Avant de passer à la section suivante, la section à partir de laquelle on va vraiment commencer à parler de technique de suivi solaire, nous avons jugé qu'il était nécessaire de donner quelques notions relatives aux mouvements du Soleil et la Terre, et ce qu'il en découle par rapport à l'énergie rayonnante récupérée dans notre planète.

### **II.2.1 Rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire est l'énergie émise sous forme d'ondes électromagnétiques, dans toutes les directions de l'espace suite à la réaction de fusion de l'hydrogène contenu dans le soleil. Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violets à l'infra-rouge en passant par le visible où il émet avec le maximum d'intensité. Les rayonnements émis par le soleil se propagent à la vitesse de la lumière  $C$ ; il lui faut donc, en moyenne 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère. [7]

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

### **II.2.2 Rayonnement extraterrestre :**

Le rayonnement solaire extraterrestre est le rayonnement reçu au sommet de l'atmosphère, il couvre un très large domaine de longueur d'ondes et ne dépend d'aucun

paramètre météorologique, mais il est fonction de quelques paramètres astronomiques et géographique tel que : la latitude du lieu ( $\varphi$ ), la déclinaison solaire( $\delta$ ), et l'angle horaire au coucher du soleil ( $\omega_0$ ).

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

$$H_0 = (24 \cdot 3600 / \pi \cdot 106) \text{ gne} [\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0 + (\pi / 180) \omega_0 \sin \delta \sin \varphi] \quad (\text{II-1})$$

Où :

$$\text{gne} = G_{sc} [1 + 0.033 \cos(360 n / 365)] \quad (\text{II-2})$$

gne est le rayonnement extraterrestre reçu sur un plan normal au rayonnement solaire le nième jour de l'année, exprimé en W/m<sup>2</sup>.

G<sub>sc</sub> est la constante solaire estimée à 1367 W/m<sup>2</sup>.

### ➤ Rayonnement en Algérie :

L'Algérie possédant un gisement solaire important, par son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1Kw/m<sup>2</sup>. L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de Juillet) dépasse les 6Kw/m<sup>2</sup> et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500 Kw/m<sup>2</sup> [8]. La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques de l'Algérie.

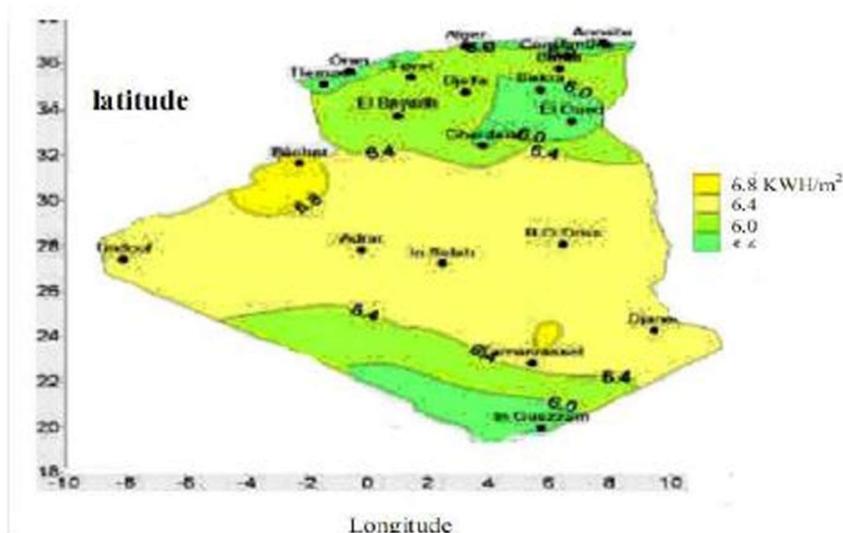
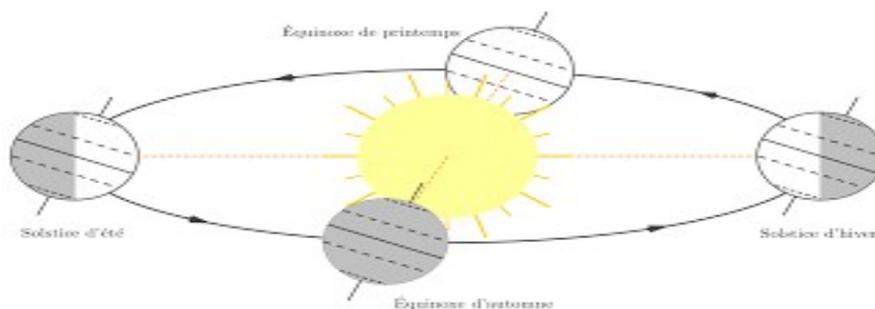


Figure II.1 : Les différentes zones énergétiques dans l'Algérie.

### II.2.3 Mouvement du Globe terrestre :

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 Décembre) que la terre est la plus proche du soleil, et au solstice d'été (22 Juin) qu'elle en est la plus éloignée.

La terre tourne sur elle-même avec une période de 24h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle  $\delta = 23^{\circ}27'$  avec la normale au plan de l'écliptique [9].



*Figure II.2 : Variation saisonnière du rayonnement solaire [9].*

### II.2.4 Irradiation solaire incidente :

L'énergie solaire interceptée à la surface de l'atmosphère terrestre est égale à  $1\,367\text{ W/m}^2$  (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties du rayonnement solaire sont réfléchies, absorbées ou diffusées, ce qui réduit significativement la valeur de cette énergie (rayonnement) à la surface de la terre (voir la Figure II.3). La diminution de l'intensité du rayonnement solaire est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le Soleil est fonction de plusieurs facteurs tels que l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du Soleil.

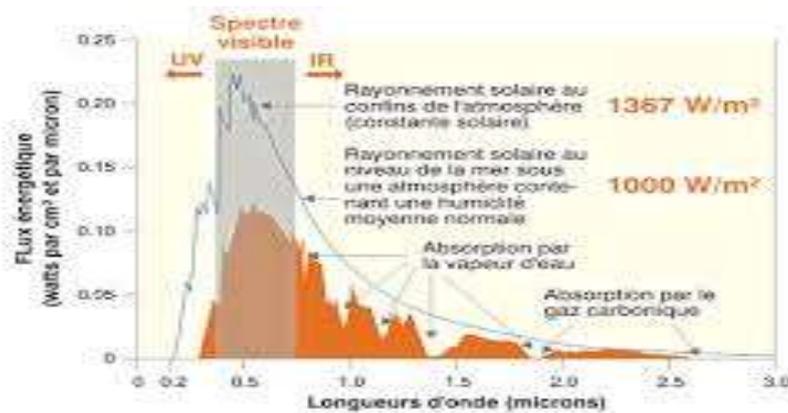


Figure II.3 : Rayonnements solaires extraterrestre et incident. [10]

Le rayonnement total reçu sur une surface, appelé irradiation solaire incidente (ou encore éclairage énergétique global) est la quantité d'énergie reçue par celle-ci. Ainsi, dans les meilleures conditions, l'irradiation solaire incidente sur Terre varie de 900 à 1000 W/m<sup>2</sup>.

L'irradiation solaire incidente qui s'exprime en J/m<sup>2</sup> ou kWh/m<sup>2</sup> est définie par la somme de trois composantes à savoir ; l'irradiation directe, diffuse et réfléchie. Elle dépend de nombreux facteurs, dont principalement la couverture nuageuse, la durée du jour, l'instant considéré dans la journée, l'orientation et l'inclinaison de la surface, la latitude du lieu, et son degré de pollution. La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et dans le temps de l'irradiation solaire incidente.

## II.2.5 Composantes du Rayonnement solaire incident :

### II.2.5.1 Rayonnement direct :

Le rayonnement direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages (Figure II.4).

### II.2.5.2 Rayonnement diffus :

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

solaire diffus peut atteindre 50 % du rayonnement global reçu, lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, 100 % pour un ciel entièrement couvert et il n'est nul que la nuit (Figure II.4).

### II.2.5.3 Rayonnement réfléchi :

Ce rayonnement correspond au rayonnement réfléchi par l'environnement extérieur, en particulier le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé "albedo" (Figure II.4).



*Figure II.4 : Composantes du rayonnement solaire incident.*

### II.2.5.4 Indice de clarté $K_T$ :

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

$$K_T = H/H_0 \text{ (II-3)}$$

Où :

$H$  est l'irradiation solaire reçue sur un plan horizontal. Selon la définition donnée plus haut, on peut définir l'indice de clarté  $K_T$  journalier, mensuel et annuel. Cet indice, qui décrit l'état du ciel, varie selon les endroits et les saisons, généralement entre 0,3 (pour les régions de saisons pluvieuses) et 0,8 (pour des saisons sèches et ensoleillées) [11].

### II.2.5.5 Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien

visible sont enregistrés, on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages. [12]

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

Elle est définie par :

$$S_0 = 2 * \omega_0 / 15 \quad (\text{II-4})$$

Avec :

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

$S_0$ : La durée du jour (h).

## II.2.6 Coordonnées géographiques terrestres :

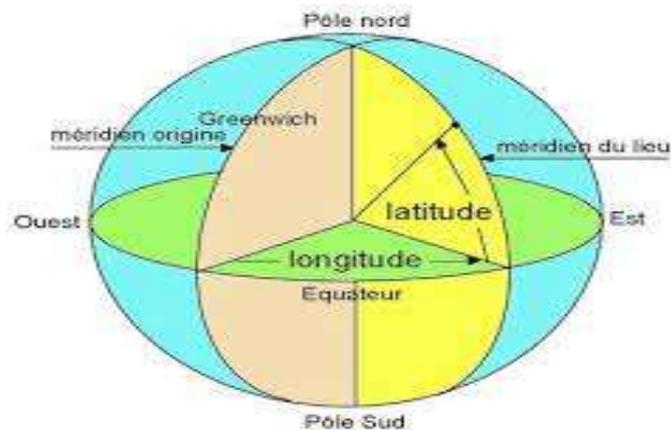
Par coordonnées géographiques (repères géographiques) d'un lieu sur la Terre, on entend un système de trois coordonnées qui sont le plus souvent : la latitude, la longitude et l'altitude (ou l'élévation) par rapport au niveau moyen de la mer (élévation orthométrique) ou par rapport à une surface de référence, en général ellipsoïde (élévation ellipsoïdale). [13] Donc, ce système de référence sert à repérer des emplacements sur la Terre.

### II.2.6.1 Latitude ( $\varphi$ ) :

Une latitude donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie entre 0 et  $90^\circ$ , positivement vers le pôle Nord et négativement vers le pôle Sud (Figure II.5). D'un point de vue mathématique, la latitude d'un point est l'angle au centre que forme la normale (verticale) en ce point avec le plan équatorial (voir la Figure II.5).

### II.2.6.2 Longitude ( $L$ ) :

La longitude (Figure II.5) représente le positionnement est-ouest d'un point sur Terre (ou sur une autre sphère), exprimée en valeur angulaire par rapport à la longitude de référence qui est le méridien de Greenwich. Le méridien est la ligne épousant la courbure terrestre, reliant tous les points de même longitude du pôle Nord au pôle Sud et coupant l'équateur à angle droit. La Longitude est comptée de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ , positivement vers l'est et négativement vers l'ouest. Par convention, le méridien de Greenwich (référence) a la longitude  $0^\circ$ .



*Figure II.5: Latitude ( $\varphi$ ) et Longitude ( $L$ ).*

### **II.2.6.3 Altitude (Z):**

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

### **II.2.7 Position du soleil :**

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

#### **II.2.7.1 Système de coordonnées horaires :**

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

## II.2.7.2 Angles et mouvements solaires :

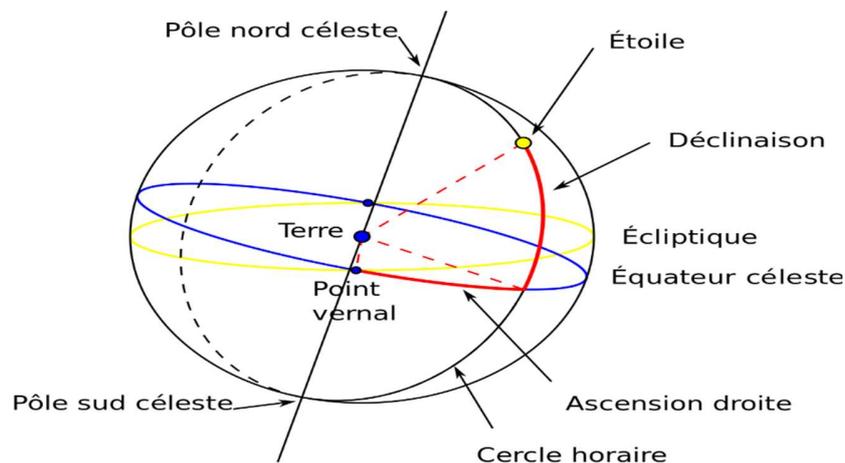
### II.2.7.2.1 Déclinaison du soleil ( $\delta$ ) :

La déclinaison est l'angle que fait la direction d'observation du soleil avec sa projection sur le plan équatorial (voir la Figure II.6). Elle est exprimée en degrés ( $^{\circ}$ ). Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. En considérant la déclinaison  $\delta$  comme constante sur une journée, l'équation de Copernic fournit la relation qui relie ces deux grandeurs : [11]

$$\delta = 23,45 \left[ \sin \left( 2\pi \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (\text{II-5})$$

Où

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



*Figure II.6 : Déclinaison du soleil ( $\delta$ ).*

La déclinaison solaire varie de  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver à  $+23^{\circ}27'$  au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes [18], et cette variation entraîne des variations de la hauteur du soleil pour un même site.

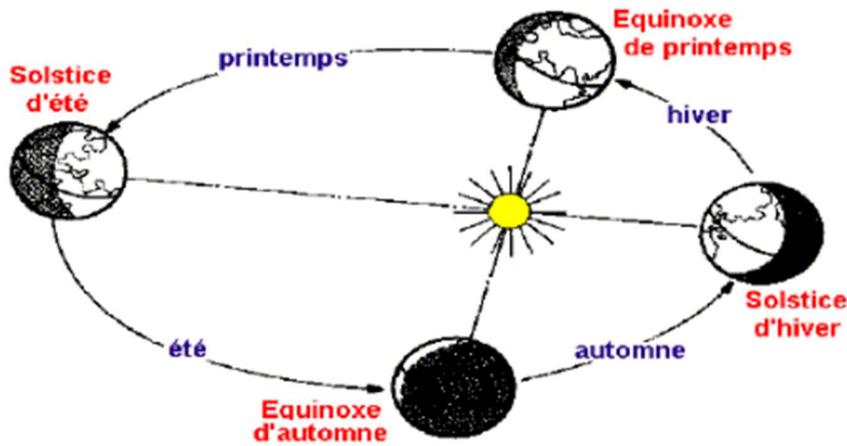


Figure II.7 : Equinoxes.

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

#### II.2.7.2.2 Angle horaire du soleil ( $\omega$ ) :

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi vrai qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu (zénith). Autrement dit, c'est l'angle ou l'arc compté sur l'équateur dans le sens rétrograde à partir du plan vertical du lieu passant par le sud jusqu'au plan méridien passant par le centre du soleil. Il mesure la course du soleil dans le ciel (Figure II.8)

L'angle horaire définit le temps solaire vrai TSV, à midi TSV,  $\omega=0$  [14]. Exprimé en degrés d'angle, sa valeur est nulle à midi solaire, elle est négative le matin, positive l'après-midi et augmente de  $15^\circ$  par heure (le soleil fait un tour de  $360^\circ$  en 24 heures).

L'angle horaire  $\omega$  ( $^\circ$ ) est donné par la formule suivante : [15]

$$\omega = 15 \cdot (\text{TSV} - 12) \quad (\text{II-6})$$

Où

TSV : est le temps solaire vrai en heure, il se calcul par l'équation suivante [16]

$$\text{TSV} = \text{TU} + L/15 + E \quad (\text{II-7})$$

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

L : longitude du lieu en degrés,

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

$$ET = 9.87 \sin (2B) - 7.53 \cos (B) - 1.5 \sin (B) \quad (\text{II-8})$$

$$B = (n-81)*360/364 \quad (\text{II-9})$$

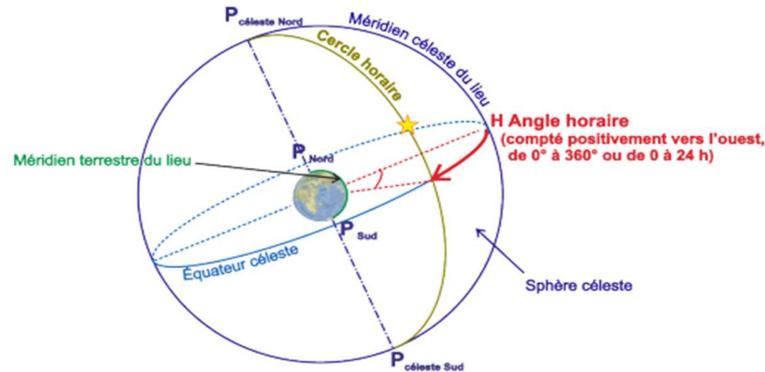


Figure II.8: Angle horaire ( $\omega$ ). [17]

### II.2.7.3 Coordonnées horizontales :

Le système de coordonnées horizontales, également appelé système local ou système de coordonnées alt-azimutales, est un système de coordonnées célestes utilisé en astronomie par un observateur au sol. Le système sépare le ciel en deux hémisphères : l'un situé au-dessus de l'observateur et l'autre situé au-dessous, caché par le sol. Le grand cercle séparant les deux hémisphères situe le plan horizontal, à partir duquel sont établis une altitude et un azimut, qui forment les deux principales coordonnées de ce système. [19]

#### II.2.7.3.1 Hauteur du soleil (H) :

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

$$\sin H = \cos \delta * \cos \omega * \cos \varphi + \sin (\delta) * \sin (\varphi) \quad (\text{II-10})$$

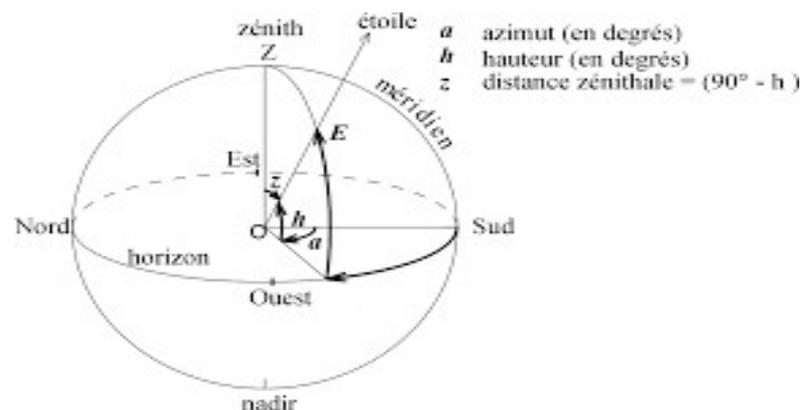
Il s'agit de la formule fondamentale, permettant de connaître, quels que soient le jour, l'heure et le lieu, la hauteur du soleil par rapport à l'horizon. La hauteur maximale du soleil (à midi solaire) est donnée par la formule suivante :

$$H_{\max} = \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta \quad (\text{II-11})$$

### II.2.7.3.2 Azimut du soleil ( $\alpha$ ) :

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud ou nord (Figure II.9). Il est mesuré commençant par le nord ou par le sud soit vers l'est soit vers l'ouest à travers un axe de  $360^\circ$  (l'azimut est compris entre  $-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ). [15]

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



*Figure II.9 : Coordonnées horizontales du soleil (H,  $\alpha$ ).[20]*

L'angle d'azimut est calculé d'après la formule suivante :

$$\sin \alpha = (\cos \delta \cdot \sin \omega) / \cos H \quad (\text{II-12})$$

### II.3 Historique du photovoltaïque :

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque

- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

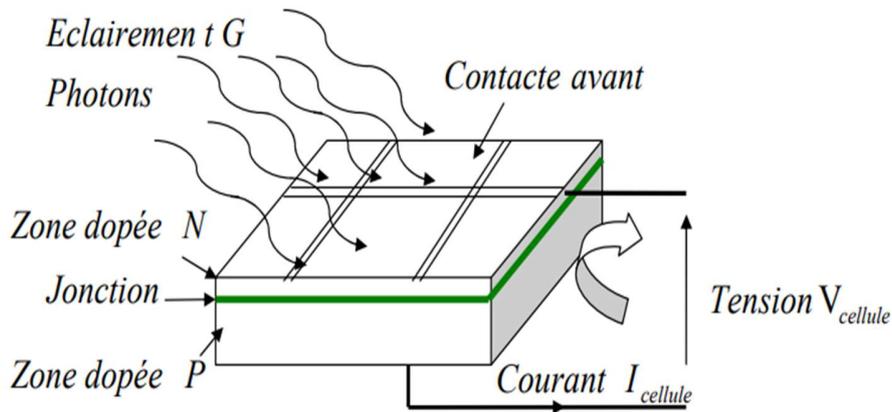
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

### II.4 L'effet photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [7]. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La figure (II.10) illustre une cellule photovoltaïque (PV) typique où sa constitution

est détaillée. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs.



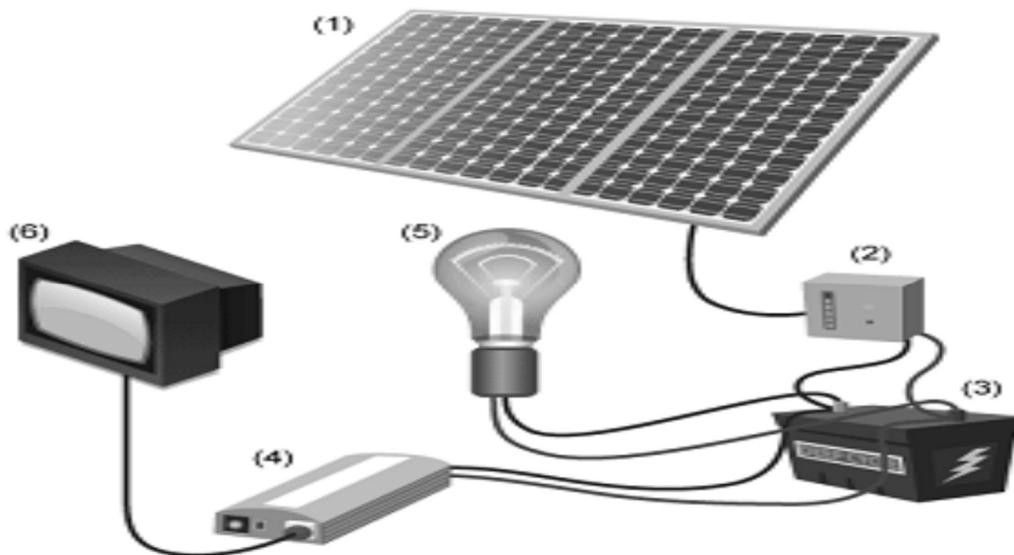
*Figure II.10 : Coupe transversale d'une cellule PV typique.*

## II.4.1 Différents types de systèmes photovoltaïques :

### II.4.1.1 Installations électriques des plaques photovoltaïques autonomes :

En site isolé, le champ photovoltaïque (1) (figure II.11) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation (2) et une batterie (3) d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques. Le régulateur de charge (2) a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie

de la batterie. En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif (6). Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur (4). On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires urbains, le pompage solaire et les maisons en sites isolés.



*Figure II.11 : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome*

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.

#### **II.4.1.2 Centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau :**

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique et le plus cher d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.

Deux compteurs d'énergies sont nécessaires, un qui comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre qui mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la

production dépasse la consommation. Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation).

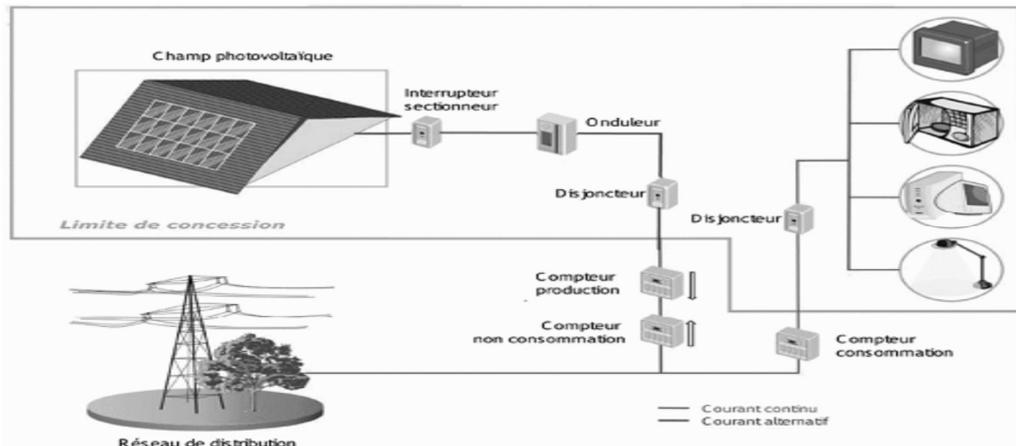


Figure II.12 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau.

### II.4.1.3 Centrales électriques photovoltaïques hybride :

Il s'agit d'un système qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes tels qu'une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

## II.5 Les différents types de panneaux solaires photovoltaïques :

On distingue actuellement 3 principaux types de panneaux photovoltaïques, qui sont différenciés par le type de cellules qui les composent. Toutes les cellules sont produites à base de silicium, mais les méthodes de fabrication différentes leurs donnent des caractéristiques très différentes, notamment en termes de productivité [22].

### II.5.1 Les cellules Amorphes :

Les cellules Amorphes sont produites à partir d'un "gaz de silicium", qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

La cellule est grise très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires », car ce type de cellule est bon marché et la technologie est utilisable sur de nombreux

supports, notamment des supports souples. Le problème c'est que son rendement est 2 à 3 fois plus faible que les cellules Monocristallines.

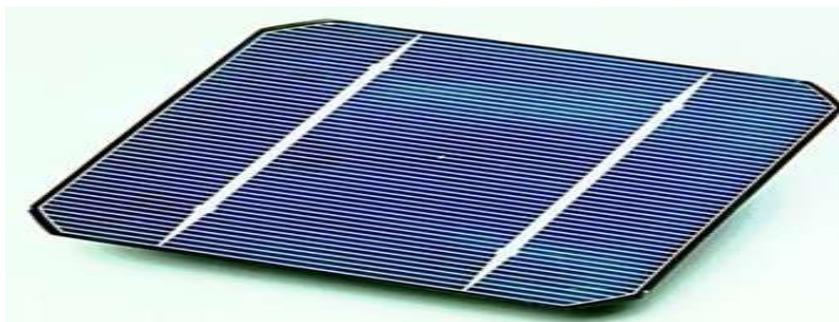


*Figure II.13 : Cellule Amorphe.*

### **II.5.2 Les cellules Monocristallines :**

Les cellules Monocristallines sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, elles sont donc très "pures". Elles offrent le meilleur rendement (entre 13 et 17%), mais sont aussi plus chères à la production, donc à la vente. Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris).

Ces cellules sont les plus performantes, elles permettent donc de constituer des panneaux qui sont très performants : ceux qui produisent le plus d'énergie avec le moins de surface.



*Figure II.14 : Cellule Monocristalline.*

### **II.5.3 Les cellules Polycristallines :**

Les cellules Polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux.

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Elles sont en général de forme rectangulaire et sont couleur bleu nuit avec des reflets.



*Figure II.15 : Cellule Polycristalline.*

## **II.6 Le rendement d'un panneau photovoltaïque :**

### **II.6.1 Puissance produite :**

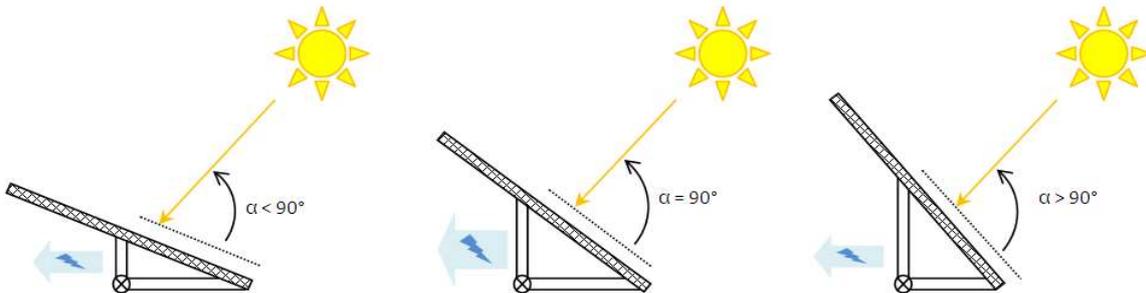
Le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque dépend des technologies utilisées lors de sa fabrication. Il existe plusieurs types dont les plus connus sont les panneaux PV à base de cellules en Silicium poly-cristallin, Silicium monocristallin, Silicium amorphe, les cellules multi jonctions, etc. Chacune de ces technologies présente des avantages et des inconvénients. En particulier, le rendement, qui est généralement le critère de choix, dépend des conditions climatiques du lieu d'installation (dans les régions caractérisées par des températures élevées comme le cas de notre Sahara, d'après des recherches et des essais des chercheurs, ont constaté que les systèmes au Silicium amorphe sont préférés à ceux au mono ou poly-cristallin) [8].

Pour un panneau PV, le rendement R exprimé en pourcent (%), est défini par le rapport de la puissance électrique produite par le panneau PV (PEP) à la puissance solaire reçue (PSR).

$$R(\%) = \text{PEP} / \text{PSR} \quad (\text{II-13})$$

## II.6.2 Positionnement :

Comme mentionné auparavant, l'énergie fournie par le panneau PV dépend fortement de la quantité d'éclairement solaire absorbée par ce dernier. Cette quantité dépend de l'orientation du panneau par rapport au soleil. Pour collecter le maximum d'énergie, le panneau PV doit être constamment orienté perpendiculairement aux rayons solaires [23] (Figure II.16).



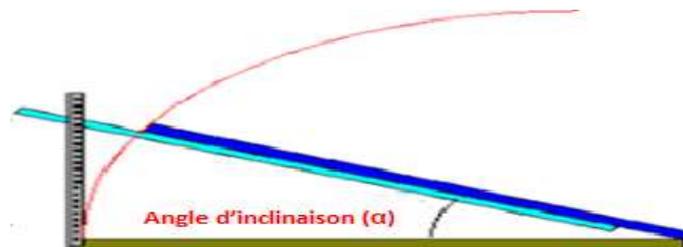
*Figure II.16 : Dépendance des performances d'un panneau PV de l'angle  $\alpha$ . [9]*

Avec : Alpha( $\alpha$ ) l'angle formé entre le plan du panneau et les rayons lumineux incidents, l'angle optimal correspond à un angle de  $90^\circ$  comme indiqué dans la figure (II.16).

Chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface ( $m^2$ ) du panneau exposé aux rayons diminue et donc en partant de la puissance produite, le rendement diminue aussi, d'où l'importance de l'orientation des panneaux par rapport à la position du Soleil [23].

## II.6.3 Positionnement (angle d'inclinaison) :

Un autre facteur qui influence sur les performances du panneau PV est l'angle d'inclinaison, qui correspond à l'angle formé par le plan du panneau solaire par rapport à l'horizontale (le plan du sol).



*Figure II.17 : Représentation de l'angle d'inclinaison  $\alpha$ .*

En effet, l'évolution de la trajectoire du soleil varie selon les saisons (l'inclinaison de la terre varie), l'angle d'inclinaison est plus réduit en été et plus important en hiver.

Cependant si l'on désire maximiser la puissance générée par un panneau PV et avoir un rendement optimal, il faut tenir compte de tous ces paramètres et les contraintes liées à l'orientation du module ainsi que la position du soleil.

Ceci peut être assurée par un système de poursuite solaire (suiveur soleil ou encore dit tracker solaire) qui permet de suivre le soleil tout au long de la journée. Pour cela, la structure possède deux degrés de liberté qui sont :

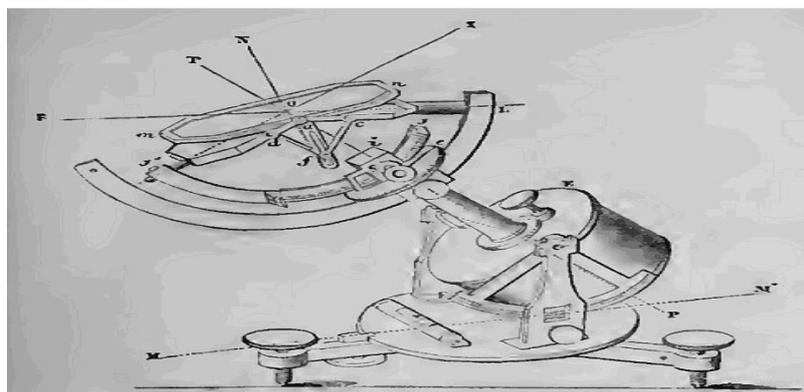
- une rotation horizontale pour régler l'azimut.
- une rotation verticale pour l'inclinaison.

Ce système permet ainsi, aux panneaux photovoltaïques de suivre continuellement et en temps réel la trajectoire du soleil pour assurer une production électrique maximale, d'où la nécessité de définir avec exactitude les trajectoires empruntées par le soleil, de manière à définir la meilleure façon avec laquelle sera effectué le suivi automatique [23].

## II.7 Suiveur solaire :

### II.7.1 Les premières utilisations :

Les premières applications des suiveurs solaires remontent vers les années 1750 où le principe reposait sur l'utilisation de l'héliostat (figure II.19).



*Figure II.18 : Modèle d'un héliostat dans ses premières applications.*

La rotation de ce dernier est assurée par un mécanisme d'horlogerie dont la plus ancienne mention du système se trouve dans des publications datant de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacob's Gravesande [25].

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 système se rencontre dans diverses installations utilisant l'énergie solaire, notamment les centrales solaires à concentration appelés champs d'héliostats. Un exemple en France de la centrale solaire Thémis qui après avoir fonctionné de 1983 à 1986, fait l'objet d'une nouvelle expérimentation depuis 2007 [24].

### **II.7.2 Principes fondamentaux de traqueurs solaires :**

Un traqueur solaire est un dispositif qui est utilisé pour aligner un simple module PV ou d'un panneau avec le soleil. L'efficacité est en particulier améliorée dans les heures de matin et d'après-midi où un panneau fixe fera face loin des rayons du soleil. Les dépenses initiales d'un système de suiveur solaire dépendront du type et de la taille du traqueur qui doit être employé. Les modules PV sont chers et dans la plupart des cas le coût des modules eux-mêmes seront supérieur au coût du système de traqueur. En plus un système bien conçu qui utilise un traqueur aura besoin de moins de panneaux pour augmenter l'efficacité, ayant pour résultat une réduction de coûts initiaux d'installation.

### **II.7.3 Types courants de traqueurs :**

Différentes conceptions des traqueurs solaires sont proposées, et le fonctionnement de la plupart dépende des capteurs (avec une boucle fermée), et du contrôle de temps (avec une boucle ouverte).

L'ancien type de traqueur exige que la position du soleil soit déterminée par des capteurs de photocellules, et la précision de ce type de commande dépend du nombre de capteurs dans tous les sens, tandis que le plus récent comporte la détermination locale de (latitude et longitude) du site de l'installation, ainsi que du jour et la période de l'année à l'aide des équations qui décrivent la voie de piste solaire dans le ciel, qui bien peut être estimé.

Des traqueurs solaires peuvent être divisés en deux types principaux selon le type de la commande et de la sensibilisation ou du système de positionnement qu'ils incorporent [26] :

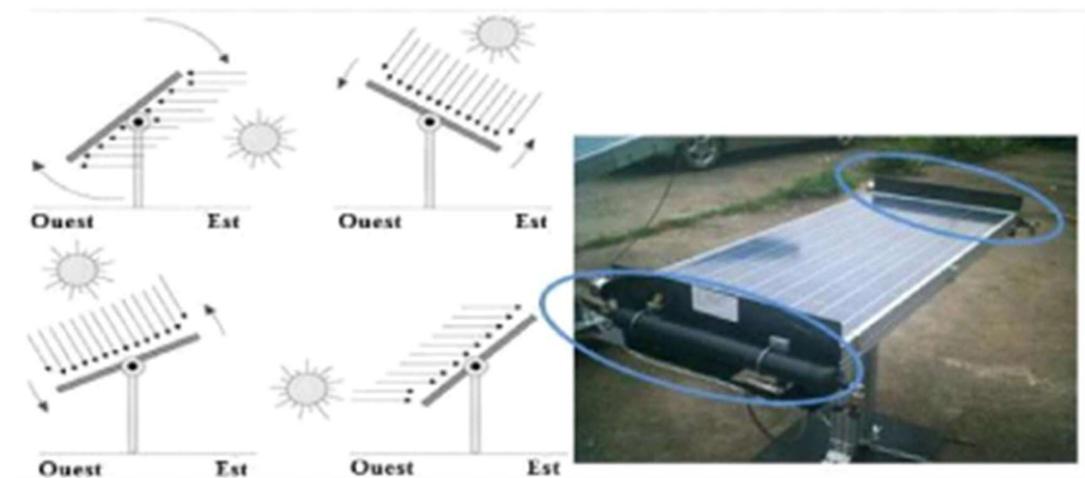
1-Les traqueurs passifs : emploient le rayonnement du soleil pour chauffer le gaz qui déplace le traqueur à travers le ciel.

2-Les traqueurs actifs : emploient les commandes électriques ou hydrauliques pour déplacer le traqueur.

### II.7.3.1 Suiveur passif :

Le premier type des suiveurs passifs est constitué dans son architecture de deux tubes en cuivre montés sur les côtés Est et Ouest du panneau PV. Le tube de matière cuivre (entouré dans la figure II.19) est rempli de fluides chimiques capable de se vaporiser à basse température. En effet, lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente la température d'un côté du panneau, le composé dans le tube en cuivre se vaporise [27].

La partie gazeuse du composé occupe un plus grand volume interne, et sa partie liquide est décalée vers le côté ombragé. Cette opération de transfert de masse ajuste l'équilibre du panneau PV en le faisant tourner vers la source des rayons solaires. Ce type de suiveur ne consomme aucune énergie pour le repositionnement du panneau.



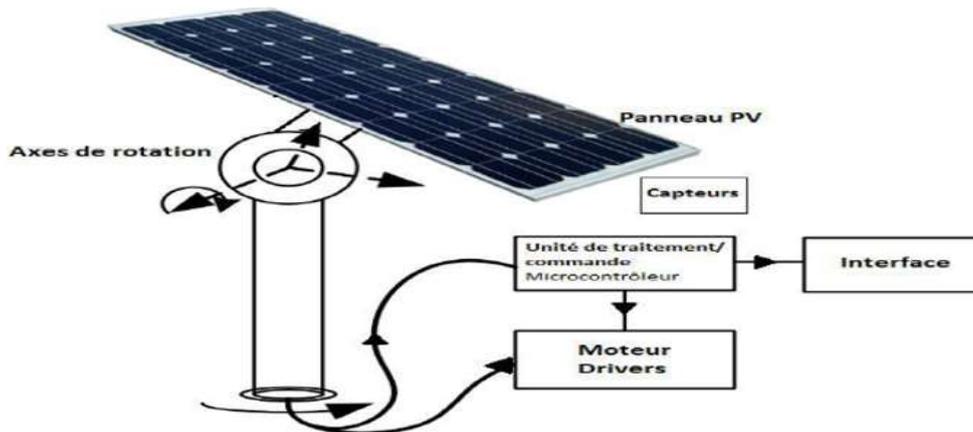
*Figure II.19 : Exemple et fonctionnement du suiveur passif. [27]*

### II.7.3.2 Suiveur 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, est qu'ils représentent une meilleure précision de suivi et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les réajustés [23].



*Figure II.20 : Exemple et fonctionnement du suiveur actif. [8]*

#### **II.7.4 Traqueur en boucle ouverte :**

Les traqueurs en boucle ouverte déterminent la position du soleil en utilisant des algorithmes commandés par ordinateur ou des systèmes de synchronisation. Elles n'emploient aucune sensibilisation mais déterminent à la place la position du soleil par des données pré enregistrées pour un emplacement particulier.

D'ailleurs, le processus traqueur solaire peut être mis en application en utilisant un axe incliné près de l'angle de la latitude du site, et la rotation de suivi est déterminée par l'angle Horaire ( $\omega$ ). Cependant, pour une précision plus élevée, un système de traqueur du soleil à deux axes est recommandé. Pour un système à deux axes, il y a deux types suiveur équatorial polaire et suiveur d'azimut/élévation (altitude - azimut).

#### **II.7.5 Traqueur en boucle fermée :**

Sont ceux qui utilisent des capteurs de lumière, les photocellules (généralement deux) pour déterminer la partie la plus lumineuse dans le ciel. Leur principe de fonctionnement est basé sur la différence de potentiel reçue de chacune.

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

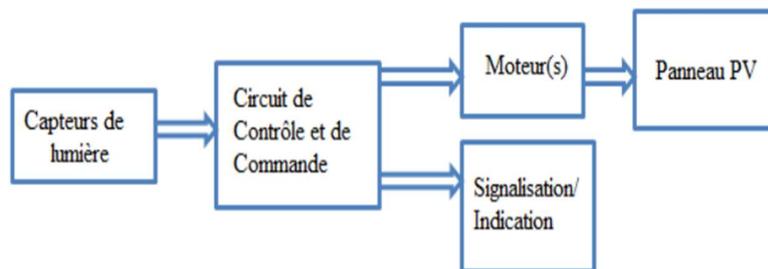
### II.7.6 Les traqueurs synchronisés :

Ceux-ci emploient un temporisateur pour déplacer le traqueur à travers le ciel par accroissement des mouvements tout au long du jour. Les modules doivent être perpendiculaires aux rayons du soleil. Les traqueurs de ce type peuvent utiliser un ou deux axes selon leurs applications. L'inconvénient principal des systèmes synchronisés est que leur mouvement ne tient pas compte de la variation saisonnière de la position du soleil.

## II.8 Méthodes de poursuite :

### II.8.1 Principe général

Les deux types de tracker solaires qui existent sont soit mono-axe soit double axe, qui s'appuie sur le même principe de poursuite, illustré dans la (figure II.21).



*Figure II.21: Principe général de la commande du tracking.*

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 (figure II.22).

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 servomoteur pour repositionner le panneau perpendiculairement aux rayons solaires.

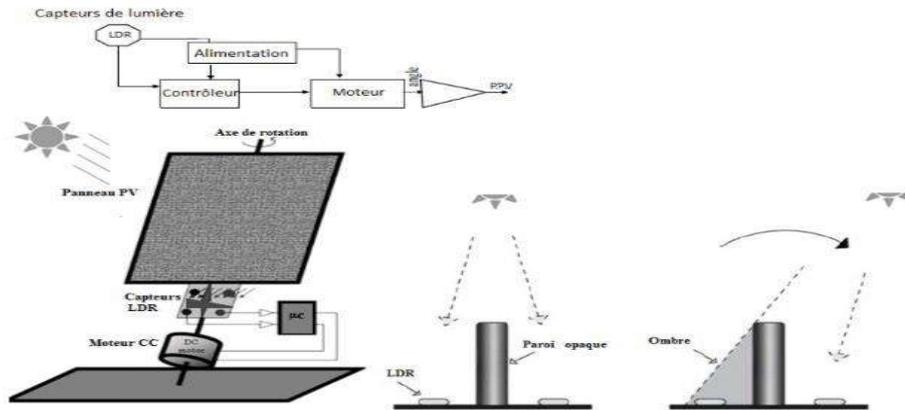


Figure II.22 : Schéma synoptique de la technique du tracking.

La technique utilisée consiste à contrôler l'égalité d'éclairement de quatre capteurs de lumière répartis dans les quatre quadrants définis par les plans P1 et P2 qui se coupent suivant l'axe ( $\Delta$ ) représenté dans la figure II.23.

**Remarque :**

Dans le cas d'un suiveur mono axe, une seule paroi est utilisée pour ombrager l'un des deux capteurs.

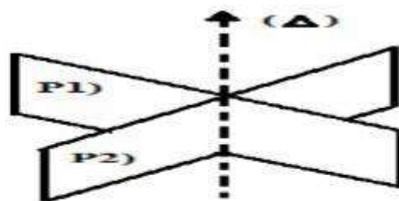


Figure II.23 : Représentation des plans 1 et 2 séparant les LDR.

**II.8.2 Tracker mono-axe :**

En partant du principe général précédent, on retrouve le suiveur mono-axe qui permet une rotation selon l'axe d'azimut seulement, et qui est le plus souvent utilisé en raison de sa

simplicité. Le principe de fonctionnement repose sur l'algorithme de suivi décrit dans l'organigramme suivant (figure II.24).

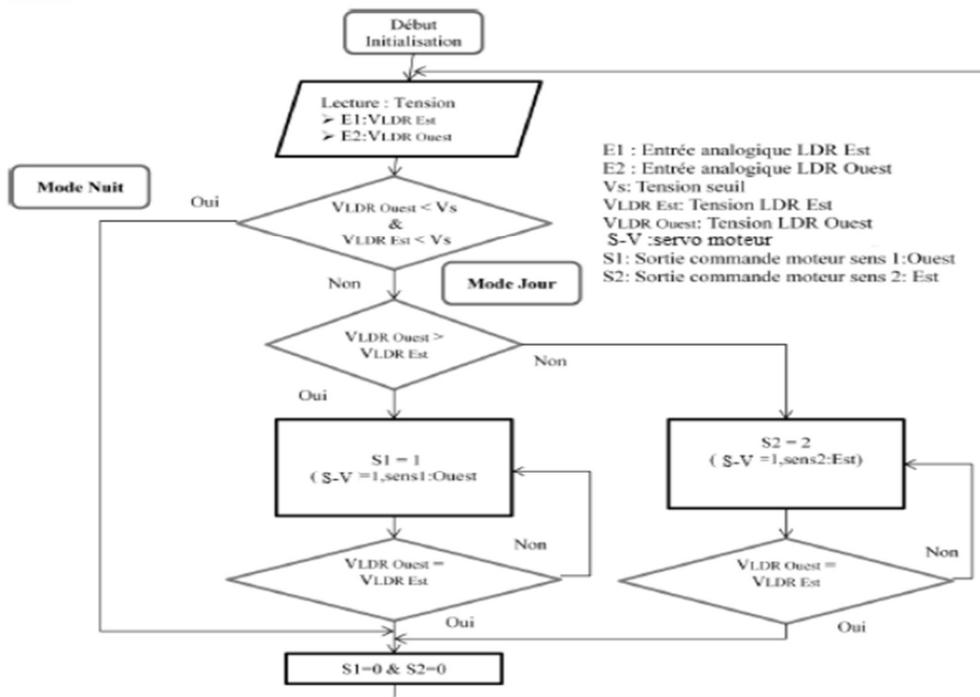


Figure II.24 : Organigramme de la méthode de suivi mono-axe.

Comme montré dans la figure (II.24), on différencie d'abord entre le mode jour et le mode nuit via les tensions des deux capteurs de lumière LDR. Si la tension délivrée est inférieure à  $V_s$  (tension seuil en V) aucun changement n'est porté à la position du panneau, le système est en mode arrêt.

Si on prend par exemple le cas où  $VLDR\ Ouest > VLDR\ Est$ , cela signifie que le capteur de lumière situé à l'Ouest est plus exposé au rayonnement solaire alors que l'autre capteur est ombragé, la sortie S1 est donc activée, le panneau s'oriente vers la source de lumière direction Ouest.

On suit le même raisonnement dans le cas inverse. Globalement, on peut distinguer les 4 cas suivants :

$VLDR\ Ouest < V_s$  &  $VLDR\ Est < V_s$  Mode nuit. Système en veille.

$VLDR\ Ouest > VLDR\ Est$  Mode jour.

Rotation du panneau PV vers l'Ouest.

$VLDR\ Ouest < VLDR\ Est$  Mode jour.

Rotation du panneau PV vers l'Est.

VLDR Ouest = VLDR Est Condition d'arrêt. Panneau est dans une position optimale.

### II.8.2.1 Disposition des capteurs LDR :

Pour les quatre cas cités précédemment, il est indispensable de prendre en considération trois paramètres lors de la disposition des capteurs LDR. L'angle « $\epsilon$ » de l'ombre solaire qui est en fonction de la hauteur « $H$ » de la paroi, et la distance « $d$ » qui la sépare du capteur comme représenté sur la figure (II.25) ; en effet « $\epsilon$ » est l'angle seuil de déclenchement ou seuil de l'ombre solaire.

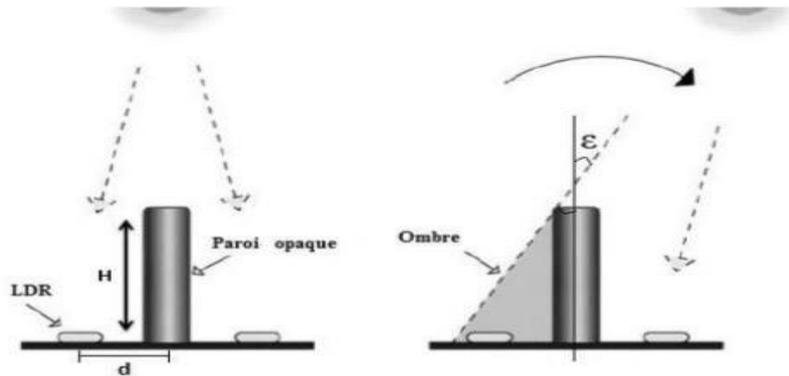


Figure II.25 : disposition des capteurs LDR pour un tracker mono-axe.

Ces paramètres sont définis par les équations suivantes :

$$\epsilon = d / \sqrt{d^2 + H^2} \quad (\text{II-14}), H' = d / \tan(\epsilon) \quad (\text{II-15})$$

où :

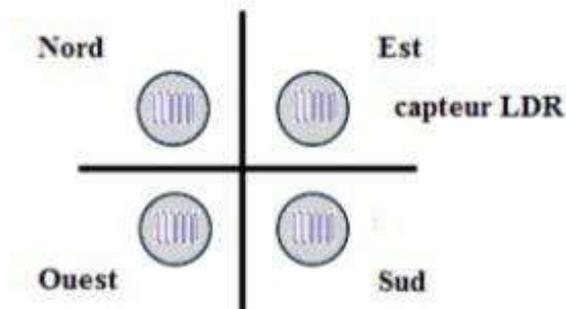
$H'$  : Hauteur de la paroi en (cm).

$d$  : Distant entre la paroi et le capteur de lumière LDR en (cm).

$\epsilon$  : Angle de l'ombre solaire en ( $^\circ$ )

### II.8.3 Tracker double axe :

Pour assurer un suivi complet de la course solaire (en azimut et en zénith), on additionne à l'architecture précédente deux autres capteurs LDR pour couvrir les changements (Nord-Sud) de la « déclinaison solaire » qui varie de  $+23.45^\circ$  à  $-23.45^\circ$  durant l'année.



*Figure II.26 : Vue d'en haut de la disposition des quatre capteurs LDR.*

Le principe est le même pour le suiveur mono-axe, il est basé sur la différence d'éclairement des quatre LDR. La figure (II.27) représente l'organigramme de l'algorithme de poursuite en double axe. En plus des cas étudiés ci-dessus pour le mono-axe, on rajoute les trois autres cas suivant :

VLDR Nord > VLDR Sud, rotation du panneau PV vers le Nord.

VLDR Nord < VLDR Sud, rotation du panneau PV vers le Sud.

VLDR ouest = VLDR Est & VLDR Nord = VLDR Sud Condition d'arrêt, le panneau est dans une position optimale.

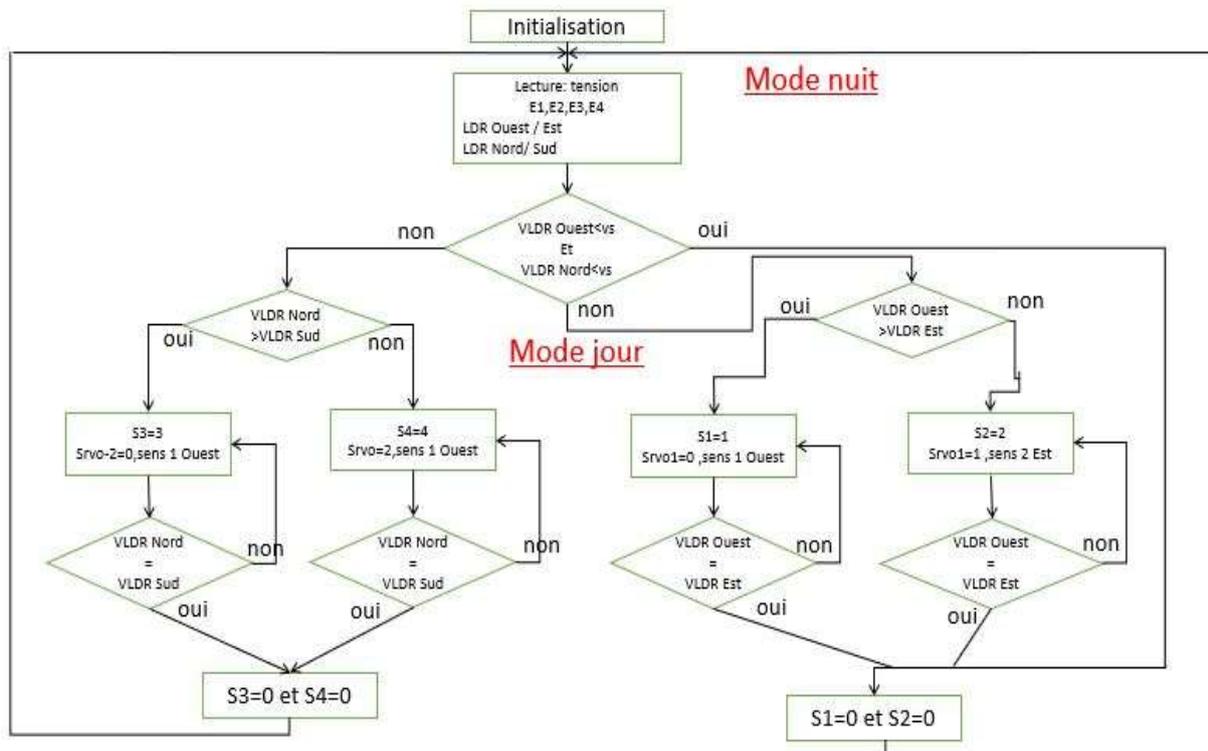


Figure II.27 : Organigramme de la méthode de suivi double axe.

E1 : entré analogique LDR Est. / E2 : entré analogique LDR Ouest.

E3 : entré analogique LDR Nord. / E4 : entré analogique LDR Sud.

S1 : sortie commende moteur sur 1 –Ouest.

S2 : sortie commende moteur sur 2–Est.

S3 : sortie commende moteur sur 3–Nord.

S4 : sortie commende moteur sur 4–Sud.

Vs : tension de seuil.

VLDR Est : tension LDR Est. / VLDR Ouest : tension LDR Ouest.

VLDR Nord : tension LDR Nord. / VLDR Sud : tension LDR Sud.

Srvo1 : servo moteur horizontal.

Srvo2 : servo moteur vertical.

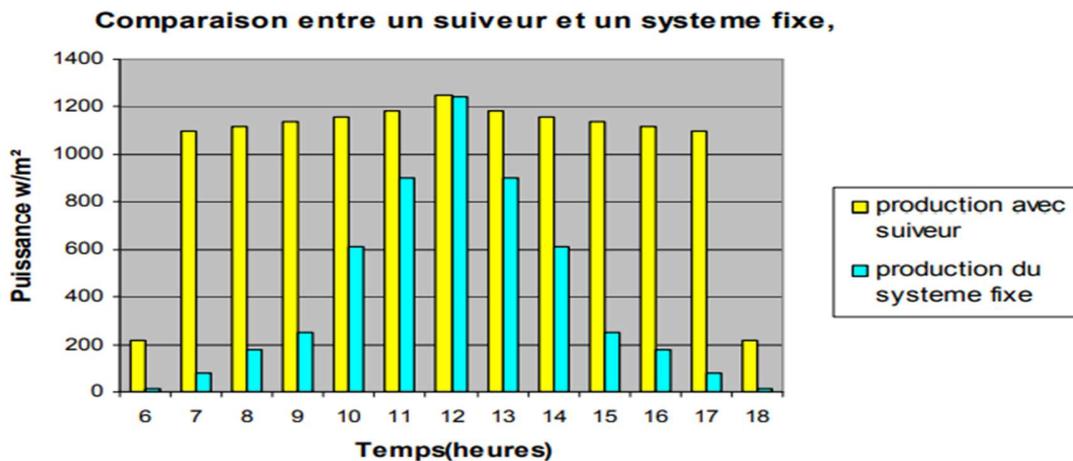
## II.9 L'intérêt des panneaux mobiles par rapport aux panneaux fixes :

Au cours de la journée, le soleil se déplace continuellement, alors qu'un générateur photovoltaïque est fixe dans sa position, perdant ainsi une considérable quantité d'énergie, qui pourrait être disponible.

Dans une installation fixe, l'énergie rendue par les modules PV est maximale seulement à midi comme indiqué sur la figure II.28. Pour cela si les modules PV sont toujours orientés vers le soleil, c'est comme s'il y avait constamment la condition correspondante à midi, la puissance générée est toujours celle maximale.

Les modules photovoltaïques placés sur des suiveurs de soleil ont un rendement énergétique qui augmente de manière appréciable par rapport aux installations fixes.

Au cours d'une journée complètement ensoleillée, un système fixe de 1 kW bien orienté, produit 5,5 kWh d'énergie, alors que le même système avec suiveur, dans les mêmes conditions d'ensoleillement, produit 11 kWh d'énergie.



*Figure II.28 : Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système fixe.*

## II.10 Stockage de l'énergie :

### II.10.1 Description d'une batterie :

Les batteries et les piles sont des équipements qui transforment l'énergie chimique en énergie électrique. Une batterie (ou accumulateur) peut stocker et accumuler l'énergie électrique

pour la restituer. Elle peut donc se charger et se décharger, selon des opérations réversibles. Une pile électrique fournit l'électricité à un circuit extérieur jusqu'à l'épuisement de son potentiel.

Une batterie est formée de deux électrodes, plongées dans un électrolyte, une substance conductrice liquide ou solide, et reliées à l'extérieur par un fil conducteur. Quand la batterie se décharge, l'électrode négative (anode) émet des électrons qui passent par le fil et sont absorbées par l'électrode positive (cathode). Ce mouvement d'électrons constitue un courant électrique qui peut être ensuite transformé pour faire tourner un moteur ou faire fonctionner un appareil électronique. Pour équilibrer cet échange d'électrons, un échange d'ions positifs s'effectue entre les deux électrodes via l'électrolyte. Quand la batterie est en phase de recharge, avec un apport extérieur d'électricité, les mouvements sont inversés.

## **II.10.2 Description des différents types de batteries utilisées dans le stockage d'Energie :**

### **II.10.2.1 Les batteries au plomb :**

Il existe plusieurs types de batteries au plomb : la batterie « plomb ouvert », la batterie AGM et la batterie gel, chacun de ces modèles présentant des caractéristiques différentes.

### **II.10.2.2 La batterie « plomb ouvert » :**

Jusqu'à tout récemment, la batterie plomb ouvert était la seule technologie de batterie pratique pour stocker l'électricité solaire. Ce type de batterie fonctionne notamment avec une solution d'acide sulfurique liquide. Il s'agit du même type de batterie que nous avons dans nos voitures, mais les versions de stockage solaire sont beaucoup plus volumineuses.



*Figure II.29 : Batteries plomb ouvert.*

On l'entrepose plutôt dans des endroits frais ou climatisés, car la chaleur réduit considérablement sa durée de vie. Il faut aussi que le lieu soit aéré, car en se chargeant la batterie plomb ouvert libère de l'hydrogène. On va éviter également de l'installer en plein air, au risque de la voir geler à cause du froid.

Sa réputation de technologie éprouvée et son prix accessible en font une batterie toujours utilisée, bien qu'il existe de nos jours d'autres modèles plus élaborés. On l'utilise surtout sur des résidences secondaires où elle est sollicitée de manière irrégulière, de façon à mieux préserver sa durée de vie. La batterie plomb ouvert affiche un coût bas, mais le compromis se présente sous forme de maintenance chaque mois, vous devez vérifier le niveau d'eau, en ajoutant de l'eau distillée pour la maintenir à niveau.

- **Avantages**

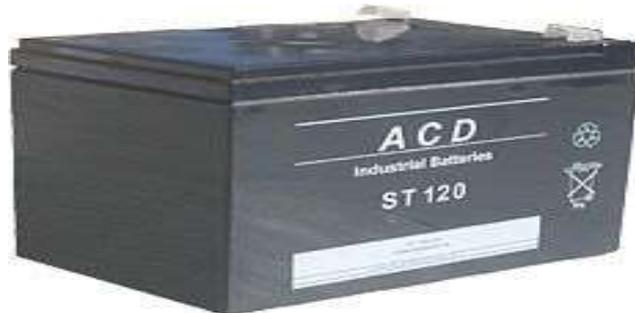
1. Pas cher : entre 12692,00 et 39663,00 DA pour 1 kWc.
2. Technologie fiable, robuste et éprouvée.

- **Inconvénients**

1. Nécessite un entretien régulier.
2. Faible durée de vie (400-500 cycles), on la conseille pour des utilisations irrégulières.
3. Profondeur de décharge entre 60 et 80 %.
4. Volumineuse, elle prend beaucoup de place.
5. Elle émet de l'hydrogène et nécessite d'être placé dans un endroit aéré.
6. Toxique pour l'environnement.

### **II.10.2.3 La batterie AGM :**

Elle se présente sous la forme d'une batterie au plomb scellée. Son principal avantage est le fait qu'elle ne nécessite pas d'entretien. Elle présente en plus l'intérêt d'être étanche et de ne pas dégager d'hydrogène ni de chaleur durant les cycles de charge ou de décharge. Plus adaptée aux utilisations quotidiennes, elle peut faire l'objet d'une utilisation régulière, sans que ses performances en soient affectées.



*Figure II.30 : Batterie solaire AGM.*

Comme toutes les batteries au plomb, la batterie AGM est particulièrement sensible à l'élévation de la température. Elle est également plus chère que sa version au plomb ouvert et présente une faible durée de vie en cyclage en plus de présenter une profondeur de décharge de 80 % en général.

- **Avantages**

1. Ne nécessite pas d'entretien.
2. Ne dégage pas d'hydrogène ou de chaleur.

- **Inconvénients**

1. Un peu plus chère : entre 31730,00 et 63561,00 DA pour 1 kWc.
2. Son cycle de vie est relativement faible (600-700 cycles).
3. Profondeur de décharge d'environ 80% dans la plupart des cas.
4. Toxique pour l'environnement.

#### **II.10.2.4 La batterie Gel :**

La technologie de la batterie gel a tendance à supplanter les autres modèles à base de plomb de par ses caractéristiques plus performantes. Sur le marché du solaire, elle est considérée comme l'évolution haut de gamme des batteries au plomb. Les batteries gel, à l'instar des batteries AGM, sont étanches et ne nécessitent pas d'entretien sous forme d'ajout d'eau distillée. Elles supportent également mieux les décharges profondes. À 50 % de décharge, elles

peuvent durer plus de 1000 cycles. En termes de durée de vie, cela représente entre 6 et 10 ans pour une application solaire.

Notez néanmoins que la batterie gel supporte mal une vitesse élevée de charge et de décharge. Il lui faut donc une application en décharge lente pour optimiser son nombre de cyclages. De plus, elle présente un prix élevé : environ le double de la batterie plomb ouvert. Il faudra également la conserver dans un lieu frais ou climatisé.



*Figure II.31 : Batterie solaire Gel.*

- **Avantages**

1. Ne nécessite pas d'entretien.
2. Ne dégage pas d'hydrogène ou de chaleur.
3. Profondeur de décharge d'environ 50 %.

- **Inconvénients**

1. Double du prix d'une batterie plomb ouvert : entre 39663,00 et 79326,00 DA pour 1 kWc.
2. Sensible au rythme élevé de charge et de décharge : elle doit avoir une application en décharge lente.
3. Toxique pour l'environnement.

### **II.10.2.5 La batterie lithium :**

Ce n'est pas un hasard si les batteries lithium comptent parmi les plus populaires du marché. En pleine expansion, cette technologie se retrouve partout dans notre quotidien : dans nos voitures et nos Smartphones. Elle incarne l'innovation d'aujourd'hui et de demain comme tend à le démontrer la nouvelle batterie lithium Power Wall de Tesla.

Les batteries au lithium sont plus légères et plus compactes que les batteries au plomb. Elles peuvent également être déchargées plus profondément que les batteries au plomb. Elles sont particulièrement sollicitées pour leur durée de vie étendue : elles peuvent monter jusqu'à 6000 cycles à un taux de décharge de 80%.

Côté bilan écologique, la batterie lithium fait aussi figure de bon élève comparativement aux batteries au plomb : son niveau de recyclage est proche de 70 %.

Leur principal inconvénient, du moins pour le moment, est qu'elles sont nettement plus onéreuses que les batteries au plomb pour un stockage identique, ce qui en fait un investissement encore peu rentable aujourd'hui.



*Figure II.32 : Batterie solaire lithium de LG.*

- **Avantages**

1. Meilleure durée de vie du marché : jusqu'à 6000 cycles.
2. Elle peut être déchargée plus profondément que les batteries au plomb.
3. Ne nécessite pas d'entretien.
4. Recyclable à 70 %.
5. Compacte, elle prend moins de place.
6. Incarne le futur des moyens de stockage solaire.

- **Inconvénients**

1. Prix onéreux : entre 96730,00 DA et 161216,00 DA pour 1 kWc.
2. Même capacité de stockage que les autres technologies au plomb pour un prix prohibitif, ce qui en fait un investissement peu rentable.

## **II.11 Les critères déterminants pour choisir une batterie solaire :**

Les considérations relatives au choix d'une batterie incluent évidemment le coût, mais aussi la durée de vie, la capacité de stockage et la profondeur de décharge.

### **II.11.1 La capacité de stockage :**

L'énergie stockée dans une batterie, appelée capacité de la batterie, est mesurée en wattheures (Wh), en kilowattheures (kWh) ou en ampères-heures (Ahr). Elle détermine le volume d'énergie pouvant être emmagasinée par la batterie puis redistribuée.

La capacité en wattheures (Wh) d'une batterie se calcule à partir de l'intensité de la batterie (donnée en ampère Ah) et en la multipliant par la tension exprimée en volt.

#### **EXEMPLE :**

Une batterie de 12 volts ayant une capacité de batterie de 500 Ah permet de stocker environ  $100 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} = 1\,200 \text{ Wh}$  ou 1,2 kWh

### **II.11.2 La profondeur de décharge :**

En fonction de la technologie utilisée, et afin de prolonger la durée de vie des batteries, celles-ci ne se déchargent jamais complètement. C'est pourquoi les batteries sont largement "surdimensionnées" par rapport à l'installation en place, de façon qu'elles ne se déchargent pas au-delà d'un certain seuil. Si ce seuil est donné par le fabricant à 50% par exemple, alors seulement 50% de la capacité de la batterie peut être utilisée, pas davantage. Cette méthode permet de mieux préserver les batteries sur la durée.

### **II.11.3 L'espérance de vie :**

La durée de vie d'une batterie est généralement évaluée en nombre de cycles qu'elle peut effectuer avant de ne plus être fonctionnelle, c'est à dire sa capacité à se charger et à se décharger. Chaque batterie réduira lentement sa capacité au fur et à mesure du temps qui passe et de la profondeur quotidienne de décharge. Moins une batterie effectuera de cycles, moins elle s'usera rapidement. On estime qu'une batterie sera bientôt inefficace lorsqu'elle aura perdu environ 20% de sa capacité d'origine. De nos jours, les batteries lithium sont notoirement les plus performantes avec une durabilité pouvant atteindre les 6000.

## **II.12 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons essayé de mettre en évidence le rayonnement de l'étoile « soleil » et son déplacement dynamique pendant une journée complète et à travers toute l'année.

Cette analyse nous permet de détecter les positions et les angles de la trajectoire de notre système de suivi solaire.

On a essayé aussi de présenter les différents types des plaques photovoltaïques, les traqueurs solaires, et les différentes batteries.

## Chapitre 3 :

Conception & simulation

### **III.1 Introduction :**

Dans cette partie nous présentons une conception complète sur notre suiveur solaire à base d'Arduino en utilisant la méthode UML avec deux diagrammes. Cas d'utilisation « use case » et diagramme de séquence.

Nous allons voir aussi deux simulations en utilisant le logiciel PROTEUS 8 professionnel.

Les deux systèmes de suivi solaire ont pour objectif de suivre l'étoile par différent méthode, pour la première simulation nous avons utilisé les 4 capteurs pour le suivi, et pour la deuxième nous avons utilisé un programme incluant un calendrier annuel qui calcule chaque jour la trajectoire du soleil.

### **III.2 Définition du langage UML :**

Le (Langage de Modélisation Unifié), de l'anglais Unifie Modeling Langage (UML), est un langage de modélisation graphique à base de pictogrammes conçu comme une méthode normalisée de visualisation dans les domaines du développement logiciel et en conception orientée objet.

L'UML est une synthèse de langages de modélisation objet antérieurs : Booch, OMT, OOSE. Principalement issu des travaux de Grady Booch, James Rumbaugh et Ivar Jacobson, UML est à présent un standard adopté par l'Object Management Group (OMG). UML 1.0 a été normalisé en janvier 1997, UML 2.0 a été adopté par l'OMG en juillet 2005. La dernière version de la spécification validée par l'OMG est UML 2.5.1 (2017) [28].

### **III.3 L'utilisation du langage UML :**

UML est destiné à faciliter la conception des documents nécessaires au développement d'un logiciel orienté objet, comme standard de modélisation de l'architecture logicielle. Les différents éléments représentables sont :

Activité d'un objet/logiciel.

Acteurs.

Processus.

Schéma de base de données.

Composants logiciels.

Réutilisation des composants.

Il est également possible de générer automatiquement tout ou partie du code, par exemple en langage Java, à partir des documents réalisés [28].

### III.4 Formalisme du langage UML :

UML est un langage de modélisation. La version actuelle, UML 2.5, propose 14 types de diagrammes dont sept structurels et sept comportementaux. À titre de comparaison, UML 1.3 comportait 25 types de diagrammes.

UML n'étant pas une méthode, l'utilisation des diagrammes est laissée à l'appréciation de chacun. Le diagramme de classes est généralement considéré comme l'élément central d'UML. Des méthodes, telles que le processus unifié proposé par les créateurs originels de UML, utilisent plus systématiquement l'ensemble des diagrammes et axent l'analyse sur les cas d'utilisation (« use case ») pour développer par itérations successives un modèle d'analyse, un modèle de conception, et d'autres modèles. D'autres approches se contentent de modéliser seulement partiellement un système, par exemple certaines parties critiques qui sont difficiles à déduire du code.

UML se décompose en plusieurs parties :

- **Les vues** : ce sont les observables du système. Elles décrivent le système d'un point de vue donné, qui peut être organisationnel, dynamique, temporel, architectural, géographique, logique, etc. En combinant toutes ces vues, il est possible de définir (ou retrouver) le système complet.
- **Les diagrammes** : ce sont des ensembles d'éléments graphiques. Ils décrivent le contenu des vues, qui sont des notions abstraites. Ils peuvent faire partie de plusieurs vues.
- **Les modèles d'élément** : ce sont les éléments graphiques des diagrammes.

#### III.4.1 Vues :

Une façon de mettre en œuvre UML est de considérer différentes vues qui peuvent se superposer pour collaborer à la définition du système :

- **Vue des cas d'utilisation (use-case view) :** c'est la description du modèle vu par les acteurs du système. Elle correspond aux besoins attendus par chaque acteur (c'est le quoi et le qui).
- **Vue logique (logical view) :** c'est la définition du système vu de l'intérieur. Elle explique comment peuvent être satisfaits les besoins des acteurs (c'est le comment).
- **Vue d'implémentation (implementation view) :** cette vue définit les dépendances entre les modules.
- **Vue des processus (process view) :** c'est la vue temporelle et technique, qui met en œuvre les notions de tâches concurrentes, stimuli, contrôle, synchronisation...
- **Vue de déploiement (deployment view) :** cette vue décrit la position géographique et l'architecture physique de chaque élément du système (c'est le où).

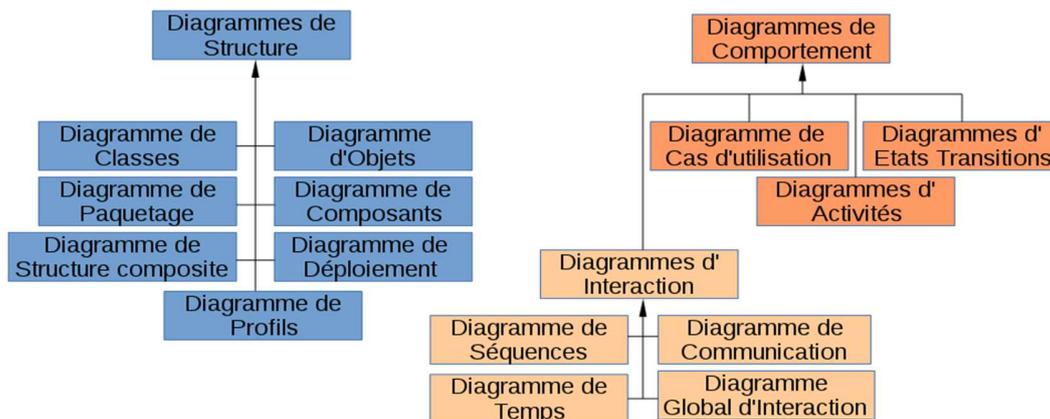
Le pourquoi n'est pas défini dans UML.

En UML 2.5, les diagrammes sont représentés sous deux types de vue : d'un point de vue statique ou structurelle du domaine avec les diagrammes de structure (Structure Diagrams).

D'un point de vue dynamique avec les diagrammes de comportement (Behavior Diagrams) et les diagrammes d'interactions (Interaction Diagrams).

### III.4.2 Diagrammes :

Les diagrammes sont dépendants hiérarchiquement et se complètent, de façon à permettre la modélisation d'un projet tout au long de son cycle de vie. Il existe quatorze depuis UML 2.3.



*Figure III.1 : Diffèrent diagramme de la méthode UML.*

### III.4.2.1 Diagramme de structure ou diagramme statique :

Les diagrammes de comportement (behavior diagrams) rassemblent :

- **Diagramme des cas d'utilisation (use-case diagram) :** représentation des possibilités d'interaction entre le système et les acteurs (intervenants extérieurs au système), c'est-à-dire de toutes les fonctionnalités que doit fournir le système.
- **Diagramme états-transitions (state machine diagram) :** représentation sous forme de machine à états finis du comportement du système ou de ses composants.
- **Diagramme d'activité (activity diagram) :** représentation sous forme de flux ou d'enchaînement d'activités du comportement du système ou de ses composants.

### III.4.2.2 Diagramme d'interaction ou diagramme dynamique :

Les diagrammes d'interaction (interaction diagrams) ou diagrammes dynamiques (dynamic diagrams) rassemblent :

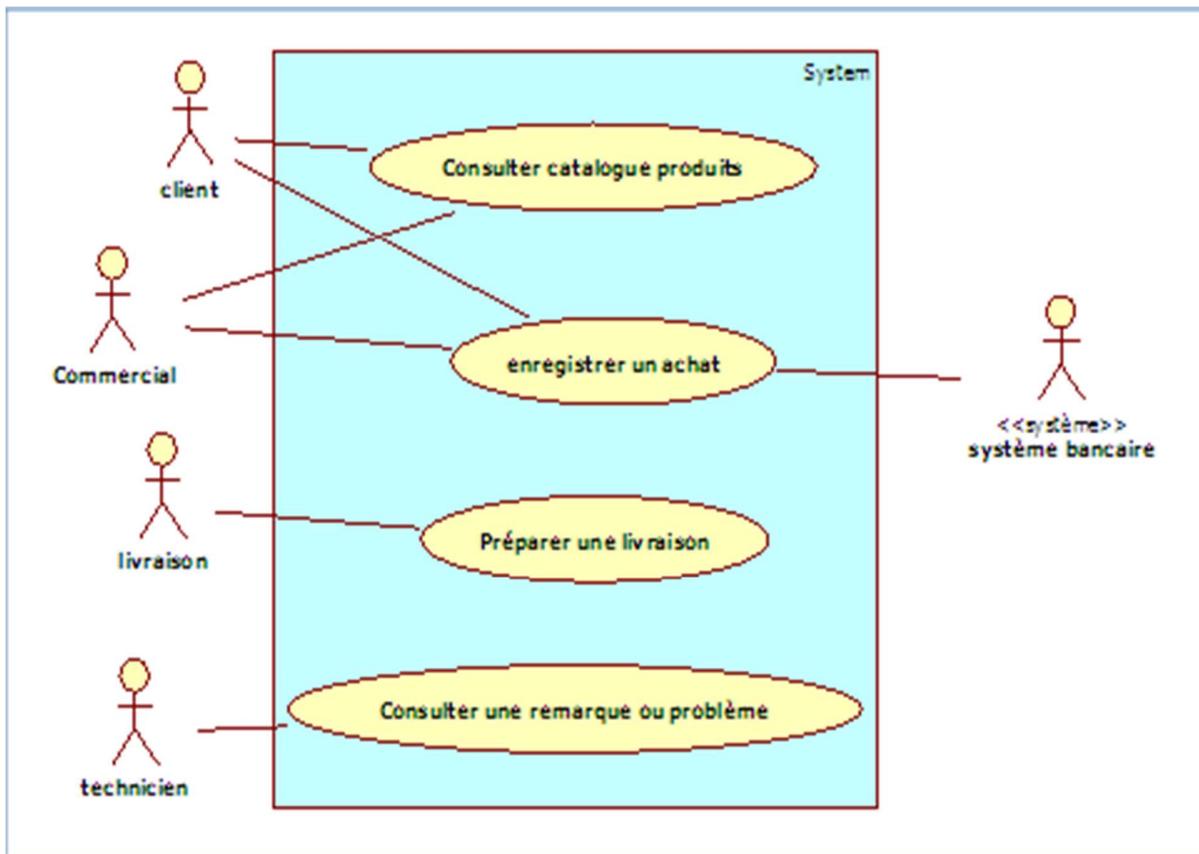
- **Diagramme de séquence (sequence diagram) :** représentation de façon séquentielle du déroulement des traitements et des interactions entre les éléments du système et/ou de ses acteurs.
- **Diagramme de communication (communication diagram) :** représentation de façon simplifiée d'un diagramme de séquence se concentrant sur les échanges de messages entre les objets (depuis UML 2.x).
- **Diagramme global d'interaction (interaction over view diagram) :** représentation des enchaînements possibles entre les scénarios préalablement identifiés sous forme de diagrammes de séquences (variante du diagramme d'activité) (depuis UML 2.x).
- **Diagramme de temps (timing diagram) :** représentation des variations d'une donnée au cours du temps (depuis UML 2.3).

### **III.5 Les diagrammes utilisés dans notre projet :**

#### **III.5.1 Diagramme de cas d'utilisation (use case) :**

##### **III.5.1.1 Définition :**

Les diagrammes de cas d'utilisation (DCU) sont des diagrammes UML utilisés pour une représentation du comportement fonctionnel d'un système logiciel. Ils sont utiles pour des présentations auprès de la direction ou des acteurs d'un projet, mais pour le développement, les cas d'utilisation sont plus appropriés. En effet, un cas d'utilisation (use cases) représente une unité discrète d'interaction entre un utilisateur (humain ou machine) et un système. Ainsi, dans un diagramme de cas d'utilisation, les utilisateurs sont appelés acteurs (actors), et ils apparaissent dans les cas d'utilisation [29].



*Figure III.2 : Diagramme de cas d'utilisation « use case ».*

Ils permettent de décrire l'interaction entre l'acteur et le système. L'idée forte est de dire que l'utilisateur d'un système logiciel a un objectif quand il utilise le système. Le cas d'utilisation est une description des interactions qui vont permettre à l'acteur d'atteindre son objectif en utilisant le système. Les use case (cas d'utilisation) sont représentés par une ellipse sous-titrée par le nom du cas d'utilisation (éventuellement le nom est placé dans l'ellipse). Un acteur et un cas d'utilisation sont mis en relation par une association représentée par une ligne.

### **III.5.1.2 Les Acteurs :**

Ils sont des entités externes qui interagissent avec le système, comme une personne humaine ou un robot. Une même personne (ou robot) peut être plusieurs acteurs pour un système, c'est pourquoi les acteurs doivent surtout être décrits par leur rôle, ce rôle décrit les besoins et les capacités de l'acteur. Un acteur agit sur le système. L'activité du système a pour

objectif de satisfaire les besoins de l'acteur. Les acteurs sont représentés par un pictogramme humanoïde (stick man) sous-titré par le nom de l'acteur.

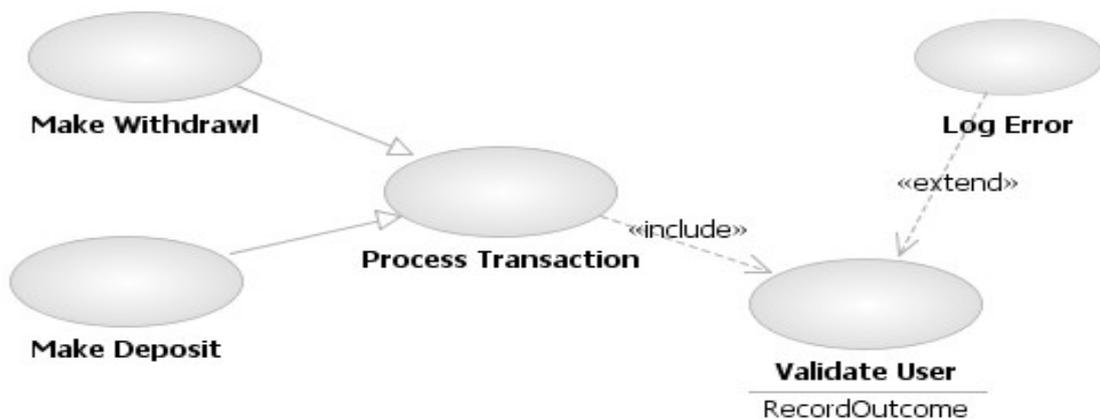
### III.5.1.3 Les différentes catégories des Acteurs :

Un acteur peut avoir différents rôles et est amené à intervenir dans une ou plusieurs situations. Miller (2001) en identifie quatre.

- **Initiateur** : acteur qui active le système et déclenche le cas.
- **Serveur** : acteur aidant le système à assumer ses responsabilités.
- **Receveur** : acteur recevant les informations du système (système de backup).
- **Facilitateur** : acteur dont les actions sont effectuées au bénéfice d'un autre acteur.

### III.5.1.4 Les relations :

Trois types de relations sont prises en charge par la norme UML et sont graphiquement représentées par des types particuliers de ces relations. Les relations indiquent que le cas d'utilisation source présente les mêmes conditions d'exécution que le cas issu. Une relation simple entre un acteur et une utilisation est un trait simple.



*Figure III.3 : Types de relation du diagramme use case.*

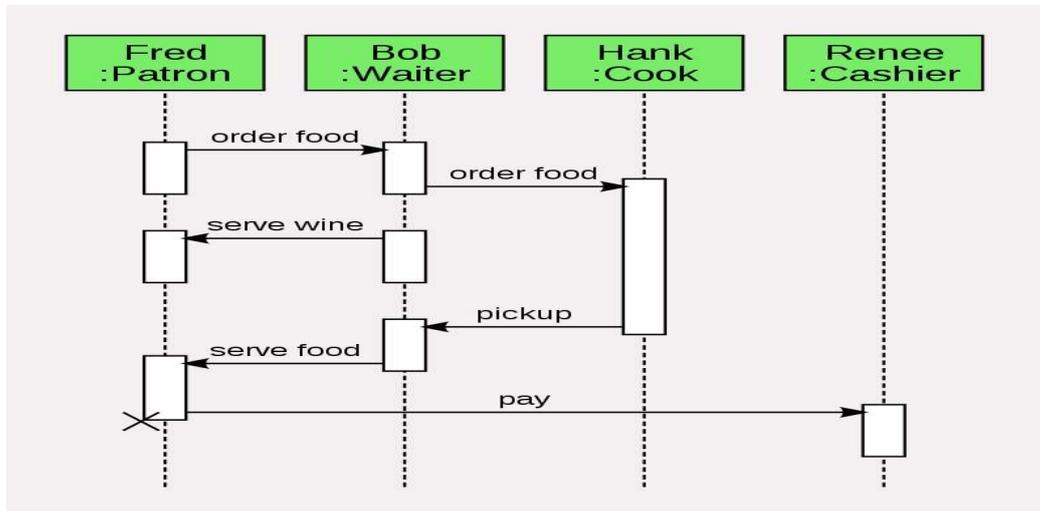
- **Inclusion** : Dans ce type d'interaction, le premier cas d'utilisation inclut le second et son issue dépend souvent de la résolution du second. Ce type de description est utile pour extraire un ensemble de sous-comportements communs à plusieurs tâches, comme une macro en programmation. Elle est représentée par une flèche en pointillé et le terme include.

- **Extension :** Les extensions (extend) représentent des prolongements logiques de certaines tâches sous certaines conditions. Autrement dit un cas d'utilisation A étend un cas d'utilisation B lorsque le cas d'utilisation A peut être appelé au cours de l'exécution du cas d'utilisation B. Elle est représentée par une flèche en pointillée avec le terme extend. Ce type de relation peut être utile pour traiter des cas particuliers ou fonctions optionnelles, préciser les objectifs, ou encore pour tenir compte de nouvelles exigences au cours de la maintenance du système et de son évolution.
- **Généralisation :** La troisième relation est la relation de généralisation ou spécialisation. Le cas d'utilisation A est une généralisation de B, si B est un cas particulier de A c'est-à-dire lorsque A peut-être substitué par B pour un cas précis. Ces relations sont des traits pleins terminés par une flèche en triangle.
- **Relation entre Acteurs :** Il est également possible d'appliquer à un acteur la relation de généralisation. Cela se fait notamment lorsqu'un acteur est un sous-type d'une autre catégorie d'acteurs. Un acteur lié à un autre par ce type de relation peut interagir avec le système de plus de manières que son parent.

### III.5.2 Diagramme de séquence :

#### III.5.2.1 Définition :

Les diagrammes de séquences sont la représentation graphique des interactions entre les acteurs et le système selon un ordre chronologique dans la formulation Unified Modeling Language.



*Figure III.4 : Représentation graphique du diagramme de séquence.*

Le diagramme de séquence permet de montrer les interactions d'objets dans le cadre d'un scénario d'un Diagramme des cas d'utilisation. Dans un souci de simplification, on représente l'acteur principal à gauche du diagramme, et les acteurs secondaires éventuels à droite du système. Le but étant de décrire comment se déroulent les actions entre les acteurs ou objets.

La dimension verticale du diagramme représente le temps, permettant de visualiser l'enchaînement des actions dans le temps, et de spécifier la naissance et la mort d'objets. Les périodes d'activité des objets sont symbolisées par des rectangles, et ces objets dialoguent à l'aide de messages [30].

### III.5.2.2 Dialogue entre les objets :

Plusieurs types de messages (actions) peuvent transiter entre les acteurs et objets.

- **Message simple** : le message n'a pas de spécificité particulière d'envoi et de réception.
- **Message avec durée de vie** : l'expéditeur attend une réponse du récepteur pendant un certain temps et reprend ses activités si aucune réponse n'a lieu dans un délai prévu.

- **Message synchrone :** l'expéditeur est bloqué jusqu'au signal de prise en compte par le destinataire. Les messages synchrones sont symbolisés par des flèches barrées.
- **Message asynchrone :** le message est envoyé, l'expéditeur continue son activité que le message soit parvenu ou pris en compte ou non. Les messages asynchrones sont symbolisés par des demi-flèches.
- **Message déroband :** le message est mis en attente dans une liste d'attente de traitement chez le récepteur.

Le langage permet de décaler l'envoi et la réception des messages, pour montrer les délais de communication non négligeables. La plupart des ateliers UML ne prennent cependant pas en compte cette spécificité.

### III.5.2.3 Cadre d'interaction :

Pour les cas plus complexes, on peut intégrer des algorithmes dans les diagrammes de séquences. Par le biais de cadres d'interaction, on peut préciser les opérantes d'un ensemble de messages :

alt : fragments multiple alternatifs (si alors sinon)

opt : fragment optionnel

par : fragment parallèle (traitements concurrents)

loop : le fragment s'exécute plusieurs fois

region : région critique (un seul thread à la fois)

neg : une interaction non valable

break : représente des scénarios d'exception

ref : référence à une interaction dans un autre diagramme

sd : fragment du diagramme de séquence en entier

### III.6 Conception du fonctionnement en utilisant le diagramme use case :

#### III.6.1 Arduino :

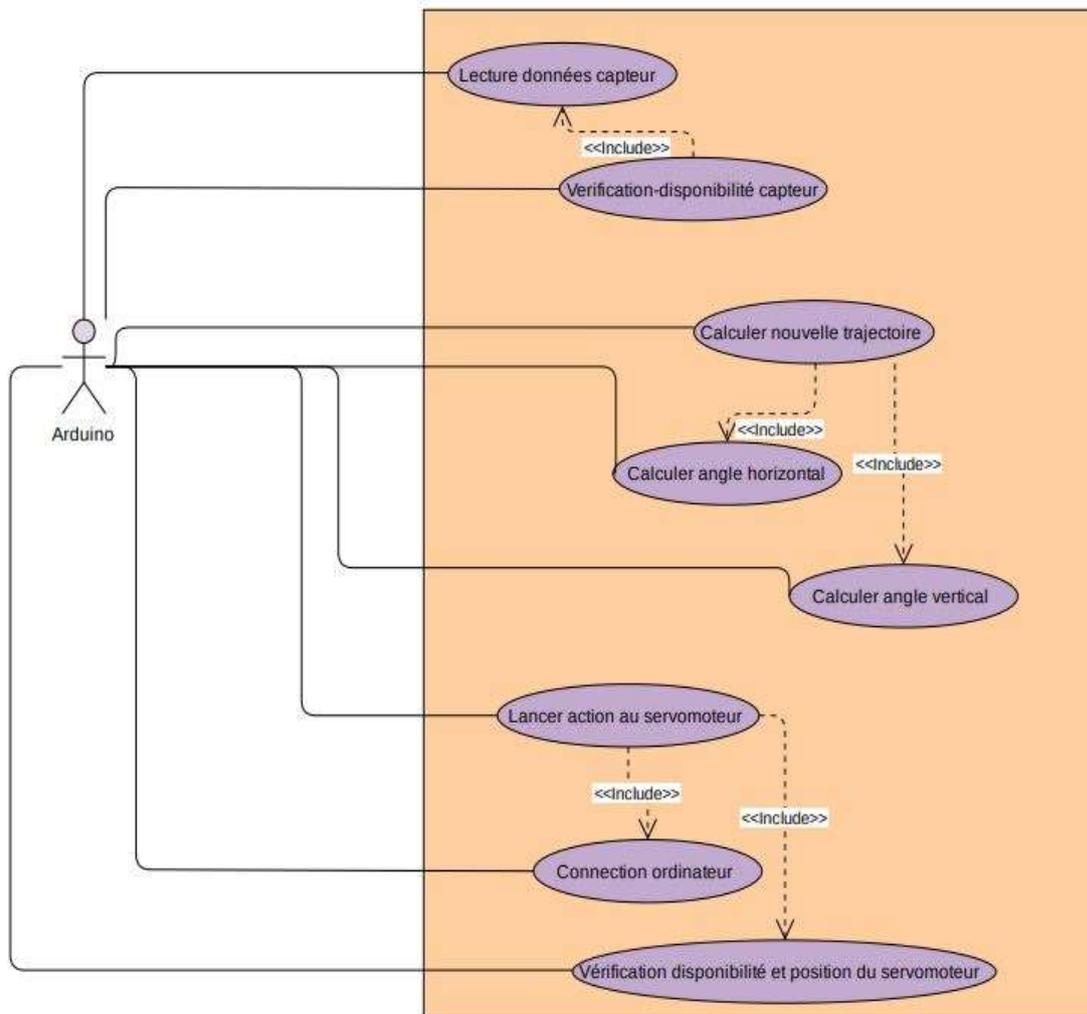


Figure III.5 : Présentation des actions de L'Arduino diagramme cas d'utilisation.

### III.6.2 Capteur :

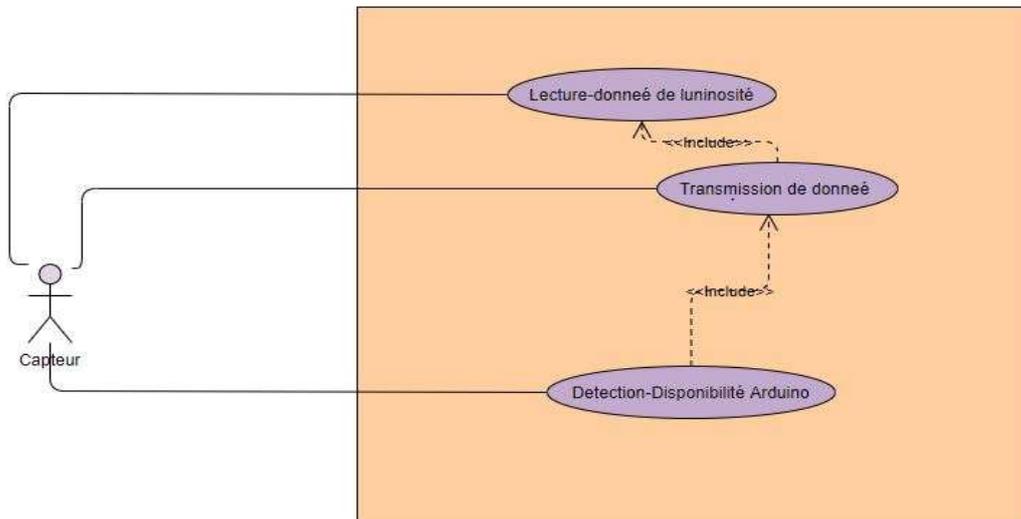


Figure III.6 : Présentation des actions de capteur diagramme cas d'utilisation.

### III.6.3 Servo-Moteur:

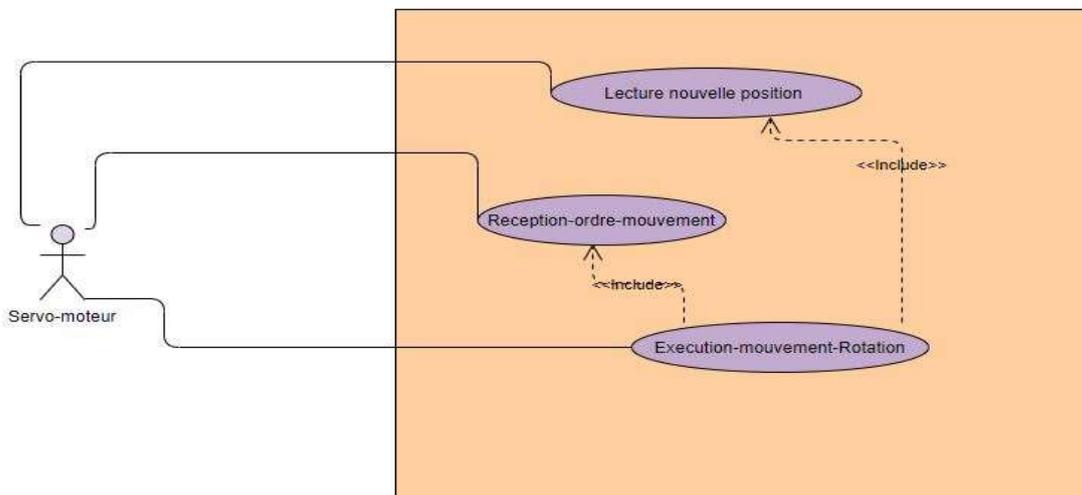


Figure III.7 : Présentation des actions de servo moteur diagramme cas d'utilisation.

### III.7 Conception du fonctionnement en utilisant le diagramme de séquence :

#### III.7.1 Modélisation 1 : Un seul capteur et détection de la trajectoire

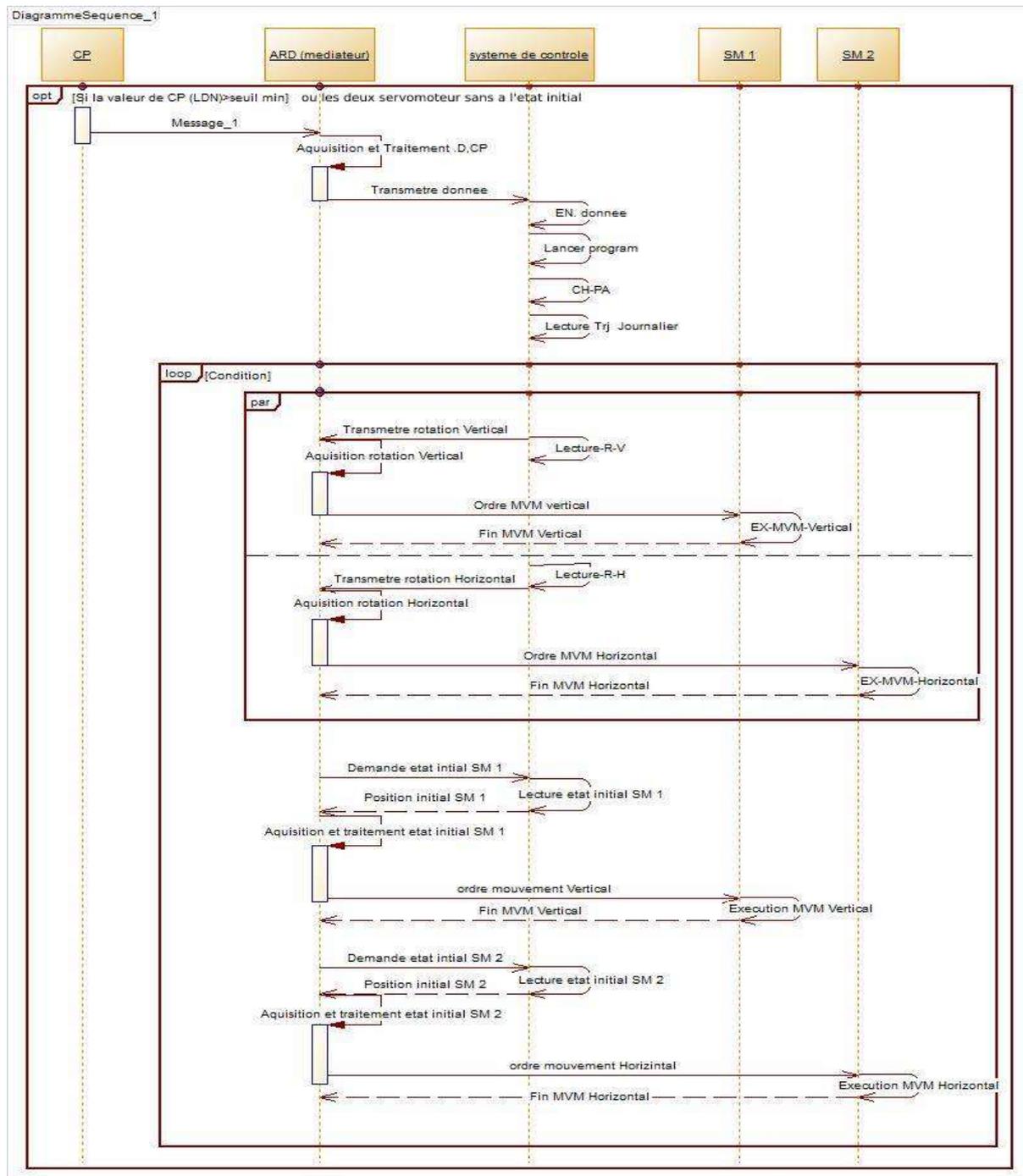


Figure III.8 : Présentation de la première modélisation avec le diagramme de séquence.

### III.7.1.1 Les codes utilisés :

Message 1 : Lecture donnée de luminosité

ARD : Arduino

D : Donnée

CP : Capteur

EN : Enregistrement

SM : Servo moteur

OPT (Condition): Si valeur de LDN $\geq$ seuil Alors Autorisation de système accordée

CH-PA : Chargement de planning annuel

Trj : trajectoire

Par : parallèle traitement

Ex-MV-V : Exécution du mouvement Vertical

Ex-MV-H : Exécution du mouvement Horizontal

R : Rotation

MVM : Mouvement

Loop : c'est une Boucle

### III.7.2 Modélisation 2 : Utilisation de quatre (4) capteurs dans notre suiveur

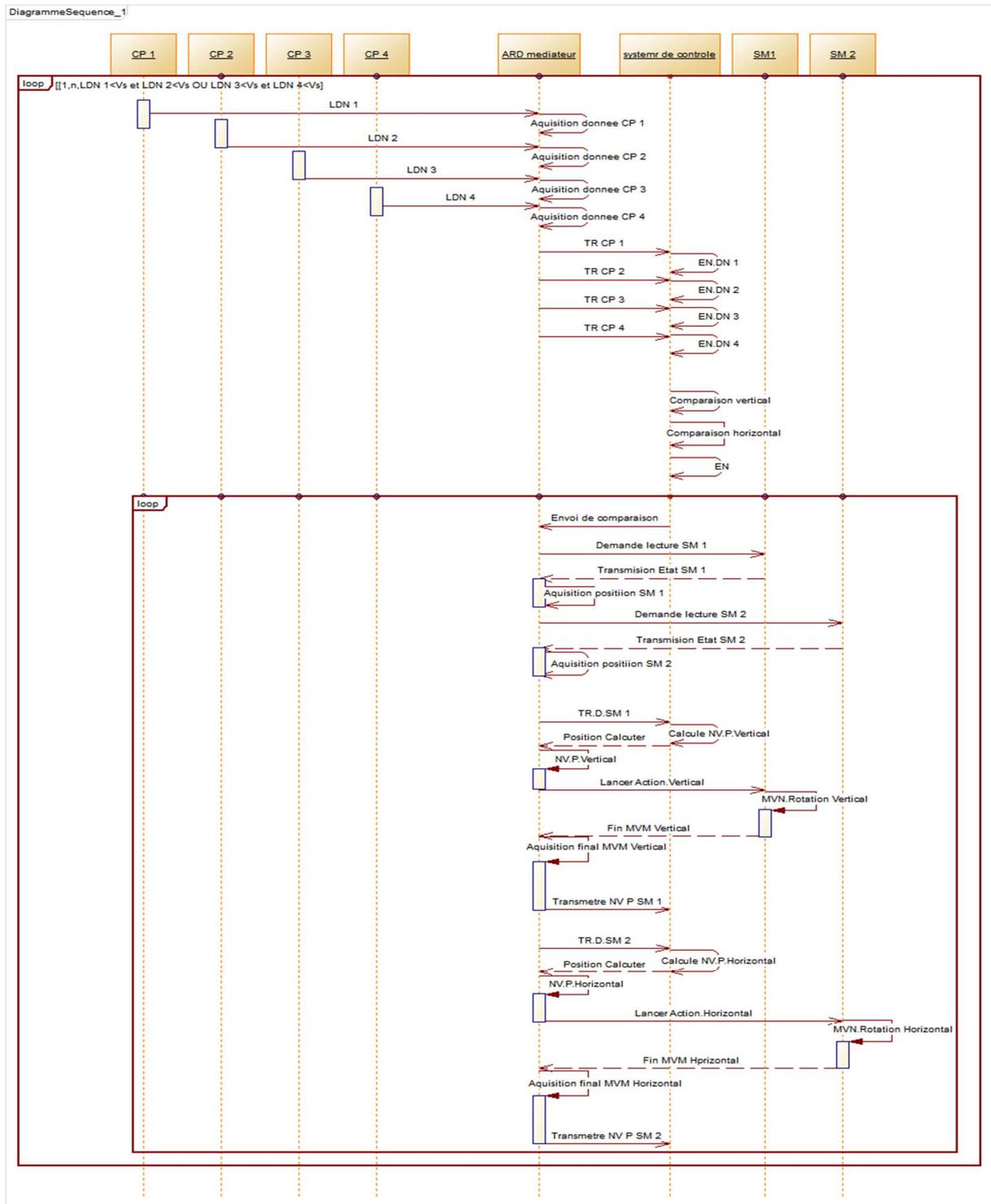


Figure III.9 : Présentation de la deuxième modélisation avec le diagramme de séquence.

### III.7.2.1 Les codes utilisés :

ARD : Arduino

TR : Traitement

LDN : Lecture donnée de Luminosité

D : Donnée

CP : Capteur

EN : Enregistrement

SM : Servo moteur

OPT (Condition) : Si valeur de LDN $\geq$ seuil Alors Autorisation de système accordée

CH-PA : Chargement de planning annuel

Trj : trajectoire

Par : parallèle traitement

Ex-MV-V : Exécution du mouvement Vertical

Ex-MV-H : Exécution du mouvement Horizontal

R : Rotation

P : Position

MVM : Mouvement

Loop : c'est une Boucle

### III.8 Simulation du fonctionnement en utilisant le logiciel Proteus 8 Professionnel :

Pour donner suite à la précédente sélection des composants, nous allons à présent procéder au rassemblement des données collectées sur un seul schéma électrique à l'aide du logiciel ISIS PROTEUS. Dans le présent chapitre et dans un souci de continuité logique, nous aborderons les étapes pour la réalisation du projet sur ce logiciel de simulation.

#### III.8.1 Définition du Logiciel Proteus :

PROTEUS est une suite logicielle permettant la conception assistée par ordinateur électronique éditée par la société L'absenter Electroniques. Il est composé de deux logiciels principaux : ISIS, permettant entre autres la création de schémas et la simulation électrique, et ARES, dédié à la création de circuits imprimés. Grâce à des modules additionnels, ISIS est également capable de simuler le comportement d'un microcontrôleur (PIC, Atmel, 8051, ARM, HC11...) et son interaction avec les composants qui l'entourent. C'est ce dernier atout qui nous a convaincu de le choisir pour concevoir notre projet.

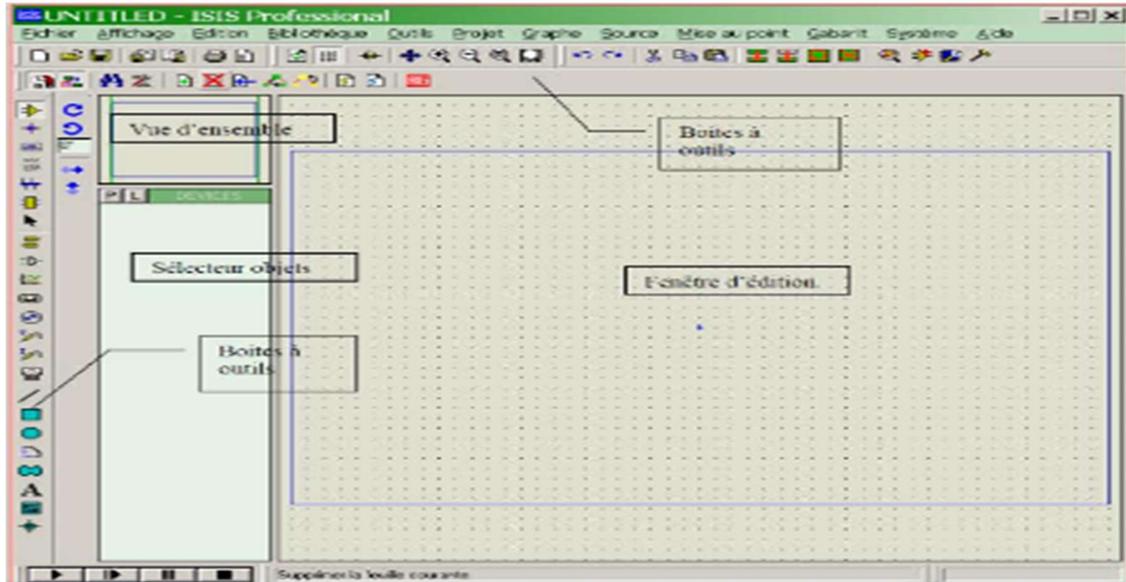


Figure III.10 : Interface de logiciel PROTEUS.

### III.8.2 ISIS :

Le logiciel ISIS de PROTEUS est principalement connu pour éditer des schémas électriques. Par ailleurs, le logiciel permet également de simuler ces schémas ce qui permet de détecter certaines erreurs dès l'étape de conception. Indirectement, les circuits électriques conçus grâce à ce logiciel peuvent être utilisés dans des documentations car le logiciel permet de contrôler la majorité de l'aspect graphique des circuits.

#### III.8.2.1 Sélection des composants à utiliser :

Pour faire la sélection des éléments qu'on veut utiliser : Un clic sur l'icône (Component Mode) puis sur bouton parcourir la bibliothèque (Figure III.11)[31].

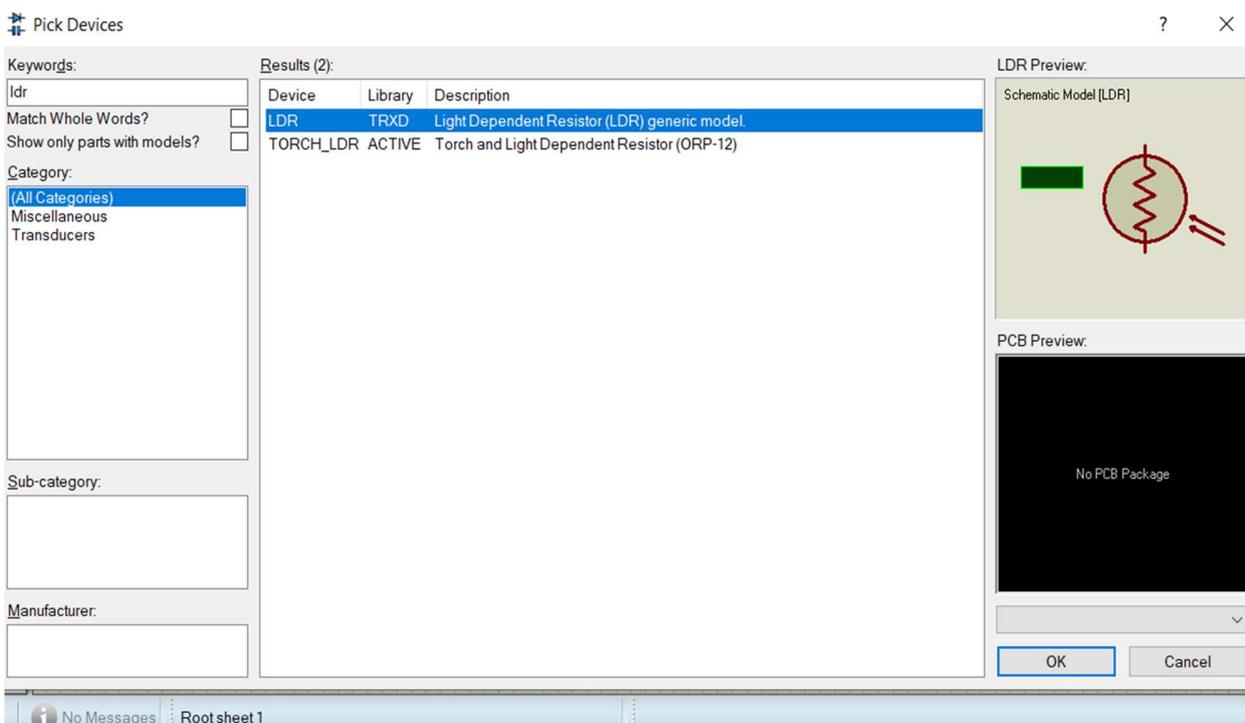


Figure III.11 : Interface de sélection des composants.

### III.8.3 Simulation 1 : Un seul capteur et détection de la trajectoire :

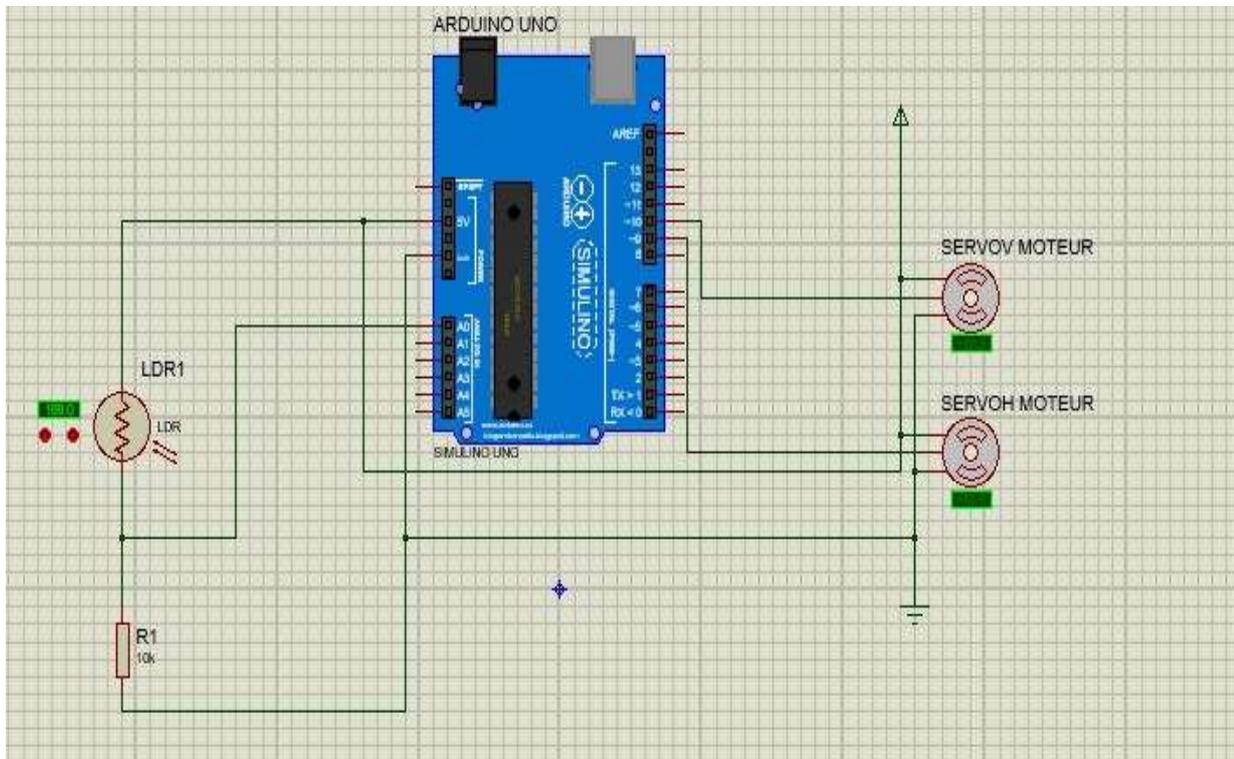


Figure III.12 : Présentation première simulation avec PROTEUS.

#### III.8.3.1 Principe du Fonctionnement :

Le suiveur solaire suit une trajectoire déterminée par rapport à la position de ce dernier (calcul de la trajectoire et le temps d'ensoleillement par rapport au suiveur).

Le principe de notre programme est si le capteur de lumière (LDR trajectoire) capte la lumière et la position de servo horizontal égale à l'angle initial du départ donc ce dernier incrémente par un pas.

Si la position de servo horizontal est supérieure à ( $5^\circ$ ) et la position du servo verticale est inférieure à ( $120^\circ$ ) ce dernier incrémente par un pas jusqu'à cet angle.

Sinon le servo vertical revient à sa position initiale (position de départ).

Et le servo horizontal revient à sa position initiale (position de départ) pour redémarrer la boucle le jour suivant.

LDR trajectoire.

Lux la valeur de la lumière captée.

### III.8.4 Simulation 2 : Utilisation de 4 capteurs dans notre suiveur :

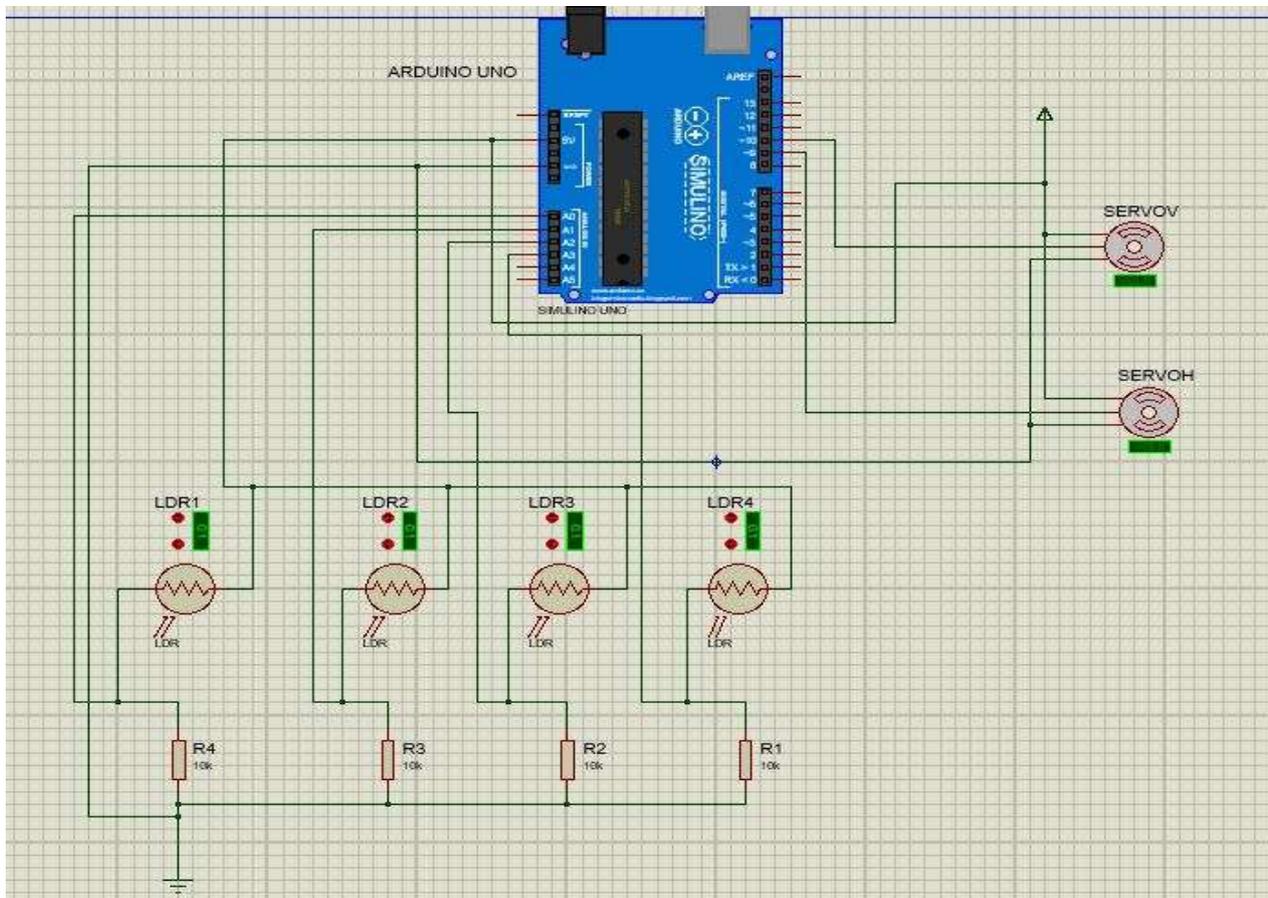


Figure III.13 : Présentation deuxième simulation avec PROTEUS.

#### III.8.4.1 Principe de fonctionnement :

Le suiveur solaire s'oriente à l'aide de deux servo moteurs (horizontal et vertical) après avoir capté la lumière par les quatre capteurs (LDR =light dependent resistor).

Le principe de notre programme est de vérifier s'il y'a une différence verticale entre le haut et le bas (par une équation de la différence entre la valeur moyenne de la lumière captée vers le haut et la valeur moyenne de la lumière captée vers le bas).

Si la valeur moyenne vers le haut est supérieure à la valeur moyenne basse, le servo vertical incrémente par un pas, si l'angle du servo vertical est supérieur à l'angle de la limite du servo verticale lorsque le signal est élevé, l'angle du servo vertical règle à la limite du servo vertical lorsque le signal est élevé.

Sinon si la valeur moyenne vers le haut est inférieure à la valeur moyenne vers le bas le servo décrémente par un pas et, si ce dernier est inférieur à l'angle de la limite du servo verticale lorsque le signal est faible alors l'angle du servo vertical règle à la limite du servo lorsque le signal est faible.

Vérifier s'il y'a une différence horizontale entre la gauche et la droite (par une équation de la différence entre la valeur moyenne de la lumière captée vers la gauche et la valeur moyenne de la lumière captée vers la droite.

Si la valeur moyenne vers la gauche est supérieure à la valeur moyenne vers la droite, le servo horizontal décrémente par un pas.

Si l'angle du servo horizontal est inférieur à l'angle de la limite du servo horizontal lorsque le signal est faible, l'angle du servo horizontal règle à la limite du servo horizontal lorsque le signal est faible.

Sinon si la valeur moyenne vers la droite est inférieure à la valeur moyenne vers la gauche le servo incrémente par un pas et, si ce dernier est supérieur à l'angle de la limite du servo horizontal lorsque le signal est élevé alors l'angle du servo horizontal règle à la limite du servo lorsque le signal est élevé.

Servo horizontal s'orienté à gauche et à droite.

Servo vertical s'orienté en haut et bas.

LDR 1 left top \_\_\_\_ haute à gauche.

LDR 3 right top \_\_\_\_ haute à droite.

LDR 2 left down \_\_\_\_ bas à gauche.

LDR 4 right down \_\_\_\_ bas à droite.

### **III.9 Conclusion :**

Comme présenté ci-dessus, nous avons exposé deux conceptions, utilisant différents outils et diagrammes, avec simulations et principe de fonctionnement. Pouvant être testé sur notre module.

## Chapitre 4:

# Réalisation

## IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la procédure utilisée pour créer un tracker solaire en utilisant les étapes suivantes :

La base de la carte de développement Arduino. Ce dernier comprend le corps principal (partie mécanique) du suiveur et Contrôle de mouvement (partie électronique).

S'orienter de manière optimale dans le sens de la lumière, en suivant les deux axes de rotation (vertical et horizontal), grâce à la carte de développement Arduino (microcontrôleur).

## IV.2 Les composants électroniques utilisés dans la réalisation :

### IV.2.1 La Carte Arduino UNO :

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



*Figure IV.1 : Action avec Arduino. [32]*

Arduino est un projet open source. En effet, les plans de la carte, les schémas, etc. sont accessibles et libres de droits. La grande communauté d'utilisateurs et de concepteurs

permet à chacun de trouver les réponses à ses questions et apporte un travail énorme de documentation au projet. L'Arduino est utilisé dans plusieurs applications comme l'électrotechnique industrielle, la domotique, le pilotage de robots, etc. Les projets Arduino peuvent être autonomes, comme ils peuvent communiquer avec d'autres logiciels installés sur ordinateur tel que Flash, Processing ou MaxMPS, Matlab.

#### **IV.2.1.1 Constitution de la carte Arduino Uno :**

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

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

Les LED de taille petite (de l'ordre du millimètre) sont au nombre de quatre (04). Trois alignés au milieu de la carte et un LED témoin d'alimentation à gauche. Parmi les LED alignés, le LED en haut du cadre connecté à une broche du microcontrôleur et qui sert à tester le matériel. Les deux LED du bas du cadre servent à visualiser l'activité sur la voie série (une pour l'émission et l'autre pour la réception). Le téléchargement du programme dans le microcontrôleur se faisant par cette voie, on peut les voir clignoter lors du chargement

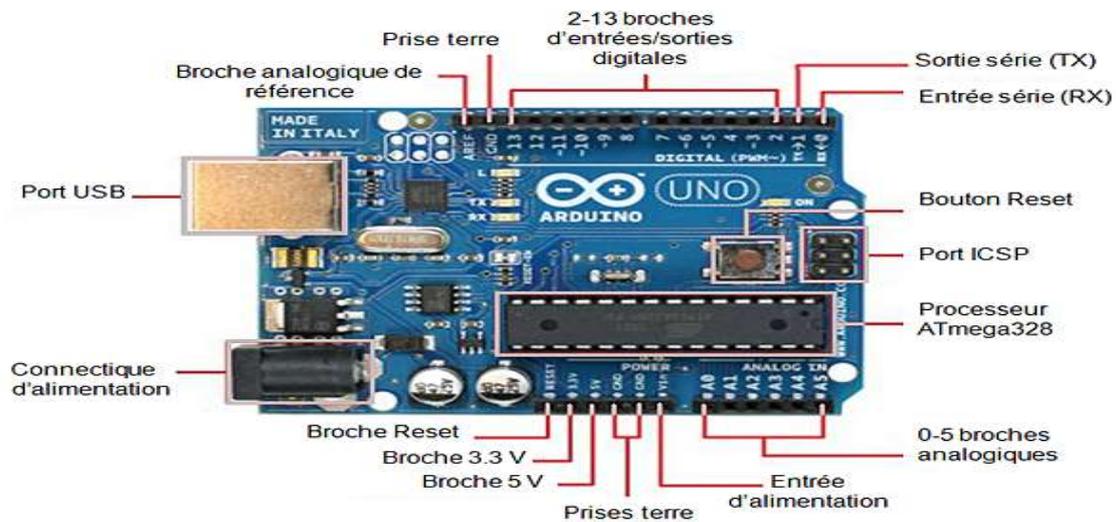


Figure IV.2 : Les composants de la carte Arduino UNO.

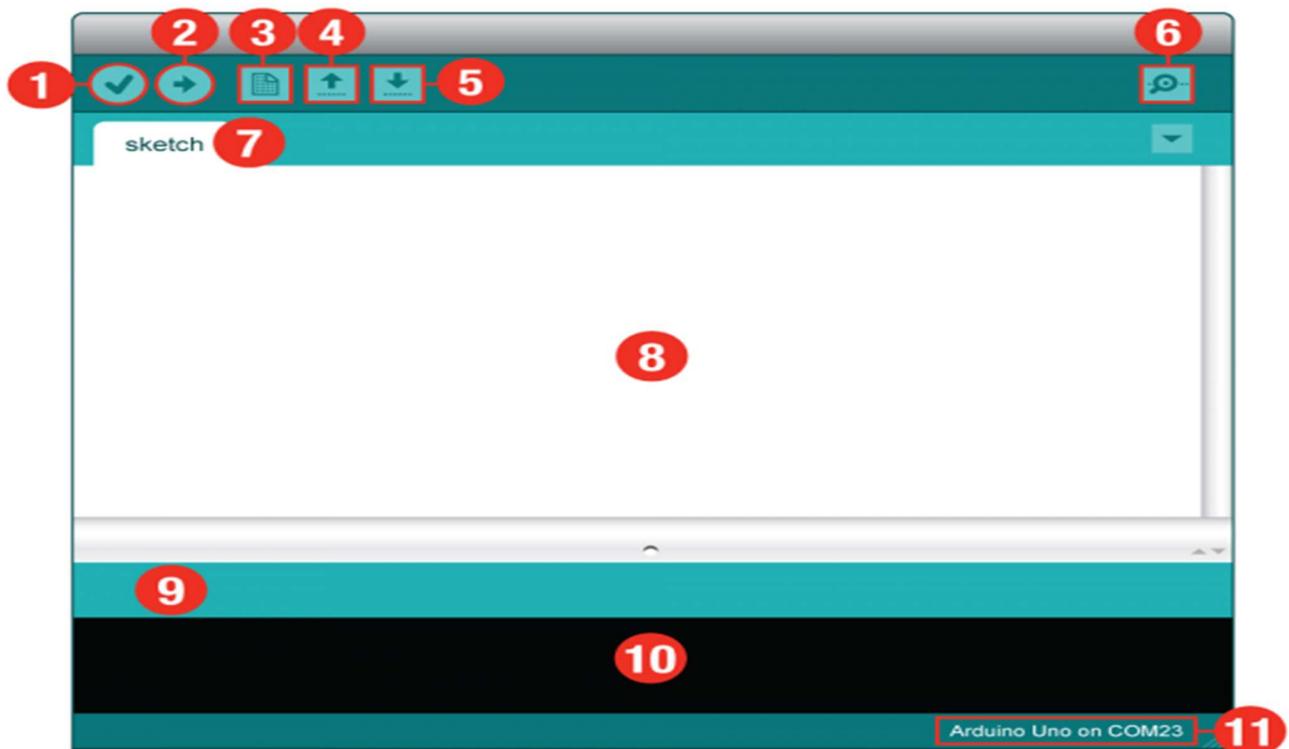
Le Tableau IV.1 : Caractéristiques techniques de la carte Arduino utilisée dans notre projet.

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

**Remarques :**

La carte Arduino Uno est livrée prête à fonctionner, il suffit de la connecter à un ordinateur par câble USB et de l'alimenter à l'aide d'un adaptateur USB ou de piles, Les entrées analogiques permettent de mesurer une tension variable (entre 0 et 5 V) qui peut provenir de capteurs ou d'interfaces divers (potentiomètres, etc.), Les entrées/sorties

numériques reçoivent ou envoient des signaux « 0 » ou « 1 » traduits par 0 ou 5 V. Les sorties numériques sont reliées aux actionneurs qui agissent sur le monde physique telle une petite lampe qui produit de la lumière, un moteur qui actionne un bras articulé...etc. La plateforme IDE ARDUINO qui est la partie logicielle fonctionnant sur PC, permet de mettre au point et de transférer le programme qui sera par la suite exécutée par la carte Arduino. Son interface se présente comme suit:



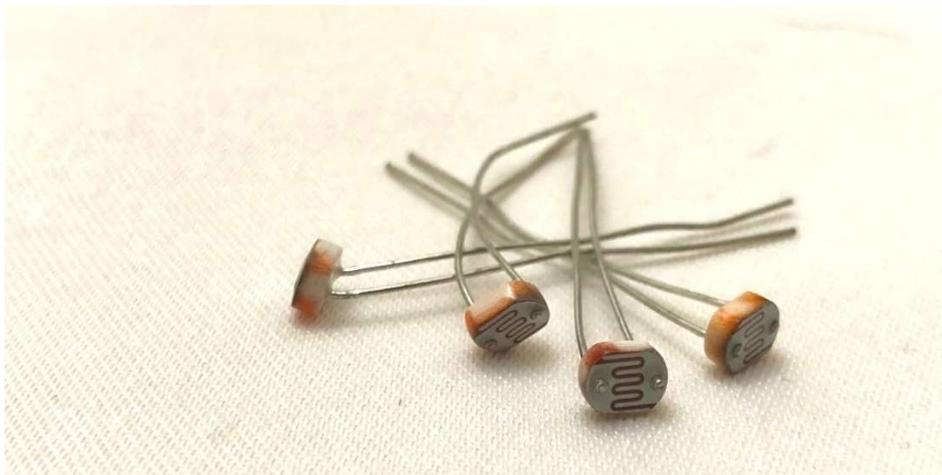
*Figure IV.3 : Boutons de l'interface de la plateforme logiciel Arduino.*

1. **Vérifier** : compile et approuve votre code. Cette fonction identifie les erreurs de syntaxe (comme les points-virgules et parenthèses manquants).
2. **Télécharger** : transmet votre code à la carte 101.
3. **Nouveau** : ce bouton ouvre un nouvel onglet (fenêtre) de code.
4. **Ouvrir** : ce bouton vous permet d'ouvrir un programme (sketch) existant.
5. **Enregistrer** : enregistre le sketch actif en cours.

6. **Moniteur série** : ouvre une fenêtre qui affiche toutes les données Série que transmet votre carte 101. Cette fonction est très utile pour le débogage.
7. **Nom du sketch** : indique le nom du sketch sur lequel vous travaillez actuellement.
8. **Zone de code** : zone dans laquelle vous composez le code de votre sketch.
9. **Zone de message** : zone dans laquelle l'EDI vous indique les éventuelles erreurs dans votre code.
10. **Console de texte** : affiche l'intégralité des messages d'erreur. Cette console est très utile pendant le débogage.
11. **Carte et port série** : indique la carte et le port série sélectionnée.

#### IV.2.2 Capteurs de lumière LDR :

La photorésistance 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. D'ailleurs, sa résistance est inversement proportionnelle au flux lumineux incident.



*Figure IV.4 : Capteur de lumière LDR.*

Les matériaux utilisés dans la fabrication des LDR sont généralement du Sulfure ou du Sélénure de Cadmium qui se comportent comme des semi-conducteurs, ce qui leur confère un temps de réponse de 120 millisecondes pour un éclaircissement de 10 lux

(valeur pour des conditions d'ensoleillement faible). Ce capteur de mesure de l'intensité lumineuse (LDR) est fortement concurrencé par la photodiode. Dans notre projet nous avons choisi d'utiliser la LDR (Voir la Figure IV.4), vu son plus court temps de réponse. Le Tableau IV.2 représente les valeurs typiques de fonctionnement de la photorésistance solaire utilisée. [34]

### IV.2.3 Servomoteurs

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

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

Robotique pour fabriquer des minirobots, des actionneurs ou des indicateurs rotatifs. [35]

Le servomoteur est constitué d'éléments visibles suivants (voir la Figure IV.5) :

Fils.

Axe de rotation sur lequel est monté un accessoire en plastique ou en métal.

Boîtier qui le protège. Ce dernier contient (voir la Figure IV.5) :

Un moteur à courant continu.

Des engrenages pour former un réducteur.

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

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



*Figure IV.5 : Servomoteur MG90S.*

*Tableau IV.2: Caractéristiques du servomoteur utilisé.*

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

### **IV.2.3.1 Fonctionnement interne du servomoteur :**

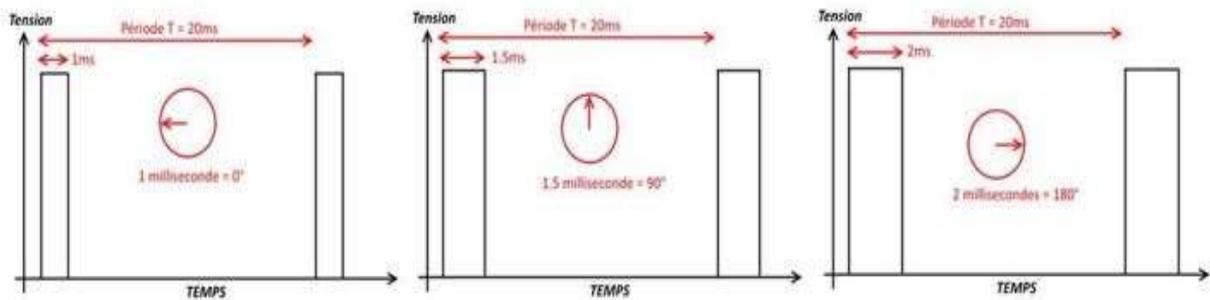
Les servomoteurs sont commandés par l'intermédiaire d'un câble électrique qui leur transmet des consignes de position sous forme d'un signal codé en largeurs d'impulsions communément appelé PWM. Cela signifie que c'est la durée des impulsions

qui détermine l'angle absolu de l'axe de sortie et donc la position de bras de commande du servomoteur.

En effet, un petit circuit électronique permet de contrôler le moteur à courant continu en fonction de la position d'un potentiomètre intégré au servomoteur. La sortie du moteur à courant continu est reliée mécaniquement à une série d'engrenages qui augmente la force (le couple) du servomoteur en réduisant la vitesse de rotation de celui-ci.

Quand le moteur tourne, les engrenages s'animent, le bras bouge et entraîne avec lui le potentiomètre. Le circuit électronique ajuste continuellement la vitesse du moteur pour que le potentiomètre (et par extension le bras) reste toujours au même endroit. Pour que le servomoteur reste à une position donnée, il faut transmettre toutes les 20 millisecondes (soit à une fréquence de 50Hz) une impulsion d'une longueur comprise entre 1 et 2 millisecondes (voir la Figure IV.6).

- Une impulsion de 1 milliseconde correspond à un angle de  $0^\circ$ .
- Une impulsion de 2 millisecondes correspond à un angle de  $180^\circ$ .
- En envoyant une impulsion d'une longueur intermédiaire, on obtient des angles différents, par exemple l'angle  $90^\circ$  est obtenu avec une impulsion de 1.5 milliseconde.



*Figure IV.6 : Signal de contrôle. [36]*

## IV.2.4 Câblages :

### IV.2.4.1 Câble USB :

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



*Figure IV.7 : Basics Câble USB 2.0 A-mâle vers B-mâle.*

### IV.2.4.2 Fils de Pin d'Arduino (Cable jumper) :

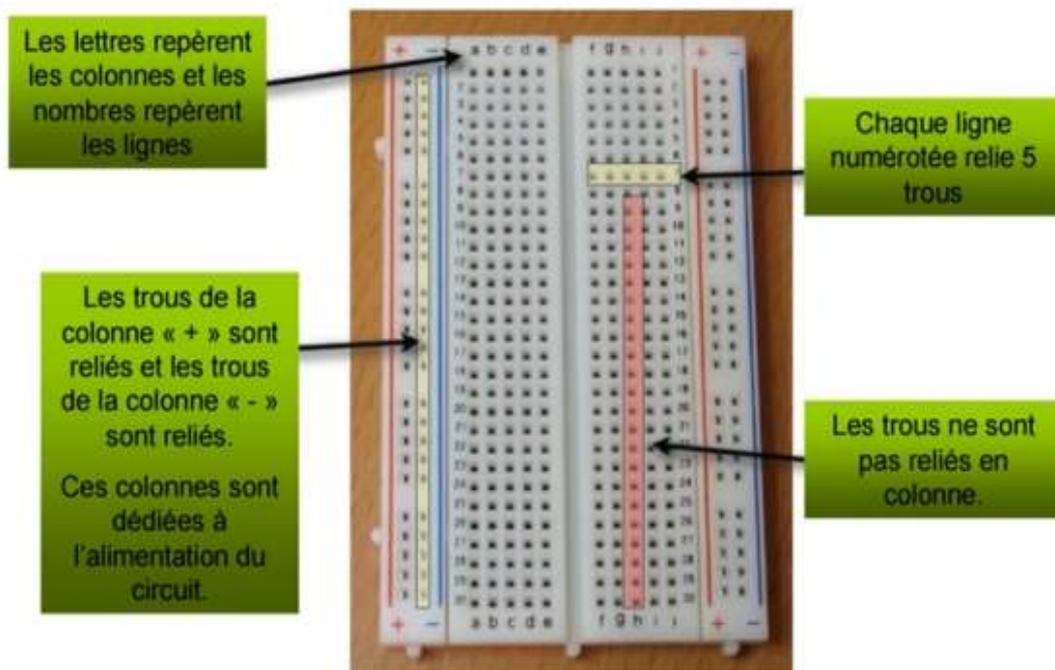
Ces fils males sont utilisés pour brancher et connecter l'Arduino avec d'autres pièces (actionneurs) et pour la tester (Figure IV.8).



*Figure IV.8 : Fils de pin d'Arduino.*

### IV.2.5 Plaque d'essai :

La plaque d'essai est une plaque en plastique isolant parsemé de plein de trous, espacés de 2.54 mm qui est l'espacement standard des composants électroniques utilisé dans les montages courants (voir la Figure IV.9). Ces trous permettent d'enfoncer des composants sans passer par la soudure afin de les relier entre eux dans le but de réaliser le montage à tester. Autrement dit, la plaque d'essai est un dispositif qui permet de réaliser rapidement un montage électronique en insérant les pattes des composants et les fils dans les trous.



*Figure IV.9 : Plaque d'essai sans soudure. [36]*

### IV.2.6 Panneau solaire 6v/1w :

Le Panneau solaire utilisé dans notre projet est de 6V / 1W, c'est une plaque en silicium polycristallin, stable et de haute efficacité. La cellule solaire est utilisée pour le chargeur DIY en absorbant l'énergie solaire. Sa taille portable le rend facile et pratique à exploiter.

Tension de fonctionnement : 6 V. Puissance de sortie : 1 W.

Elle Convient pour charger les téléphones portables, les jouets à énergie solaire, les pompes à eau à énergie solaire, les petits systèmes d'alimentation solaire, etc.

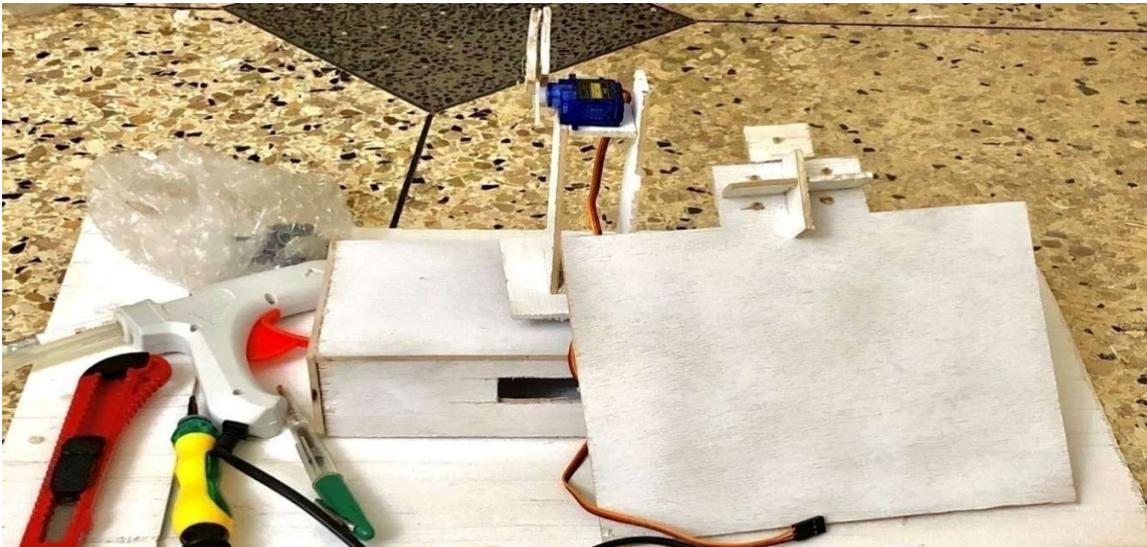


*Figure IV.10 : Panneau photovoltaïque.*

### **IV.3 Description des composants mécaniques utilisés :**

Le Dispositif mécanique utilisé est composé d'un assemblage de bois, Deux axes mobiles (voir figure IV.11) un axe horizontal et un axe vertical. Une plaque dans laquelle nous avons placé le panneau solaire et un petit assemblage de bois en top de cette plaque sur laquelle nous avons placé les capteurs LDR.

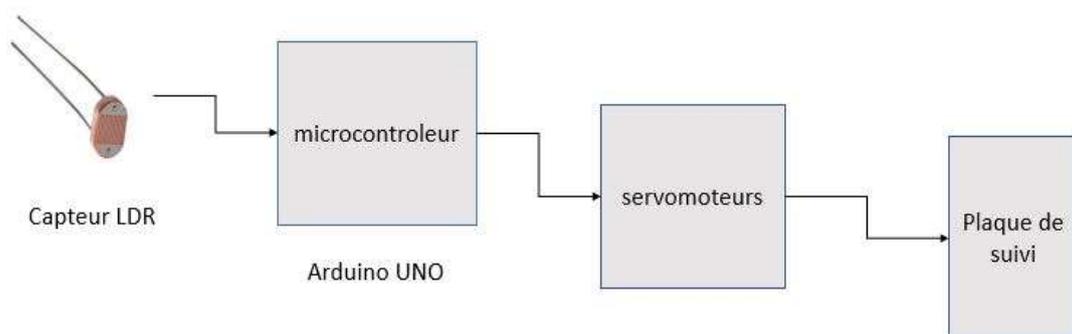
Tout D'abord, L'axe horizontal fait des rotations de l'est vers l'ouest pour suivre la trajectoire du soleil au cours de la journée, cependant L'axe vertical fait des rotations du nord vers le sud pour suivre le changement de l'angle du soleil pendant l'année.



*Figure IV.11 : Le dispositif mécanique.*

#### IV.4 Réalisation du suiveur solaire :

La Figure IV.12 montre le schéma fonctionnel du suiveur réalisé. Les capteurs de lumière LDR représentent les entrées de la carte Arduino, cette dernière va contrôler les deux servomoteurs (sortie de la carte), reliés à leur tour aux axes de rotation de la plaque de suivi (partie mécanique du suiveur).

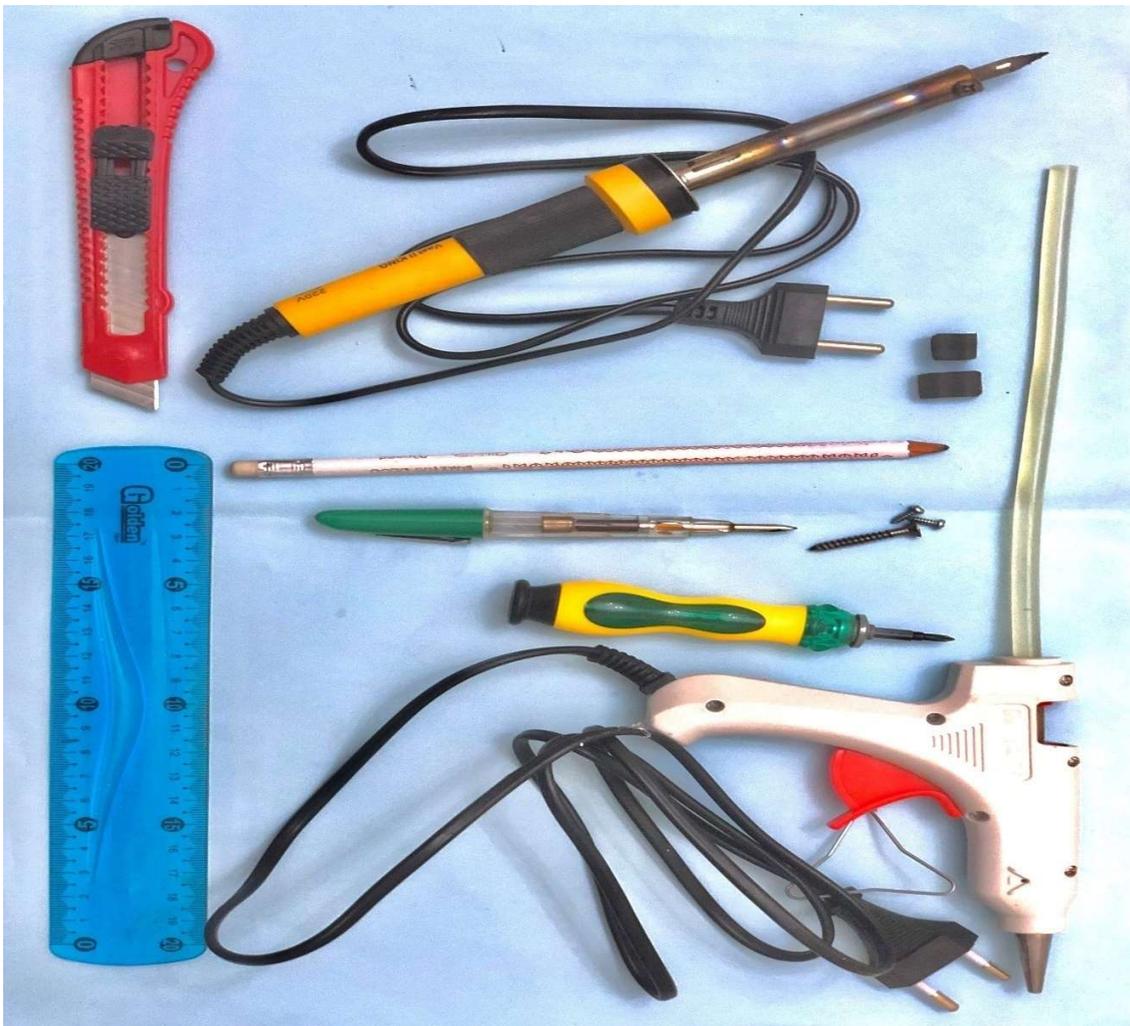


*Figure IV.12 : Le schéma fonctionnel du suiveur.*

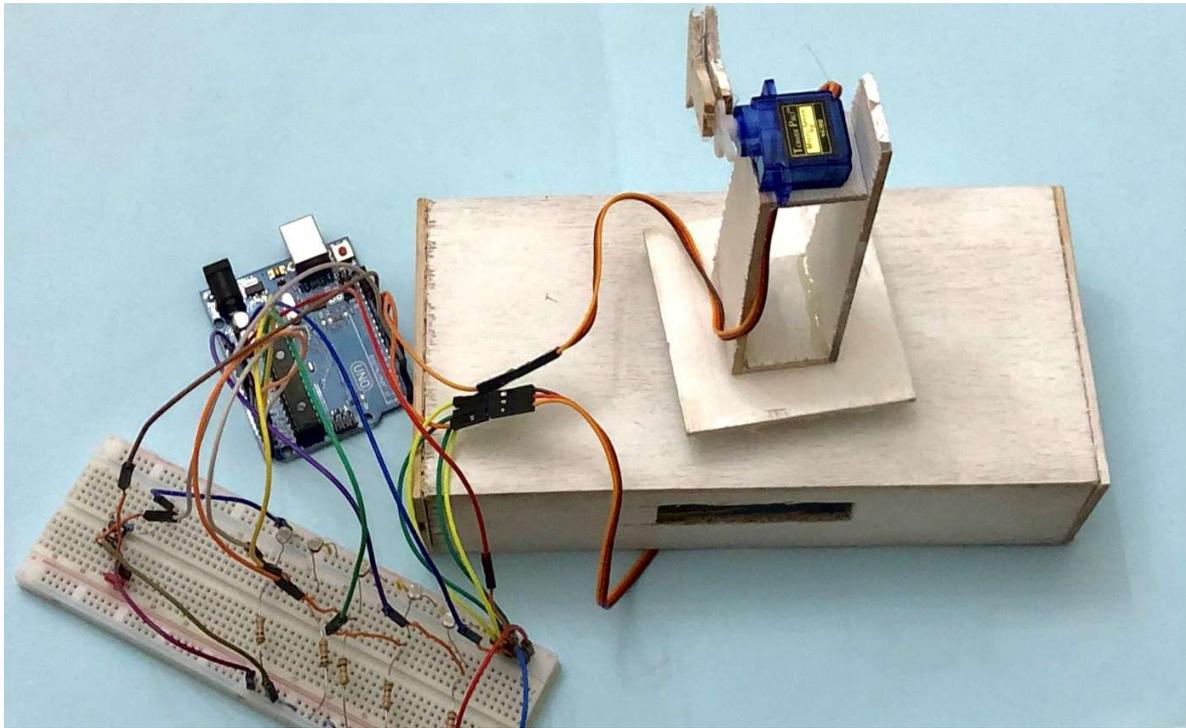
#### IV.4.1 Assemblage mécanique :

L'assemblage mécanique a été réalisé en utilisant différents matériaux tel que le fer-à-souder,

On a assemblé les éléments mécaniques en utilisant différent matériel tell que le faire à souder, pistolet à colle, tournevis testeur...etc.( voir figure IV.13) ; pour réaliser la structure finale de notre suiveur (Figure IV.14).



*Figure IV.13 : Matériel utiliser pour l'assemblément.*



*Figure IV.14 : L'assemblage final.*

## IV.5 Programmation

### IV.5.1 Programme 1 :

Le système à réaliser vise à orienter, tout au long de l'année, la plaque de suivi vers le soleil, pour recevoir le maximum de rayonnement. Cette dernière doit donc, être constamment perpendiculaire au rayonnement incident, ce qui se traduit par la même quantité d'énergie reçu par les quatre photorésistances (LDR).

En fait, la lumière reçue par les LDR génère des tensions à leurs bornes qui vont être envoyées à la carte Arduino et converties en valeurs numériques. Le programme de suivi consiste à comparer ces tensions en ordonnant aux servomoteurs de pivoter dans la direction des photorésistances qui reçoivent le plus de lumière comme illustré sur les organigrammes des figures IV.15 et figure IV.16.

Il est à noter qu'il faut différencier entre le mode jour et nuit via les tensions des capteurs de lumière LDR. Si la tension délivrée est inférieure à  $V_s$  (tension seuil en V)

aucun changement n'est porté à la position de la plaque de suivi, le système est en mode arrêt.

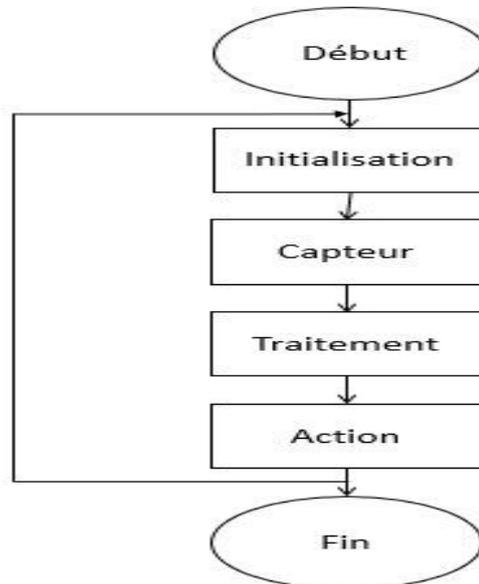


Figure IV.15: Organigramme général de la poursuite solaire à base d'ArduinoUno.

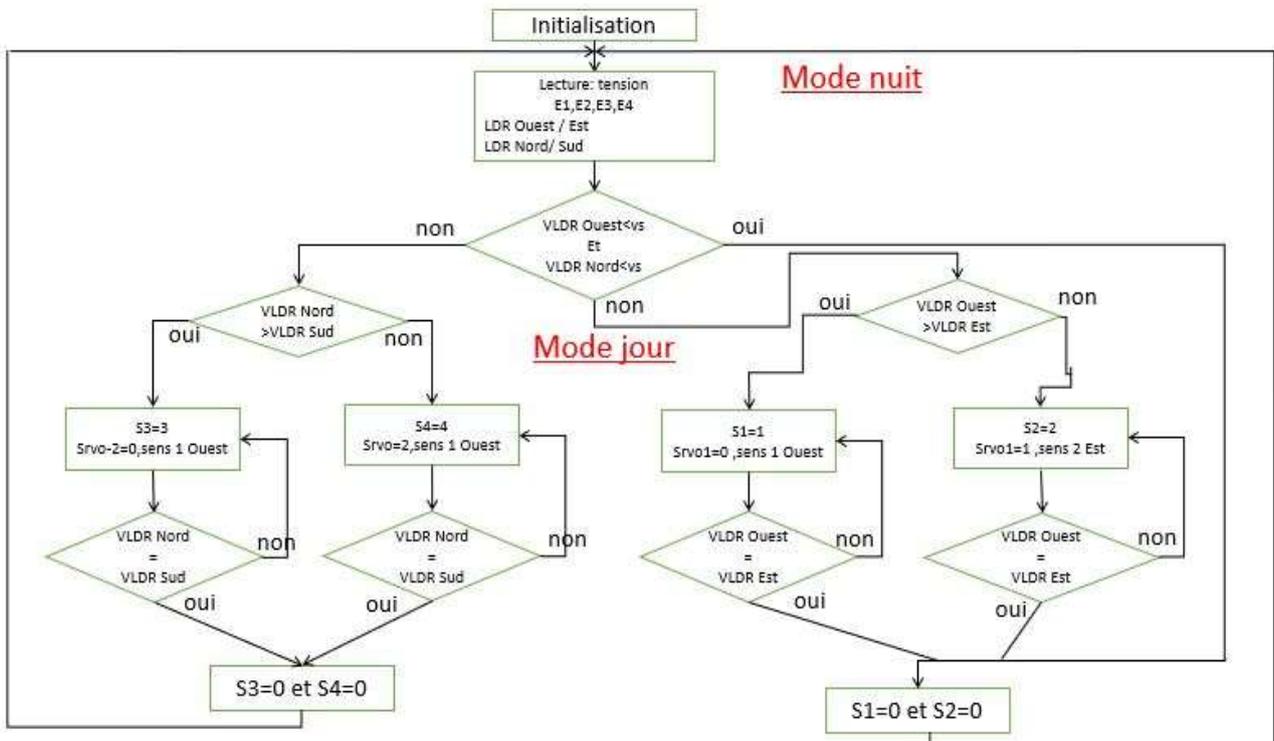


Figure IV.16: Organigramme de la poursuite solaire à deux axes pour la première réalisation.

### IV.5.2 Programmation 2:

Le deuxième système à réaliser vise à orienter, tout au long de l'année jour par jour, la plaque de suivi vers le soleil, pour recevoir le maximum de rayonnement. Cette dernière doit donc, être constamment perpendiculaire au rayonnement incident aussi, ce qui se traduit par la même quantité d'énergie reçu par le capteur photorésistances (LDR) pour le début de l'exécution du programme de suivi de la trajectoire selon le calendrier journalier.

En fait, la lumière reçue par le LDR génère une tension qui va être envoyée à la carte Arduino et convertie en valeur numérique et la comparer avec la consigne donnée pour le début de l'exécution du programme. Le programme de suivi consiste à pivoter les deux servomoteurs à respecter la trajectoire du soleil durant le changement de l'angle de suivi journalier (Figure IV.17).

Il est à noter qu'il faut différencier entre le mode jour et nuit via la tension du capteur de lumière LDR et le programme donné. Si la tension délivrée est inférieure à  $V_s$  (tension seuil en V) aucun changement n'est porté à la position de la plaque de suivi, le système est en mode arrêt et il revient à la position initiale pour exécuter le programme de la journée suivante.

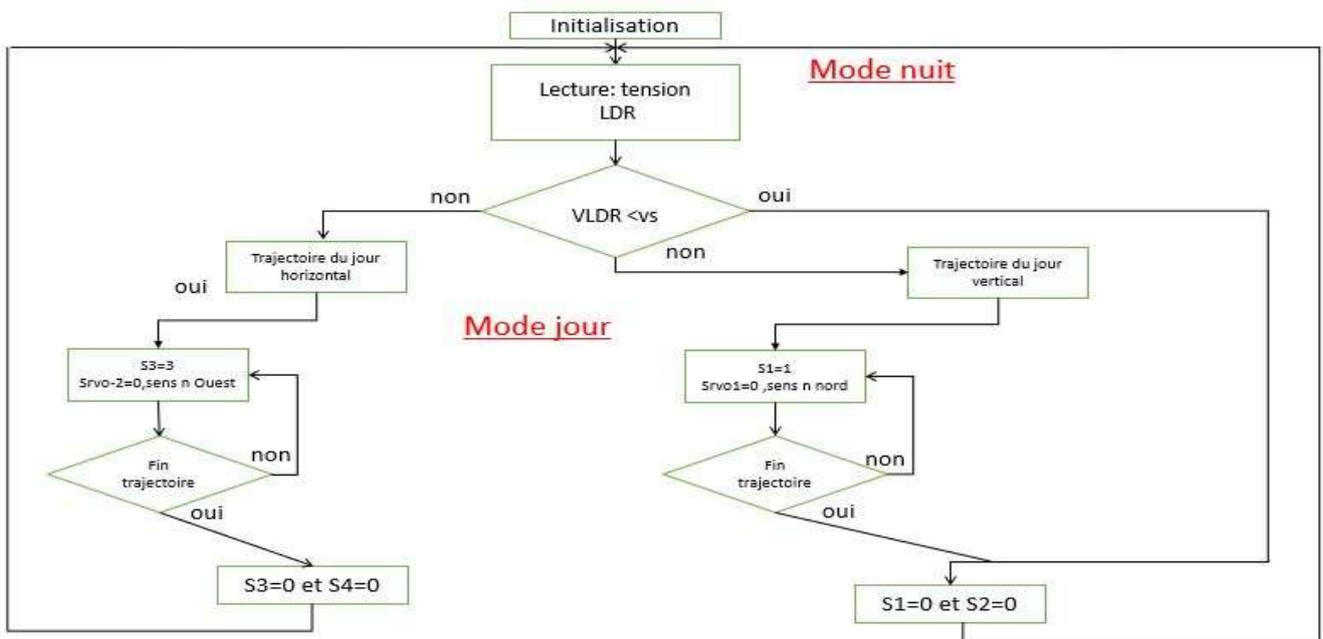


Figure IV.17 : Organigramme de la poursuite solaire à deux axes pour la deuxième réalisation.

### IV.5.3 Assemblage électronique :

Le circuit de puissance est la partie intermédiaire qui relie les deux servo-moteurs au microcontrôleur. L'Arduino génère en sortie 4 signaux qui vont piloter les deux servomoteurs par rapport à la première réalisation, puis un capteur et le programme du calendrier de la trajectoire pour la deuxième réalisation. Un signal servira pour le déplacement azimuthal et le second signal pour l'élévation de servo-moteur. L'assemblage de notre circuit final est modélisé puis simulé par le logiciel Proteus (voir la Figure IV.18). En d'autres termes, l'Arduino contrôle la direction et les déplacements nécessaires pour localiser la position du rayonnement maximal et assure la poursuite du point optimal.

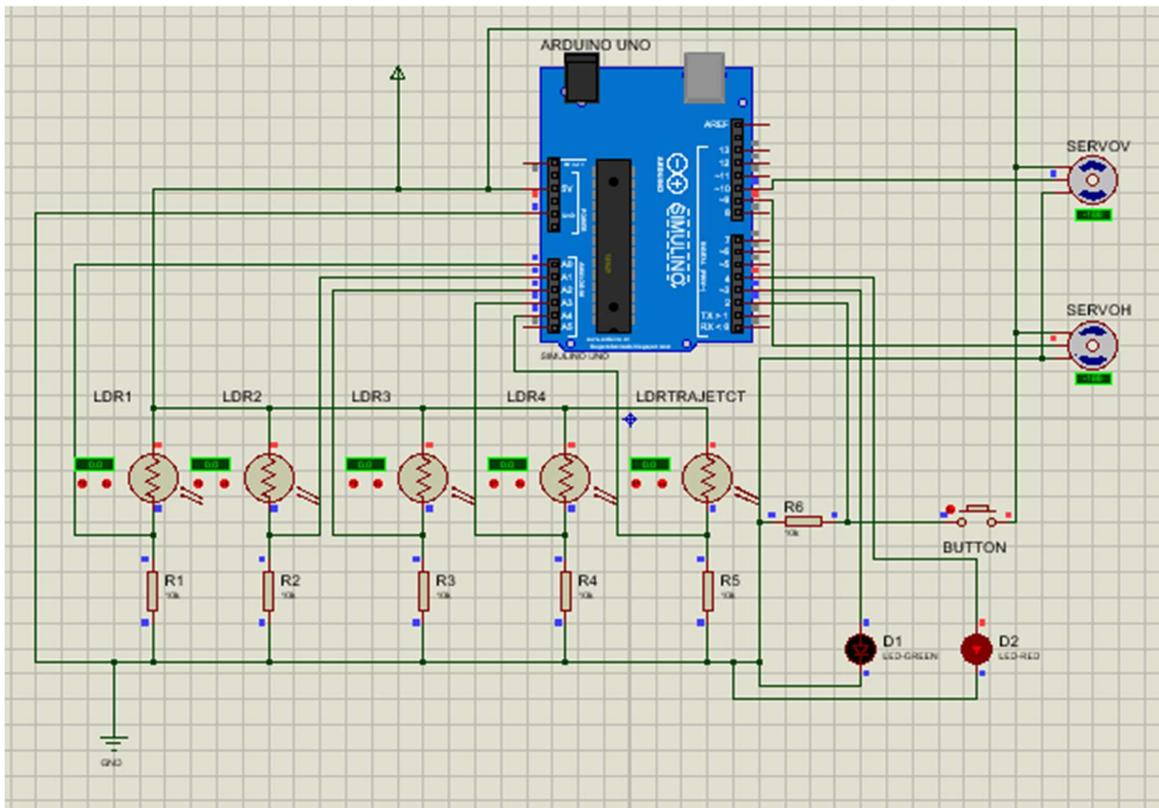
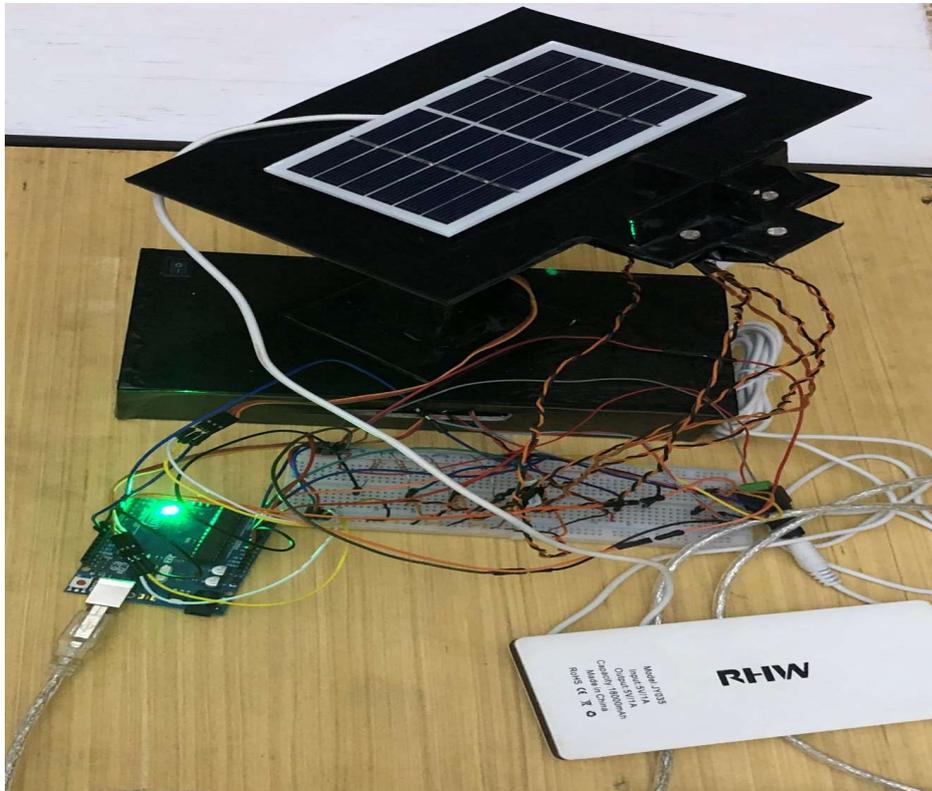


Figure IV.18 : Assemblage électronique des deux réalisations sur PROTEUS.

Le produit final voir la figure IV.19

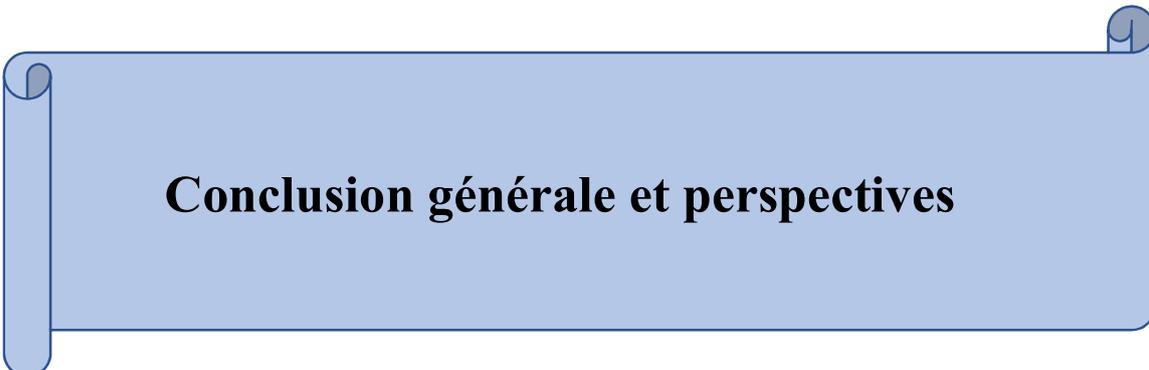


*Figure IV.19 : Produit finale.*

#### **IV.6 Conclusion :**

Finalement nous avons abouti à réaliser l'idée principale de notre projet qui consiste à une réalisation d'un suiveur solaire selon une trajectoire par deux méthodes.

Le choix de l'ensemble des éléments utilisés pour l'assemblage et la réalisation vise à minimiser le cout et le temps d'achèvement.



## **Conclusion générale et perspectives**

Notre projet porte sur la « Réalisation d'un Suiveur Solaire à Base d'une carte Arduino UNO » à l'aide des composants électroniques programmables gérés par un microcontrôleur (Arduino).

Le but principal de ce projet réside au niveau de la mise en œuvre d'une solution technique permettant de transformer un panneau photovoltaïque fixe en un suiveur de soleil afin d'améliorer son rendement. On a utilisé en premier lieu la méthode UML pour donner une modélisation fonctionnelle par les diagrammes des cas d'utilisation (use case) ainsi qu'une modélisation des aspects dynamiques et relationnels appliquée à l'ensemble des éléments de notre système de suivi solaire.

Au cours de ce projet, nous avons fait une simulation de notre solution envisageable par le biais de la plateforme Proteus afin de mettre en évidence notre structure électrique et mécanique ainsi que le software nécessaire aux opérations de contrôle et de commande.

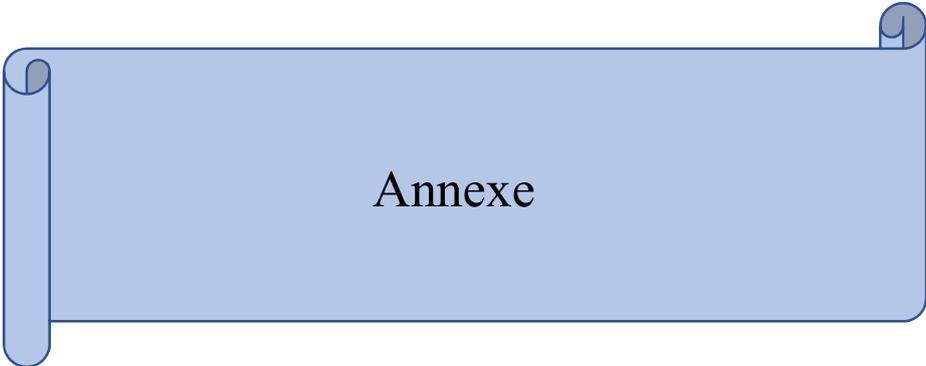
Cette étude nous a permis de concrétiser notre idée principale par la réalisation d'un circuit programmable en utilisant la technologie de l'Arduino et les éléments du servomoteur. Une série d'expérimentations était nécessaire à la validation de notre solution proposée.

Comme perspectives on propose la réalisation des modules additifs suivants :

Réalisation d'un système d'analyse automatique dédié à l'analyse et la mise en œuvre de notre projet au niveau des différentes structures (habitation, Entreprise, administration, etc. ...)

Réalisation d'un outil intelligent pour la gestion du système de stockage d'énergie au niveau des batteries.

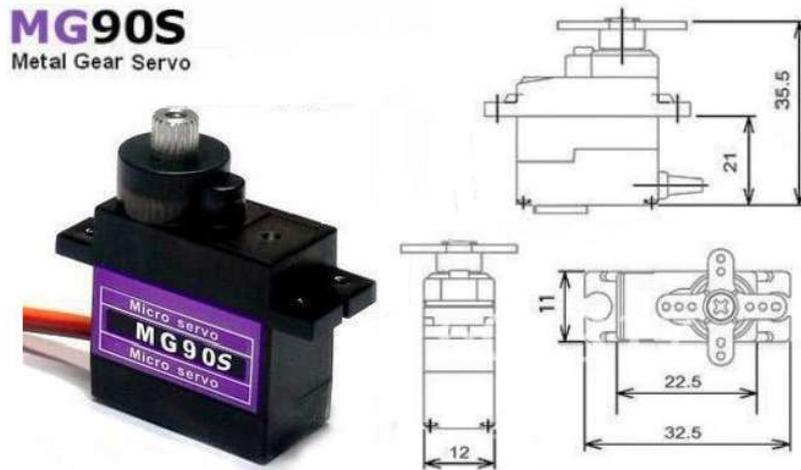
Réalisation d'un système d'aide à la décision (SAD) pour la prise en charge des aspects techniques et commerciaux appliqués aux choix technologiques et les installations nécessaires pour la phase exploitation finale de notre suiveur.



## Annexe A : Caractéristique des broches Arduino UNO

Catégorie d'épingle	Nom de la broche	Des détails
Pouvoir	Vin, 3.3V, 5V, GND	Vin: Tension d'entrée vers Arduino lors de l'utilisation d'une source d'alimentation externe. 5V : alimentation régulée utilisée pour alimenter le microcontrôleur et d'autres composants de la carte. 3.3V : alimentation 3.3V générée par le régulateur de tension embarqué. La consommation de courant maximale est de 50 mA. GND : broches de masse.
Réinitialiser	Réinitialiser	Réinitialise le microcontrôleur.
Broches analogiques	A0 – A5	Utilisé pour fournir une entrée analogique dans la plage de 0 à 5 V
Broches d'entrée/sortie	Broches numériques 0 - 13	Peut être utilisé comme broches d'entrée ou de sortie.
En série	0(Rx), 1(Tx)	Utilisé pour recevoir et transmettre des données série TTL.
Interruptions externes	2, 3	Pour déclencher une interruption.
PWM	3, 5, 6, 9, 11	Fournit une sortie PWM 8 bits.
SPI	10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) et 13 (SCK)	Utilisé pour la communication SPI.
LED intégrée	13	Pour allumer la LED intégrée.
TWI	A4 (SDA), A5 (SCA)	Utilisé pour la communication TWI.
AREF	AREF	Pour fournir une tension de référence pour la tension d'entrée.

## Annexe B : Caractéristique du Micro Servo MG90 S



### Descriptif

Alimentation : 4,5 à 6 V.

Pignon en nylon.

Couple : 2,2 kg/cm sous 4,8 V.

Couple : 2,5 kg/cm sous 6 V.

Vitesse : 0,11 s/60° sous 4,8 V.

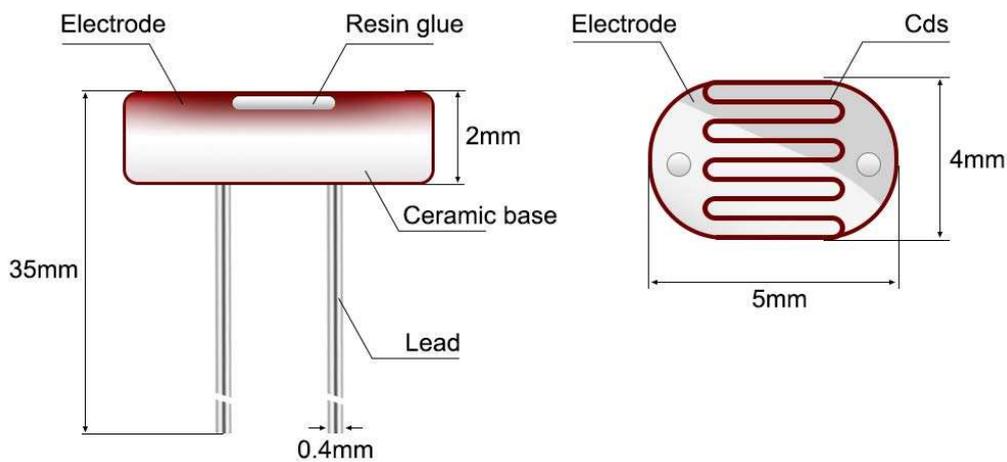
Vitesse : 0,10 s/60° sous 6 V.

Longueur du câble : 20 cm.

Dimensions : 23 x 12,2 x 29 mm.

Poids : 14 g.

## Annexe C: Caractéristique du LDR



### Descriptif

Résistances dont la valeur diminue avec la luminosité.

Existent en 4 diamètres :

**Ø 4,5 mm- Réf. 750767**

Résistance à la lumière : 31 à 50 k $\Omega$  à 10 Lux.

1 M $\Omega$  à l'obscurité, puissance 80 mW, tension maximale 100 V.

**Ø 5 mm - Réf. 750768**

Résistance à la lumière : 1,5 à 4,5 k $\Omega$  à 100 Lux

0,3 M $\Omega$  à l'obscurité, puissance 50 mW, tension maximale 100 V.

**Ø 7 mm - Réf. 750769**

Résistance à lumière : 100  $\Omega$  à 5,4 k $\Omega$  à 100 Lux

600 k $\Omega$  à l'obscurité, puissance 60 mW, tension maximale 100 V.

Enrobé donc mécaniquement plus résistant.

**Ø 10 mm - Réf. 275464**

Résistance à lumière : 190  $\Omega$  à 1,3 k $\Omega$  à 100 Lux

1 M  $\Omega$  à l'obscurité, puissance 150 mW, tension maximale 150 V.

## Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
L	longitude du lieu	[°]
Z	Altitude du lieu	[m]
$\varphi$	Latitude du lieu	[°]
$\delta$	Déclinaison solaire	[°]
n	Numéro du jour de l'année	[ ]
$\omega$	Angle horaire	[°]
TSV	Temps solaire vrai	[h]
h	Hauteur angulaire du soleil	[°]
$\omega_l$	Angle horaire au lever ou coucher de soleil	[°]
$\alpha$	Azimut	[°]
TSM	Temps solaire moyen	[h]
TU	Temps universelle	[h]
ET	Équation du temps	[h]
TL	Temps légal	[h]
$\omega_0$	L'angle horaire au coucher de soleil	[°]
$S_0$	La durée du jour	[h]
R	Le rendement	[%]
$G_{sc}$	La constante solaire estimée à 1367	[W/m <sup>2</sup> ]
$g_n^e$	Le rayonnement extraterrestre reçu sur un plan normal au rayonnement solaire le nième jour de l'année	[W/m <sup>2</sup> ]
H'	Hauteur de la paroi	[cm]
D	Distante entre la paroi et le capteur de lumière LDR	[cm]
$\varepsilon$	Angle de l'ombre solaire	[°]

## Bibliographies:

- [1] OSm\_Chap8.pdf
- [2] «Forms of Energy, Transformations of Energy, and Their Real-World », <http://www.flpda.rg/> (dernier accès 15-12-2017)
- [3] «Le dictionnaire de l'environnement », [www.dictionnaireenvironnement.com/](http://www.dictionnaireenvironnement.com/)(dernier accès 20-12-2017)
- [4] Effet-de-serre-web.pdf
- [5] «Quel est l'impact environnemental des énergies renouvelables ? », <https://origo.energy/> (dernier accès 20-12-2017)
- [6] Z.Bouzid, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien Photovoltaïque : Application pour un site isolé », Thèse de Doctorat, Université Abou-BekrBelkaid de Tlemcen, 20
- [7] M. Angel Cid Pastor 'Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques' /septembre 2007.
- [8] National Renewable Energy Laboratory (NREL) 2013 International Renewable Energy Conference.
- [9] : [www .l'énergie renouvelable .com](http://www.l'energie-renouvelable.com).
- [10] Aain Bilbao Learreta 'Réalisation de commandes MPPT Numériques ' /Septembre 2006.
- [11] MohanadAlata , M.A. Al-Nimr, Yousef Qaroush 'Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control'/ juin 2004.
- [12] Arnaud Fiocret ' Le tourneseul' /2003.
- [13] Keith Burnett 'Basic program position of the Sun'/ Aout 1997
- [14] Laurentiu ALBOTEANU, Gheorghe MANOLEA, Florin RAVIGAN 'Positioning sytems for solar panels placed in isolated areas'/2006.
- [15] Muhammad Faheem Khan, RanaLiaqat Ali 'Automatic Sun Tracking System (ASTS)'/2008.
- [16] I.Luque-Heredia, F. Gordillo, F. Rodríguez 'A PI Based hybrid sun tracking algorithm for photovoltaic'/2003.

- [17] Murat Kacira , Mehmet Simsek , Yunus Babur , SedatDemirkol ‘Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turke’/Decembre 2003.
- [18] Ait cheikh, S. M., « Etude, Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », thèse de Doctorat d’Etat en électronique, Ecole Nationale Polytechnique, soutenue en Décembre 2007.
- [19] TeolanTomson ‘Discrete two-positional tracking of solar collectors’/Mai 2007.
- [20][https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/RTEmagicC\\_1-3-3-3-F1c\\_02.gif.gif](https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/RTEmagicC_1-3-3-3-F1c_02.gif.gif)
- [21] HAI ABDELHAKIM .HAMMADOU SOUHIL. «Etude de corrélation entre l’irradiation solaire et factures météorologiques» UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAÏA
- [22]<https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/panneau-solaire-photovoltaique-fonctionnement-et-description-les-differents-types-de-panneaux-solaires-photovoltaiques-1>
- [23] Mlle BENMOHAMMADI Zahra Mémoire de fin d’étude « master » « Etude, conception et réalisation d’une commande d’un tracker solaire (suiveur solaire) ». Université Sidi Mohammed Ben Abdellah 2013/214.
- [24] PracticalSolar - Technology- février 2008.
- [25] True Thomas B. Greenslade, Jr., « Heliostats », Jules-Célestin Jamin — « Cours de physique de l’École polytechnique. Tome 3 - Fasc. 2 » Gauthier-Villars et fils (Paris) - 1885-1906
- [26] J.C. Fourès, A. Trombe, B. Lacarrière. ‘Consommations énergétiques de ponts thermiques’/Mars 2004.
- [27] Sukhraj Singh Cheema (06/2012) “Simulation Studies on Dual Axis Solar Photovoltaic Panel Tracking System”; Thapar University Patiala.
- [28]UML (informatique) — Wikipédia (wikipedia.org)
- [29]Diagramme de cas d'utilisation — Wikipédia (wikipedia.org)
- [30] Diagramme de séquence — Wikipédia (wikipedia.org)
- [31] [bedenes.vvv.enseirb-matmeca.fr/Proteus/index.html](http://bedenes.vvv.enseirb-matmeca.fr/Proteus/index.html)

[32] aheb, S., « mémoire étude et réalisation d'un suiveur solaire bi-axial à base d'un microcontrôleur Arduino », Mémoire de Master 2, Université El Arbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, 2017

[33]SIK Experiment Guide for the Arduino 101/Genuino 101 Board (French) - learn.sparkfun.com

[34]Necir A., BouchaalaA.Dj., « Conception et Réalisation d'un Suiveur du Soleil Commandé par une Carte Arduino », mémoire de Master, Université D'el-Oued, 2018

[35]related:fr.rs-online.com/web/p/ldr/0596141/ Spécifications et limites du Capteur -19M

[36] BELKEBIR KATIA ‘CHAABI SIHAM «Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil à Base d'une Carte Arduino UNO» UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZIOUZOU

[37]Aouine, A, « Conception et Réalisation d'un tracker solaire intelligent à Bas d'une Carte Arduino-Uno », Mémoire de Master professionnel, Université de TiziOuzou, 2017

BELKEBIR KATIA ‘CHAABI SIHAM «Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil à Base d'une Carte Arduino UNO» UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZIOUZOU