REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**



**F**aculté de **T**echnologie

# Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Energies renouvelables
Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

---

# Etude et réalisation d'un concentrateur solaire de type Fresnel. Application aux panneaux solaires photovoltaïques

---

Présenté par :

**Messaouden Amina**

**Aissou Yamina**

Proposé et Dirigé par :

**Mr. N. OULD CHERCHALI**

**Mr. A. MORSLI**

**Promotion 2020**

# Remerciements

En remercie Dieu Le Tout-Puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord ce travail ne sera pas aussi riche sans l'encadrement de Monsieur **OULD CHERCHALI**, Monsieur **MORSLI** on les remercie pour la qualité de leur encadrement.

Nos remerciements s'adressent à monsieur **Ferrai Hamid**, pour son aide pratique et ces encouragements.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nous tenons à remercier également tous ceux qui nous ont aidés de près et de loin pour l'élaboration de ce mémoire.

À tous ceux dont le soutien nous a été utile et nécessaire nous disons : merci.



# *Dédicace*

**Je dédie ce travail :**

**À ma chère grand-mère : Fatiha.**

**À ma chère mère Naima à mon cher père Azzedine.**

**Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.**

**À mes frères : Mohamed - Aymen - Nassim et le petit Mohamed.**

**À mes sœurs : Ibtissem – Cherifa –Imane et la petite Fatiha.**

**Pour se soutien moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.**

**À mon fiancé : Redouane.**

**Qui m'a aidé et supporter dans les moments difficiles.**

**À ma binôme : Yamina.**

**A mes chères amies : Nesrine - Baya- Nassima et Yasmine.**

**Pour leur support dans les moments difficiles.**

**À toute ma famille entre eux ma tante Zaho-Hassen - Sarah**

**et surtout a le meilleur électricien : mon oncle Omar.**

**Aux chers parents de mon fiancé**

**Mohamed et Zaho.**

. **Amina .M**



# *Dédicace*

**Je dédie ce modeste travail à:**

**À  Mon père "que Dieu lui fasse miséricorde"**

**À  ma mère, que Dieu lui accorde la santé et la longue vie.**

**À toute ma famille, et mes amis**

**À mon binôme Amina Messaouden.**

**Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à rendre ce projet possible, je dis merci.**

**Yamina. A**

## Résumé

Ce travail concernant l'Etude et la réalisation d'un concentrateur solaire de type Fresnel, application aux panneaux solaires photovoltaïques. La technologie de concentrateur à miroir linéaire de Fresnel est encore jeune, elle est intéressante pour sa simplicité et son faible coût comparé avec les autres types de systèmes solaires à concentration CSP. Notre projet est basé sur le principe de la rotation des miroirs de Fresnel en fonction du mouvement du soleil tout au long de la journée, basé sur les équations du gisement solaire, pour réfléchir les rayons du soleil sur les panneaux solaires en utilisant une carte Arduino ,et voir si le rendement est meilleur que d'installer les panneaux solaires de manière classique.


**Mots clé :** Miroir de Fresnel, concentrateur solaire, CSP, Arduino, microcontrôleur, servomoteurs, photovoltaïque à concentration.


## ملخص

يتعلق هذا العمل بدراسة وبناء مكثف شمسي من نوع فرينل ، وتطبيقه على الألواح الشمسية الكهروضوئية. لا تزال تقنية مكثف المرآة الخطية من فرينل حديثة العهد ، وهي مثيرة للاهتمام بسبب بساطتها وتكلفتها المنخفضة مقارنة بأنواع أخرى من أنظمة الطاقة الشمسية المركزةCSP . يعتمد مشروعنا على مبدأ تدوير مرايا فرينل وفقًا لحركة الشمس طوال اليوم ، بناءً على معادلات الترسبات الشمسية ، لعكس أشعة الشمس على الألواح الشمسية باستخدام لوح أردوينو. ، ومعرفة ما إذا كان العائد أفضل من تركيب الألواح الشمسية بالطريقة التقليدية.


**الكلمات المفتاحية:** مرآة فرينل ، مكثف شمسي ، CSP ، أردوينو ، متحكم دقيق ، محركات مؤازرة ، تركيز ضوئي.


## Abstract

This work concerns the study and realization of a Fresnel-type solar concentrator, application to photovoltaic solar panels. Fresnel's linear mirror concentrator technology is still young, it is interesting for its simplicity and low cost compared with other types of CSP concentrating solar systems. Our project is based on the principle of rotating Fresnel mirrors according to the movement of the sun throughout the day, based on Solar field equations, to reflect the sun's rays on solar panels using an Arduino board , and see if the yield is better than installing solar panels in the conventional way.


**Keywords:** Fresnel mirror, solar concentrator, CSP, Arduino, microcontroller, servomotors, concentration photovoltaic.

## Sommaire

**Introduction générale** ..... 13

**Chapitre I** ..... 3

**I.1.Introduction** ..... 3

**I.2.Historique** ..... 3

**I.3.Description des systèmes (LFR)** ..... 6

**I.3.1. Définition** ..... 6

**I.3.2.Le principe de Fresnel** ..... 6

**I.4.1.Réflecteur ou miroir de Fresnel** ..... 7

**I.4.2.Le récepteur** ..... 8

**I.4.3.d'une vitre** ..... 9

**I.4.4.Systèmes de suivi** ..... 9

**I.4.5.Modélisation mathématique de la géométrie d'un système LFR** ..... 10

**I.5.Les technologies de concentration solaire** ..... 12

**I.5.1. La concentration ponctuelle** ..... 13

**I.5.1.a. Le tour solaire** ..... 13

**I. 5.1.b. Concentrateur parabolique** ..... 14

**5.1. b.1. Concentrateur parabolique thermodynamique a moteur Stirling** ..... 14

**5.1. b.2 L'assiette parabolique a concentration solaire photovoltaïque** ..... 15

**I.5.2. La concentration linéaire** ..... 16

**I.5.2.a. Concentrateur cylindro-parabolique** ..... 16

**I.5.2.b. Concentrateur linéaire de Fresnel** ..... 17

**I.6.Comparaison des quatre principaux types de concentrateurs** ..... 18

**I.7.Avantages et inconvénients de ces technologies** ..... 20

**I.8.Conclusion** ..... 21

**Chapitre II** ..... 22

**II.1. INTODUCTION**..... 22

**II.2. Position géométrique du soleil**..... 22

**II.2.1. Définition**..... 22

**II.2.2. Mouvement de la terre autour du soleil**..... 23

**II.3. La sphère céleste**..... 23

**II.4. Les coordonnées célestes**..... 24

**II.4.1. Les coordonnées géographiques**..... 24

**II.4.1.a. La longitude (L)**..... 24

**II.4.1.b. La latitude ($\phi$)**..... 24

**II.4.2. Les coordonnées horaires**..... 25

**II.4.2.a. L'angle horaire ($\omega$)**..... 25

**II.4.2.b. La déclinaison ($\delta$)**..... 25

**II.4.3.Coordonnées Horizontales**..... 26

**II.4.3.a. La hauteur (h)**..... 26

**II.4.3.b. L'azimut (a)**..... 26

**II.5.Temps solaires**..... 26

**II.5.1.Temps solaire vrais (TSV)**..... 26

**II.5.2.Temps solaire moyen (TSM)**..... 27

**II.5.3.Temps civil**..... 27

**II.5.4.Temps universel (TU)**..... 27

**II.5.5.Temps légal (TL)**..... 27

**II.6. Rayonnement solaire**..... 28

**II.6.1. Rayonnement direct**..... 28

**II.6.2. Rayonnement diffus**..... 28

**II.6.3. Rayonnement global**..... 28

**II.7. L'énergie solaire photovoltaïque**..... 29

**II.8. Le solaire photovoltaïque non concentré**..... 29

**II.8.1.Les cellules monocristallines** ..... 29

**II.8.2.Les cellules polycristallines** ..... 30

**II.9. Le solaire photovoltaïque concentré** ..... 30

**II.9.1. comparaison des différentes concentrations photovoltaïques** ..... 31

**II.9.1.a. La basse concentration** ..... 31

**II.9.1.b. La moyenne et haute concentration** ..... 32

**II.9.2. la composition des systèmes photovoltaïques sous concentration** ..... 33

**II.9.2.a. les cellules photovoltaïques** ..... 33

**II.9.2.b. les concentrateurs solaires** ..... 35

**II.10.Conclusion** ..... 37

**Chapitre III** ..... 39

**III.1. Introduction** ..... 39

**III.2. Le schéma synoptique** ..... 39

**III.3. Etude des différents blocs** ..... 40

**III.3.1. Le bloc commande** ..... 40

**III.3.1.a. Le circuit Arduino** ..... 40

**III.3.1.a.1.Le microcontrôleur** ..... 40

**III.3.1.a.2. Les caractéristiques de l'A Tmega328P** ..... 40

**III.3.1.a.4. La carte Arduino uno** ..... 43

**III.3.1.b. L'horloge en temps réel** ..... 46

**III.3.1.b.1. Définition** ..... 46

**III.3.1.a.2.Description des broches du DS1307** ..... 47

**III.3.1.b.3.Les caractéristiques du DS1307** ..... 48

**III.3.1.c. L'environnement de la programmation** ..... 48

**III.3.2. Le bloc puissance** ..... 50

**III.3.2.a. Le servomoteur** ..... 50

**III.3.2.a.1. Définition** ..... 50

**III.3.2.a.2. Les composants d'un servomoteur** ..... 51

**III.3.2.a.3. Principe de fonctionnement d'un servomoteur** ..... 52

**III.3.2.a.4. Les type de servomoteur** ..... 52

**III.3.2.b. Les miroirs** ..... 53

**III.3.2.c. Les cellules photovoltaïques** ..... 53

**III.4.Conclusion** ..... 54

**Chapitre IV** ..... 55

**IV.1.Introduction** ..... 55

**IV.2.Cahier de charge** ..... 55

**IV.3.Principe de fonctionnement d'un concentrateur de type Fresnel** ..... 55

**IV.4.Partie programmation** ..... 56

**IV.4.1.L'organigramme** ..... 56

**IV.4.2.Programmation** ..... 57

**IV.5.Partie mécanique** ..... 59

**IV.5.1. Les composants** ..... 59

**IV.5.2. Modélisation mathématique du système** ..... 61

**IV.6.Partie électrique/électronique** ..... 65

**IV.6.1. Les composants** ..... 65

**IV.7.Réalisation et résultats** ..... 67

**IV.7.1. réalisation** ..... 68

**IV.7.2.Définition du TSV** ..... 71

**IV.8.Conclusion** ..... 78

**Conclusion générale** ..... 79

# Liste des figures

## Chapitre I

**Figure I.1: Premier prototype de Concentrateur Linéaire de Fresnel, Marseille (France) 1963** ..... 4

**Figure I.2: Schéma du réflecteur linéaire de type Fresnel** ..... 6

**Figure I.3: Lente de Fresnel** ..... 7

**Figure I.4: Concentrateur solaire linéaire de Fresnel** ..... 7

**Figure I.5: Schéma du réflecteur linéaire de type Fresnel** ..... 8

**Figure I.6: Croquis des systèmes de suivi** ..... 9

**Figure I.7 : Concentrateur solaire de Fresnel** ..... 10

**Figure I.8: Les 4 principales technologies de concentration** ..... 13

**Figure I.9: centrale a tour** ..... 14

**Figure I. 10: Concentrateur parabolique a moteur Stirling** ..... **15**

**Figure I.11 : Récepteur solaire en forme d'assiette parabolique conçu par le PETAL** ... 16

**Figure I.12 : Centrale cylindro-parabolique** ..... 17

**Figure I.13 : Concentrateur linéaire de Fresnel** ..... 18

**Figure I.14: comparaison entre les 4 technologies** ..... 18

## Chapitre II

**Figure II.1: Mouvement de la Terre** ..... 23

**Figure II.2: La sphère céleste** ..... 24

**Figure II.3: coordonnées géographiques du lieu** ..... 24

**Figure II.4: coordonnées horaires** ..... 25

**Figure II.5: Coordonnées Horizontales** ..... 26

**Figure II.6: Le rayonnement solaire** ..... 28

**Figure II.7: conversion photovoltaïque** ..... 29

**Figure II.8:cellule monocristalline et poly cristalline** ..... 30

**Figure II.9: Ensoleillement mondial par an et par m²** ..... 31

**Figure II.10: Système LCPV d'Axiosun** ..... 32

**Figure II.11: Système d'ensemble MCPV** ..... 32

**Figure II.12: Cellule photovoltaïque Silicium** ..... 34

**Figure II.13: Cellule photovoltaïque III-V** ..... 34

**Figure II.14: Ensemble du réflecteur Cassegrain** ..... 35

**Figure II.15: parabole a miroir de Fresnel** ..... 35

**Figure II.16: lentille de Fresnel** ..... 36

**Figure II.17: ensemble du dissipateur** ..... 36

**Figure II.18: système de suivi du soleil** ..... 37

**Chapitre III**

**Figure III.1: schéma synoptique de réalisation** ..... 39

**Figure III.2 : microcontrôleur Atmega328P** ..... 40

**Figure III.3 : Brochage ATMega328P** ..... 41

**Figure III.4 : mappage des broches entre Arduino Uno et la puce ATmega328P** ..... 42

**Figure III.5: Une carte Arduino Uno** ..... 43

**Figure III.6 : L'alimentation de la carte Arduino Uno** ..... 44

**Figure III.7: Les entrées analogiques** ..... 45

**Figure III.8: Les entrées numériques** ..... 45

**Figure III.9: Module RTC DS1307** ..... 46

**Figure III.10: Les broches du module RTC DS1307** ..... 47

**Figure III.11: Interface IDE Arduino** ..... 49

**Figure III.12: Les étapes de téléchargement du code** ..... 50

**Figure III.13: Servomoteur** ..... 51

**Figure III.14: Les composants du servomoteur** ..... 52

**Figure III.15: Un miroir** ..... 53

**Figure III.16: cellule photovoltaïque** ..... 54

**Chapitre IV**

**Figure IV.1: Les coordonnées géographiques de site MEDEA** ..... 56

**Figure IV.2: Organigramme d'un concentrateur de type Fresnel application aux panneaux solaires photovoltaïques** ..... 57

**Figure IV.3: interface du logiciel Arduino** ..... 58

**Figure IV.4: miroir fixer sur un support métallique** ..... 59

**Figure IV.5: Installation des servomoteurs** ..... 60

**Figure IV.6:Connections des miroirs aux servomoteurs** ..... 60

**Figure IV.7: Vue de dessus de l'installation coté mécanique** ..... 61

**Figure IV.8: Schéma d'un concentrateur de type Fresnel (application photovoltaïque)** ..... 62

**Figure IV.9: Schéma d'une partie du concentrateur de type Fresnel (application photovoltaïque)** ..... 64

**Figure IV.10: Schéma de bronchement de la partie électronique du notre système** ..... 66

**Figure IV.11: Schéma électrique du système** ..... 66

**Figure IV.12:images réels branchement électrique du système** ..... 67

**Figure IV.13:images réels branchement électrique du système** ..... 68

**Figure IV.14:résultats obtenus** ..... 69

**Figure IV.15 : (suite) résultats obtenus** ..... 70

**Figure IV.16 : dessin par le crocodile physiques du notre système** ..... 72

**Figure IV.17 : position des réflecteurs a 6:00AM** ..... 73

**Figure IV.18 : position des réflecteurs a 10:00AM** ..... 74

**Figure IV.19 : position des réflecteurs a midi** ..... 75

**Figure IV.20 : position des réflecteurs a 15:00PM** ..... 76

**Figure IV.21 : position des réflecteurs a 18:00PM** ..... 77

# Liste des tableaux

## Chapitre I

**Tableau I.1 : comparaison des quatre principaux types de concentrateurs** ..... 19

**Tableau. I.2: Les avantages et les inconvénients des quatre types de concentrateurs** ..... 20

## Chapitre III

**Tableau III.1 : Les caractéristiques de l'A Tmega328P** ..... 41

## Chapitre IV

**Tableau IV.1:paramètres du système étudié calculé théoriquement** ..... 64

**Tableau IV.2:paramètres du système étudié calculé avec l'EXCEL** ..... 65

**Tableau IV.3 : résultats obtenus a 7:00h** ..... 73

**Tableau IV.4 : résultats obtenus a 10:00h** ..... 74

**Tableau IV.5 : résultats obtenus à midi** ..... 75

**Tableau IV.6 : résultats obtenus a 15 :00h** ..... 76

**Tableau IV.7 : résultats obtenus a 18 :00h** ..... 77

## Sigles et Abréviations

- CLFR : Réflecteur Compact Linéaire de Fresnel
- CPC : concentrateur cylindro-parabolique
- CPV : cellules solaires photovoltaïques concentrées
- CSP : Concentrating Solar Power (Centrale Solaire à Concentration)
- EoT : Équation du temps
- FTC : Facteur de correction du temps
- HCPV : la haute concentration photovoltaïque
- LCPV : La basse concentration photovoltaïque
- LFR : Linéaire Fresnel Réfracteur
- LFRCS: Linear Fresnel Reflector Concentrating Solar
- LFSC : capteur solaire linéaire de Fresnel
- LSTM : Méridien de l'heure normale locale
- LT : l'heure locale
- MCPV : la moyenne concentration photovoltaïque
- NREL : Laboratoire national des énergies renouvelables
- PETAL : Laboratoire d'Astrophysique et de Transformation d'Energie Photonique
- PT : Cylindro-Parabolique (parabolic trough)
- PV : photovoltaïques
- RTC : horloge en temps réel (real time clock)
- TC : temps civil
- TL : temps légal
- TSM : Le temps solaire moyen
- TSV : Le temps solaire vrai
- TU : temps universel

## Nomenclature

- ($\phi$) : La latitude (degrés)
- (L) : La longitude (degrés)
- ($\gamma$) : L'altitude (m)
- ($\delta$) : La déclinaison (degrés)
- ($\omega$) : L'angle horaire (degrés)
- : L'azimut (degrés)
- (h) : La hauteur angulaire (degrés)
- ($\theta$) : Angle d'incidence (degrés)
- (W) : Largeur du miroir (m)
- (S) : Décalage (m)
- (Q) : Emplacement (m)
- (f) : Distance focale (m)
- N : Nombre de réflecteur
- Sn : Décalage entre le nième réflecteur (m)
- f : Hauteur du centre de l'absorbeur à partir de la base (m)
- CP : Puissance totale concentrée (kW)
- $\theta$n : Angle d'inclinaison du nième réflecteur (degrés)
- $\xi$0 : La moitié du sous-temps angulaire du soleil à n'importe quel point de la terre (degrés)
- CR : Rapport de concentration
- CIn : Puissance concentrée du nième réflecteur (kW)

# *Introduction générale*

# Introduction générale

Actuellement comme nous le savons, la plus grande partie de l'énergie consommée provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Les études et les prévisions récentes, nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement total de ces réserves. En plus, tout le monde est convaincu du danger de ce processus sur l'environnement [1].

Les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, éolienne et hydraulique, représentent une solution de remplacement par excellence et elles sont de plus en plus utilisées de nos jours. L'énergie alternative qui peut accomplir la demande mondiale jusqu'à maintenant c'est l'énergie solaire. Elle apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre dans un jour est dix fois plus grande que celle consommée.

En plus des panneaux solaires photovoltaïques, il existe d'autres dispositifs qui concentrent la chaleur propagée par le rayonnement infrarouge du Soleil, de manière à atteindre des températures élevées températures dans les régions géométriques réduites. La concentration de ce rayonnement est obtenue avec des surfaces réfléchissantes, dont les géométries peuvent être variées, parmi elles, le paraboloïde de révolution, parabolique cylindrique ou simplement plat. Dans tous les cas, la température élevée obtenue est mise à profit pour diverses applications, par exemple la génération de vapeur permettant de faire fonctionner des générateurs électriques, ou encore l'obtention d'eau chaud, ou le dessalement d'eau de mer.

Jusqu'aujourd'hui, des prototypes ont été développés à cet effet, dont beaucoup sont déjà utilisés dans les grandes centrales électriques, comme c'est le cas des champs solaires cylindriques paraboliques, des tours solaires, des cheminées solaires, des champs solaires de type Fresnel linéaire. De cet ensemble, seuls le CCP et le CFL permettent au rayonnement solaire d'être focalisé linéairement, avec l'avantage qu'il est possible de se passer d'un système de suivi solaire électromécanique si l'équipement est aligné dans le sens Est-Ouest.

Actuellement, le concentrateur de type Fresnel linéaire (CFL) est moins populaire que le concentrateur de type cylindrique parabolique (CCP) pour des applications telles que la production d'électricité, principalement parce que ce dernier a été développé dans les années 80 et 90, aboutissant au succès du projet de production d'électricité dans le désert de Mojave (Californie) avec plus de 350 MW [2].

Pour améliorer le rendement des panneaux solaires photovoltaïques, il y a beaucoup de technologies l'un est d'utiliser des systèmes de poursuite pour qu'ils puissent suivre le soleil toute la journée pour maximiser la production de l'énergie solaire électrique et dans ce projet, nous avons essayé de créer un système de focalisation des rayons du soleil sur un panneau solaire à l'aide de miroirs qui suivent le mouvement du soleil, initialement basé sur le réflecteur de Fresnel linéaire.

Dans ce travail, nous nous somme intéresses à **l'étude, conception et la réalisation d'un concentrateur de type Fresnel avec un récepteur photovoltaïque a base d'un arduino uno**, nous nous concentrons dans notre projet sur la création d'un modèle miniature basé sur l'Arduino qui permet aux miroirs de suivre la trajectoire du soleil tout au long de la journée et non sur la quantité d'énergie produite par le panneau solaire. C-est-a-dire que notre étude basée plus beaucoup sur la partie réfléchissante uniquement.

Ce projet est divisé en 4 chapitres :

**Chapitre I** : généralités sur les systèmes solaires à concentration et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration de type Fresnel.

**Chapitre II** : généralités sur le gisement solaire et l'énergie photovoltaïque.

**Chapitre III** : Présentation des différents composants du système.

**Chapitre IV** : Conception et réalisation et résultats.

# *Chapitre I*

## Généralités sur les systèmes solaires à concentration et état de l'art sur les SPC de type Fresnel

## I.1 Introduction

La concentration de l'énergie solaire est une des alternatives les plus crédibles pour la production d'électricité à grande échelle.

Les systèmes solaires à concentration offrent la possibilité de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, les températures pouvant aisément dépasser les 500 °C et le rendement de conversion est élevé généralement. On exploite seulement le rayonnement solaire direct, considéré comme la ressource principale.

Il y a quatre technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration à savoir : la concentration linéaire qui regroupe : les centrales solaires cylindro-parabolique ; les centrales solaires à miroirs de Fresnel, et la concentration ponctuelle qui regroupe : les centrales à tour, et les paraboles Stirling. Actuellement, la technologie la plus employée est basée sur des collecteurs cylindro-paraboliques, associés à des tubes sous vide, dans lesquels passe le fluide caloporteur, qui alimente ensuite un cycle thermodynamique. Cependant, une solution concurrente est en phase de développement dans plusieurs équipes de recherche : les collecteurs à miroirs de FRESNEL.

Dans ce chapitre, nous parlerons en détail du Concentrateur à miroirs de Fresnel, en partant de l'histoire jusqu'à son principe de fonctionnement, et en faisant une comparaison avec les autres types de concentrateurs.

## I.2 Historique

Au XIXe siècle l'italien Alessandro Battaglia réalise des travaux pionniers sur les concentrateurs solaires. Ses brevets, sortis de l'oubli récemment, sont inventifs. Aucune mise en œuvre pratique de l'époque n'a cependant été retrouvée. Les travaux de Battaglia peuvent être vus comme l'origine de la technique de concentration par réflecteurs linéaires de Fresnel. Les travaux les plus significatifs ont été réalisés par Giovanni Francia (1911-1980), également italien. Entre autres travaux scientifiques et techniques, il s'intéressa à l'énergie solaire. Au début des années 1960, il développa un système concentrateur linéaire de Fresnel à réflexion (LFR). Il a conçu et monté un premier prototype à Gènes en 1963 [3].



**Figure I.1**: Premier prototype de Concentrateur Linéaire de Fresnel, Marseille (France) 1963 [3].

L'année suivante, il a construit et testé un prototype de LFR à Marseille. Francia était persuadé que l'énergie solaire ne pouvait se développer qu'avec une rentabilité économique et une technique simple. Ainsi les miroirs plans étaient un point clé décisif pour la percée du solaire à grande échelle.

Depuis les années 1990, David Mills, en Australie, développe un LFR. Il introduit le concept de réflecteur compact linéaire de Fresnel (CLFR). Il s'agit de disposer plusieurs lignes focales en parallèle. On peut ainsi optimiser l'utilisation des miroirs en choisissant vers quelle ligne focale chaque miroir réfléchit la lumière.

Ces travaux ont toujours été soutenus par le gouvernement australien. En Europe, la société belge SolarMundo, avait un projet ambitieux de centrale solaire à LFR. Un prototype a été monté à Liège en 2001 (2400m2 de miroirs). Mais l'application à grande échelle n'a pas vu le jour. Les résultats escomptés n'étaient pas au rendez-vous. La réduction de coût n'était possible que sur des puissances importantes. On ne tirait manifestement pas encore le meilleur de cette technologie : l'absorbeur à haute température sur le tube, le miroir secondaire, le système de suivi... Tous ces éléments restaient à développer et à mettre au point pour que la technologie LFR tienne ses promesses. La faisabilité restait quelque peu incertaine.

Aujourd'hui le développement a bien avancé. Plusieurs entreprises proposent un système LFR. Les quatre les plus avancées sont : Novatec Solar (anciennement Novatec-Biosol), Solar Power Group (SPG), Areva Solar (anciennement Ausra) et Industrial Solar (anciennement PSE, puis Mirroxx) [4].

Il y a de nouveaux acteurs qui émergent, notamment en France : la CNIM s'est dotée d'un prototype de sa conception en 2010, SolarEuromed développe aussi son prototype de concentrateur LFR. ALSOLEN, du groupe ALCEN, est un nouvel acteur français, annoncé en octobre 2011, qui vient encore renforcer le secteur du LFR. Le système SolarFire, proche d'une géométrie LFR, est une conception libre de droits et simplifiée à l'extrême, pour une diffusion large du système, en particulier dans les pays pauvres [3].

On peut s'attendre à beaucoup de travail de test et d'amélioration des différents designs. Ils sont encore très sujets à évolutions, vu le peu de retours d'expériences. En 2004, une première installation solaire avec LFR (1MWe) est couplée avec la centrale électrique de Liddell en Australie (2000MWe à base de charbon). En 2008, une deuxième phase de ce projet est mise en service portant la puissance électrique d'origine solaire à 3MWe. Le prototype FresDemo (1433m2, 800 kWth), construit à la "Plataforma Solar de Almeria" (PSA) par SPG, est opérationnel depuis 2007. Une autre centrale de démonstration a été mise en service en 2008, par Ausra à l'époque : il s'agit de la centrale solaire Kimberlina (26 000m2, 5MWe), en Californie. En avril 2009, c'est en Espagne que la première centrale LFR commerciale, Puerto Errado I (PE1, 1; 4MWe), a été connectée au réseau. Une deuxième centrale PE2 (302 000m2, 30MWe) est en cours de construction depuis le deuxième trimestre 2010 [3].

Ces premières centrales LFR sont très importantes, car elles fournissent les premiers résultats expérimentaux. On peut ainsi confronter ces résultats aux prédictions des simulations. L'expérience concrète du fonctionnement des centrales est aussi très précieuse. Cela permet d'optimiser les stratégies de contrôle du système. Ces résultats permettent également de comparer les différentes voies technologiques. En particulier, on peut analyser les performances relatives des concentrateurs linéaires de Fresnel par rapport au Cylindro-Parabolique (PT). On ne sait toujours pas aujourd'hui laquelle de ces deux technologies donnera les meilleurs résultats en termes de coût d'électricité produite. Il apparaît que les deux filières sont difficiles à départager. A l'heure actuelle, à leur niveau de développement, la qualité de l'installation joue plus que les choix techniques. Un bon système LFR sera meilleur qu'un mauvais cylindro-parabolique et réciproquement.

Il est indéniable que ces dernières années, l'intérêt pour la technologie LFR monte en puissance.

Le congrès SolarPACES est un bon indicateur de l'activité sur les LFR. Jusqu'en 2008 classée dans les "concepts émergents", la technologie LFR ne comptait que 2 ou 3 contributions. En 2009, 13 articles ont été retenus, 9 articles en 2010, 13 en 2011.

## I.3 Description des systèmes (LFR)

### I.3.1 Définition

Les CLF sont un type de concentrateur de Fresnel, les mêmes qui consistent essentiellement en un ensemble de réflecteurs (miroirs longs et minces) qui concentrent le rayonnement solaire sur un absorbeur élevé, situé dans un point focal commun des réflecteurs. Les miroirs concentrent l'énergie qui la transfère dans un fluide caloporteur.(figure I.2)

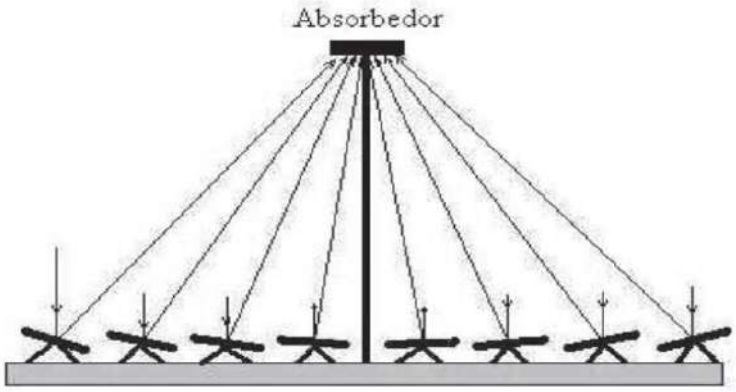



**Figure I.2:** Schéma du réflecteur linéaire de type Fresnel.

### I.3.2 Le principe de Fresnel

Le concept du réflecteur linéaire Fresnel est simple et facile par rapport aux autres types des capteurs solaires à effet de concentration de la même famille. Ils sont formés des miroirs plans et ils sont moins coûteux.

La technologie du ce réflecteur (figure I.4) tire son nom de la lentille Fresnel (figure I.3), qui a été développée par le physicien français Augustin-Jean Fresnel pour les phares au XVIIIe siècle.

Le principe de cette lentille est le découpage de la surface continue d'une lentille standard en un ensemble de surfaces avec des discontinuités entre elles. Cela permet une réduction substantielle de l'épaisseur de l'objectif (et donc du poids et du volume), au détriment de la réduction de la qualité d'imagerie de l'objectif [5].

Le principe de la division d'un élément optique en segments qui ont ensemble le même effet optique (ou un effet très similaire) comme l'élément optique d'origine peut également être appliqué aux miroirs. Ainsi, il est possible, par exemple, de diviser un miroir parabolique en segments annulaires (formant ainsi un miroir de Fresnel circulaire), qui focalisent la lumière qui arrive en rayons parallèles à l'axe optique sur le point focal du miroir paraboloïde.

De manière analogue, un miroir de Fresnel linéaire peut être construit en remplaçant un creux parabolique par des segments linéaires qui concentrent le rayonnement qui arrive dans un plan parallèle au plan de symétrie du creux parabolique sur la ligne focale du creux parabolique. Concernant la concentration du rayonnement dans une ligne focale, un collecteur de Fresnel linéaire a un effet similaire comme le creux parabolique correspondant, c'est-à-dire comme un creux parabolique avec la même distance focale et la même ouverture.

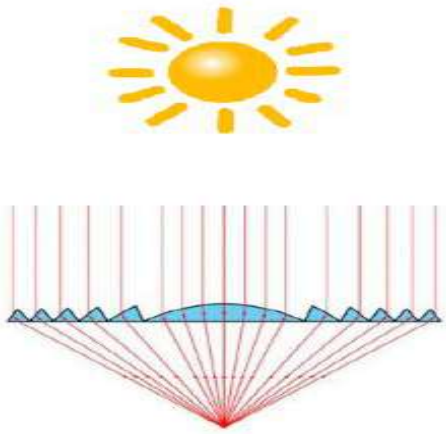


**Figure I.3:** Lente de Fresnel [6].



**Figure I.4:** Concentrateur solaire linéaire de Fresnel [6].

Bien sûr, cela n'a pas exactement le même effet. Les chemins optiques des rayons correspondants après la réflexion ne sont pas exactement identiques et les angles d'incidence dans le plan focal sont légèrement différents. De plus, les miroirs de Fresnel linéaires pour les installations CSP sont mobiles de sorte que le rayonnement direct qui n'entre pas dans le système dans un plan parallèle au plan de l'axe optique peut également être coincent [7].

## I.4 Les éléments d'un concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel

Le concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel (concentrateur LFR) est généralement composé de [3] :

### I.4.1 Réflecteur ou miroir de Fresnel

Plusieurs bandes rectangulaires de miroirs réfléchissent et concentrent le rayonnement sur le récepteur. Les paramètres de conception les plus importants sont: la largeur des bandes, le nombre de lignes et les espaces entre deux miroirs consécutifs.

Les miroirs solaires doivent être de qualité supérieure : leurs propriétés optiques et leur tenue dans le temps ont un fort impact sur la rentabilité du système. Les recherches actuelles centrent donc sur l'amélioration de ces deux points.

Les miroirs doivent avoir une réflectivité importante et la meilleure possible, leur durée de vie est également un critère essentiel. Les miroirs sont soumis aux intempéries.

Ils doivent résister à la grêle, aux tempêtes de vent violent, de sable. Le revêtement doit être stable aux ultraviolets, résister au nettoyage mécanique et tenir à haute température, malgré toutes ces agressions, le miroir doit conserver ses qualités optiques pendant 10 ans, 20 ans et plus si possible.

### I.4.2 Le récepteur

Positionné au-dessus du miroir de Fresnel, il intercepte le rayonnement concentré. Les principaux composants du récepteur sont: le tube absorbeur et le miroir secondaire. Le champ de miroir primaire seul ne peut pas accumuler seul la puissance requise. L'idée est d'augmenter l'efficacité sans générer plus de pertes thermiques. Il est nécessaire d'ajouter un miroir secondaire au-dessus du tube absorbeur pour atténuer cette imprécision optique et améliorer le facteur d'interception. De plus, il augmente la largeur de la surface de la cible sans affecter le tube absorbeur. La configuration du miroir secondaire doit être adaptée pour concentrer le rayonnement entrant dans le tube absorbeur [8]. (figure I.5)

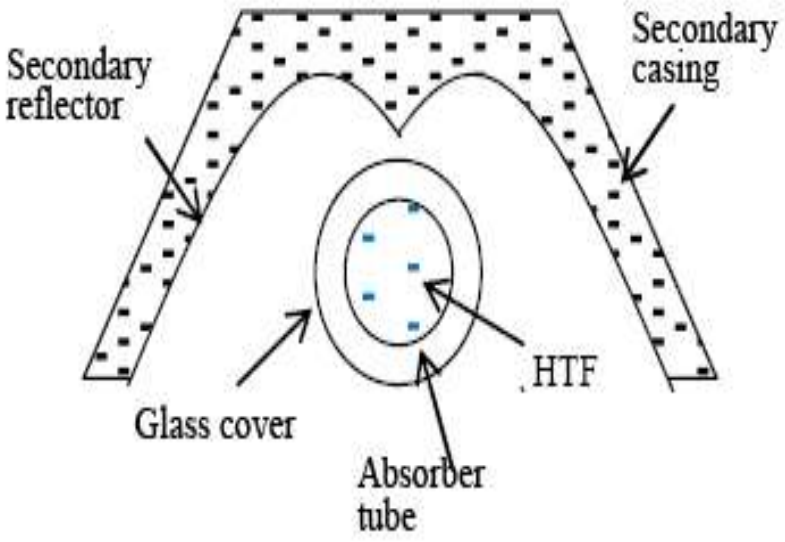



**Figure I.5:** Schéma du réflecteur linéaire de type Fresnel [9].

### I.4.3 d'une vitre

Qui assure une limitation des pertes radiatives. Transparente à la lumière visible, le verre est opaque aux Infrarouge (IR). Le rayonnement solaire entre dans le récepteur, mais les émissions des surfaces chaudes sont en grande partie bloquées par la vitre

La production de la centrale en dépend. Et l'investissement serait significativement alourdi s'il fallait remplacer tous les miroirs au cours de la vie de la centrale. La qualité et la durée de vie des miroirs sont donc primordiales à la rentabilité de la centrale solaire [3].

### I.4.4 Systèmes de suivi

Les 'LFR' ont seulement un suivi d'axe unique. Le mouvement des bandes miroir parallèles dépend uniquement de la trajectoire du soleil et non de la position du miroir. Chaque miroir suit le soleil individuellement, à la même vitesse angulaire. (figure I.6)

Le système de suivi est chargé de déplacer les miroirs du champ primaire. Le suivi du soleil est essentiel pour les concentrateurs solaires pour collecter l'énergie maximale du soleil. Idéalement, l'orientation du collecteur est nord-sud le long du plan longitudinal. Dans notre site (Algérie), le système de suivi suit le mouvement apparent du soleil d'est en ouest. Le principe de conception est d'avoir un actionneur qui tourne tous les miroirs (dans le plan transversal). Il existe des conceptions qui utilisent de nombreux actionneurs, permettant plus de flexibilité dans l'opération du collecteur.

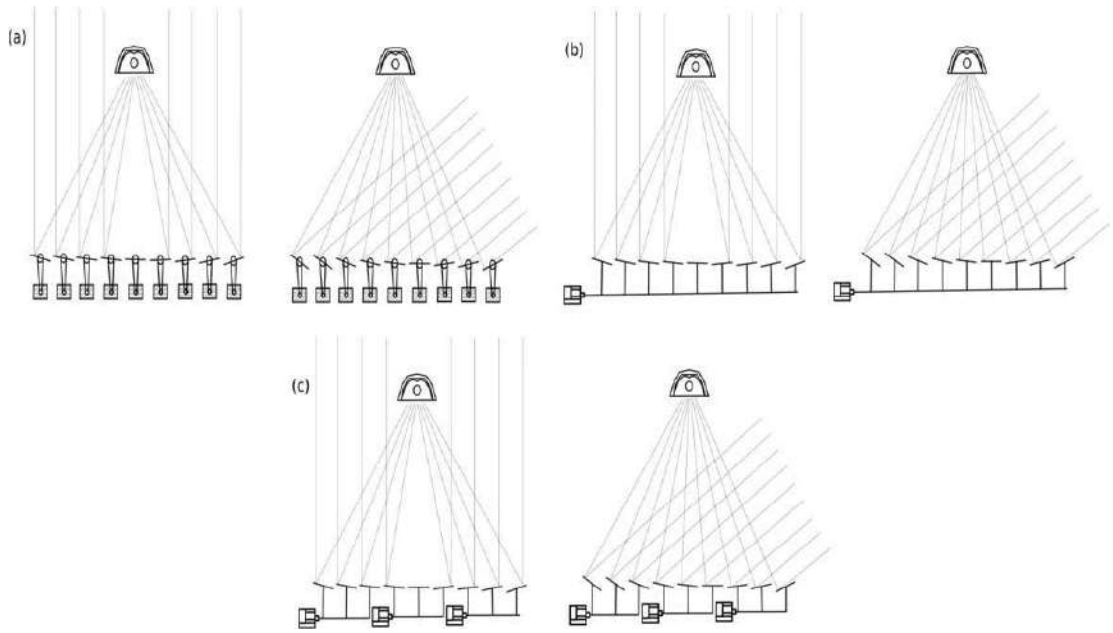



**Figure I.6:** Croquis des systèmes de suivi. **A**: Chaque miroir est couplé à un actionneur, permettant un contrôle total sur chaque rangée. **B**: Tous les miroirs couplés à un actionneur. **C**: groupes de miroirs reliés à un actionneur [10].

### I.4.5 Modélisation mathématique de la géométrie d'un système LFR

Dans une analyse de rendement optique, l'inclinaison de chaque élément miroir est très importante. Chaque élément de miroir a une inclinaison (θ) qui est choisie de manière à refléter le rayonnement vers le point focal. La distance entre deux éléments de miroir adjacents doit être calculée de sorte que le rayonnement réfléchi par le miroir ne soit pas obscurci [11].

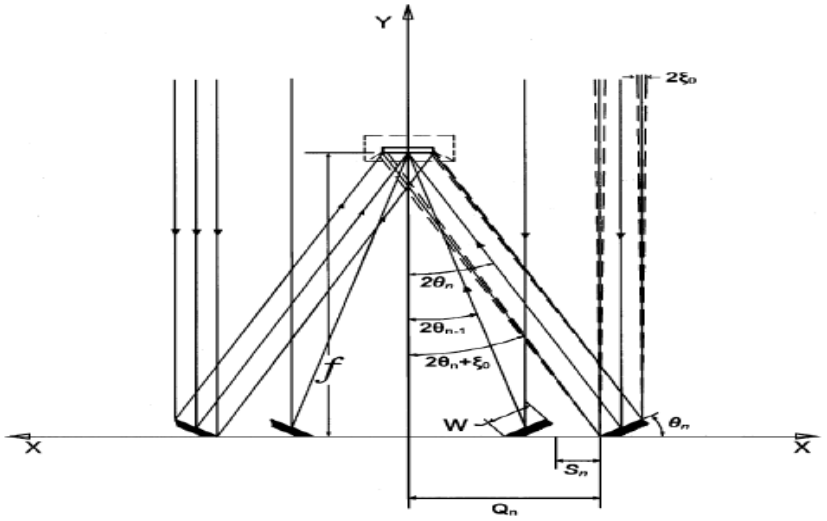



**Figure I.7 :** Concentrateur solaire de Fresnel [12].

Montre la figure c'est dessus le schéma de principe en coupe linéaire d'un concentrateur de Fresnel avec un système réflecteur et absorbeur de forme cavité, dont la largeur (w) est constante pour chaque miroir. L'inclinaison de chaque miroir a été calculée de telle sorte que le rayonnement solaire soit incident sur le plan d'ouverture. D'autre part, une distance appropriée a été maintenue entre deux miroirs consécutifs pour que chaque miroir ne fasse pas d'ombre par rapport au miroir adjacent [13].

Chaque miroir est caractérisé par trois paramètres qui sont [12] :

La position ($Q_n$).

L'angle d'inclinaison ($\theta_n$).

Le décalage ($S_n$).

Les expressions suivantes ont été utilisées pour obtenir ces paramètres en utilisant de simples relations d'optiques géométriques.

$$\theta_n = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\frac{Q_n + \left(\frac{w}{2}\right)\cos(\theta_n - 1)}{f + \left(\frac{w}{2}\right)\sin(\theta_n - 1)}\right] \quad \text{(I-1)}$$

$$S_n = w \sin\theta_{n-1} \tan(2\theta_n + \xi_0) \quad \text{(I-2)}$$

$$Q_n = Q_{n-1} + w \cos\theta_{n-1} + S_n \quad \text{(I-3)}$$

Avec :

W est la largeur des miroirs.

f est la distance focale.

$\xi_0$ est la moitié de la distance angulaire du soleil en un point quelconque sur terre.

($\xi_0$ =16'=0.26°).

Les conditions initiales sont les suivantes : $\theta_0 = 0; S_0 = 0; Q_0 = -w/2; Q_1 = w/2.$

Pour positionner les miroirs dans la structure du concentrateur de Fresnel, il faut résoudre les équations (eq I-1, eq I-2 et eq I-3) et calculer les différents paramètres comme la position (Q), l'inclinaison (θ), et la distance entre les miroirs (S) du miroir primaire centrale jusqu'au dernier miroir.

Après la résolution des équations (1, 2, et 3), il faut calculer de la concentration solaire total en résolu l'équation (4).

$$CR = 2\sum_{n=1}^{n=m} C\,l_n \quad \text{(I-4)}$$

$$C\,l_n = \frac{w \cos\theta_n}{U_n + D_n + l_n} \quad \text{(I-5)}$$

Avec : $U_n$, $D_n$ et $l_n$ sont les valeurs des rayons solaires réfléchis sur l'absorbeur et calculés par les expressions suivantes : [12]

$$U_n = \frac{(f - w \sin\theta_n) * \sec 2\theta * \sin\xi_0}{\cos(2\theta_n - \xi_0)} \quad \text{(I-6)}$$

$$D_n = w \cos\theta_n * \sec 2\theta \quad \text{(I-7)}$$

$$l_n = \frac{f * \sec 2\theta * \sin\xi}{\cos 2\theta_0 + \xi_0} \quad \text{(I-8)}$$

## I.5 Les technologies de concentration solaire

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel, fixe ou mobile, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

Les systèmes solaires thermodynamiques peuvent être classés en quatre filières technologiques (figure I.8): cylindro-parabolique, Fresnel, récepteur central (tour), parabole-Stirling. Ces technologies, qui ne valorisent que la composante directe du rayonnement solaire, sont équipées de dispositifs de suivi de la trajectoire du soleil et de miroirs pour concentrer ses rayons.

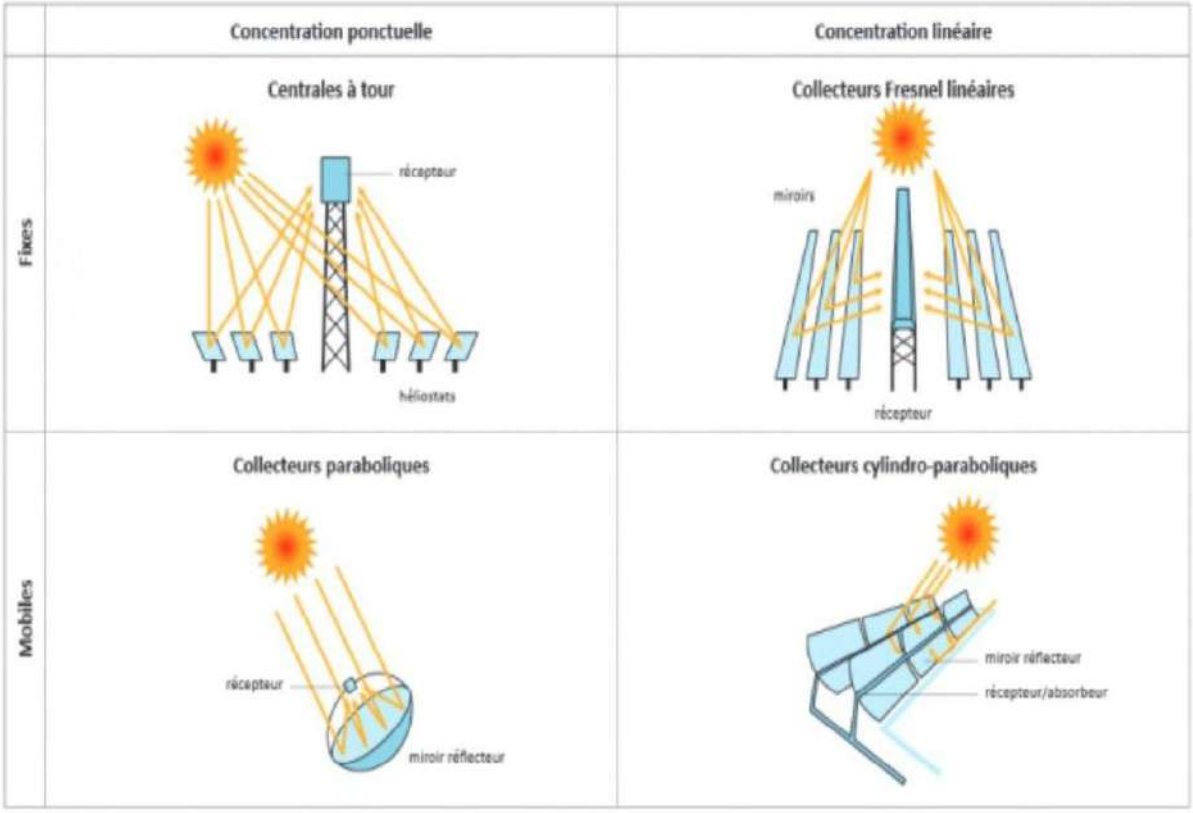



**Figure I.8:** Les 4 principales technologies de concentration.

### I.5.1 La concentration ponctuelle

#### I.5.1.a Le tour solaire

Un système de centrale solaire à tour consiste en une série de miroirs ou héliostats munies d'un système de poursuite à deux axes pour réfléchir la lumière incidente du faisceau solaire direct vers un récepteur en haut de la tour ou un réflecteur secondaire. Ces miroirs ou héliostats doivent être espacés entre eux dans le champ pour éviter les interférences mécaniques ou optiques. (Figure I.9).

Le récepteur est conçu pour intercepter efficacement les rayons solaires concentrés à une température élevée et les convertir sous forme de chaleur. Cette énergie est captée par un fluide de travail puis stockée sous forme d'énergie thermique, utilisée pour entraîner un générateur électrique, ou utilisée comme chaleur industrielle [7].

Cependant, la collecte efficace, la concentration élevée et la température élevée de la chaleur recueillie sont des facteurs qui rendent cette technologie intéressante pour de nombreuses applications [14].

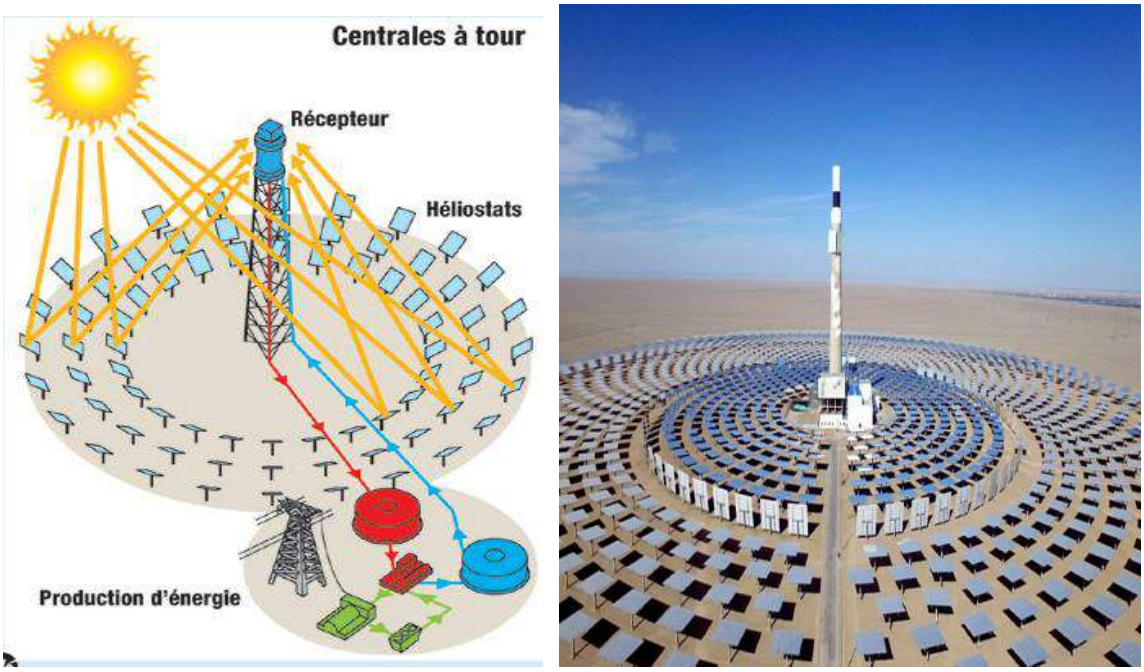



**Figure I.9:** centrale a tour [15].

### I. 5.1.b Concentrateur parabolique

Il y a 2 types que j'ai vu dans cette technologie de concentration se sont :

### 5.1. b.1 Concentrateur parabolique thermodynamique a moteur Stirling

Le principe de fonctionnement est basé sur la réflexion du rayonnement solaire capté et concentré par les miroirs d'une parabole. Le rayonnement solaire est projeté vers le récepteur du moteur Stirling placé sur le point focal, où la température peut atteindre 550°C [16].

La chaleur sert à chauffer un fluide, généralement de l'air ou l'hélium, qui est soumis à un cycle thermodynamique de 4 phase ; chauffage isochore, détente isotherme, refroidissement isochore et enfin une compression isotherme. Le gaz chauffé entraîné le fonctionnement d'un moteur et va permettre la production d'électricité biais du générateur électrique.

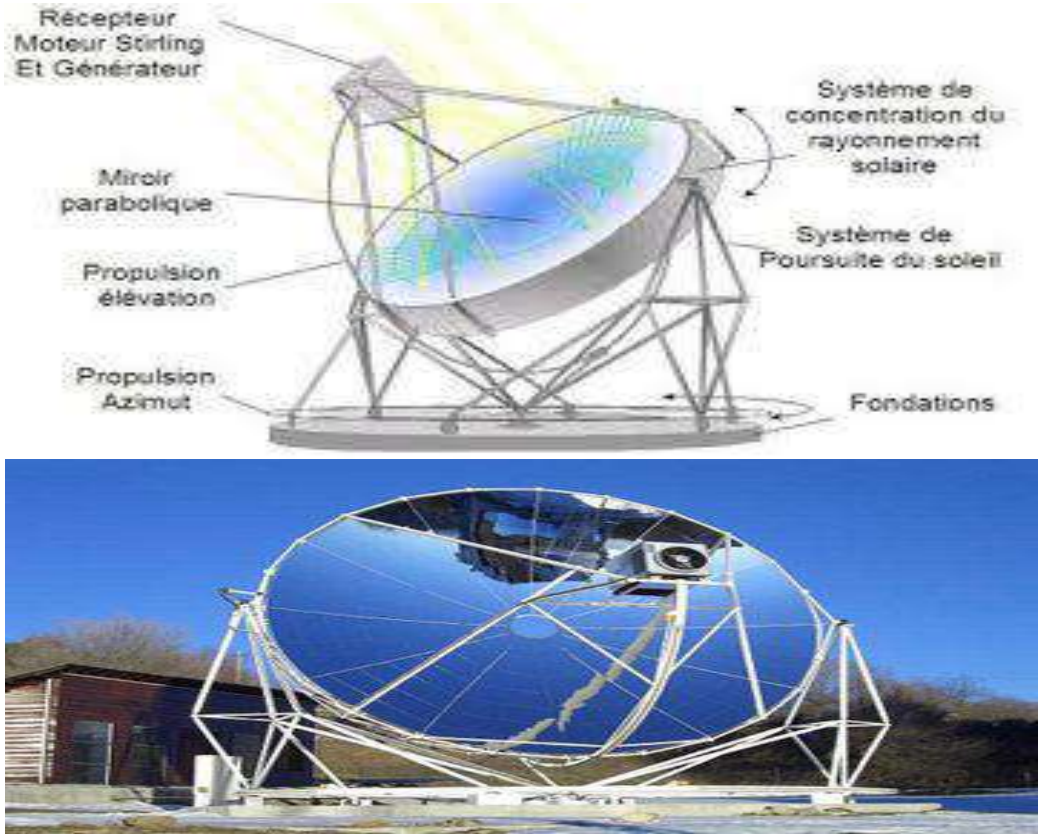



**Figure I. 10:** Concentrateur parabolique a moteur Stirling

### 5.1. b.2 L'assiette parabolique a concentration solaire photovoltaïque

Au PETAL (Laboratoire d'Astrophysique et de Transformation d'Energie Photonique) du centre de Sdé Boker, les chercheurs ont conçu un récepteur parabolique qui utilise l'énergie solaire photovoltaïque. Une assiette de 400 m2 de miroirs permet de concentrer la lumière sur un panneau solaire de 1 m sur 1 m. Les réflecteurs sont installés sur un châssis qui permet de changer automatiquement son orientation en fonction de la position du soleil dans le ciel. Ainsi l'énergie produite par ce panneau (100 kW /m2 de panneau) est 100 fois supérieure à celle d'un panneau solaire classique. Après certaines difficultés de montage, le système fonctionne et devrait connaître de brillantes perspectives [17].



**Figure I.11 :** Récepteur solaire en forme d'assiette parabolique conçu par le PETAL [17].

### I.5.2 La concentration linéaire

#### I.5.2.a Concentrateur cylindro-parabolique

C'est la filière de loin la plus mature. Ces centrales utilisent des miroirs cylindro-paraboliques de 100 à 800 m2 qui concentre les rayons du soleil sur des tubes placés à l'axe focal du concentrateur et dans lesquels circule un fluide caloporteur. Le concentrateur suit la course du soleil en tournant sur un axe. Le fluide caloporteur, généralement une huile de synthèse, chauffé lors du passage dans les tubes, circule à travers une série d'échangeurs de chaleur pour produire de la vapeur surchauffée à la température de 390°C sous une pression de 100 bars. Il constitue ainsi la source chaude d'un cycle vapeur classique à resurchauffe. Toutes les unités construites à ce jour comportent une hybridation au gaz naturel d'au moins 12 à 15%. Un stockage thermique de plusieurs heures dans des sels fondus permet de mieux adapter la production à la demande bien que l'adjonction de ce système et l'extension du champ solaire qui en résulte engendrent un surcoût d'investissement [18].

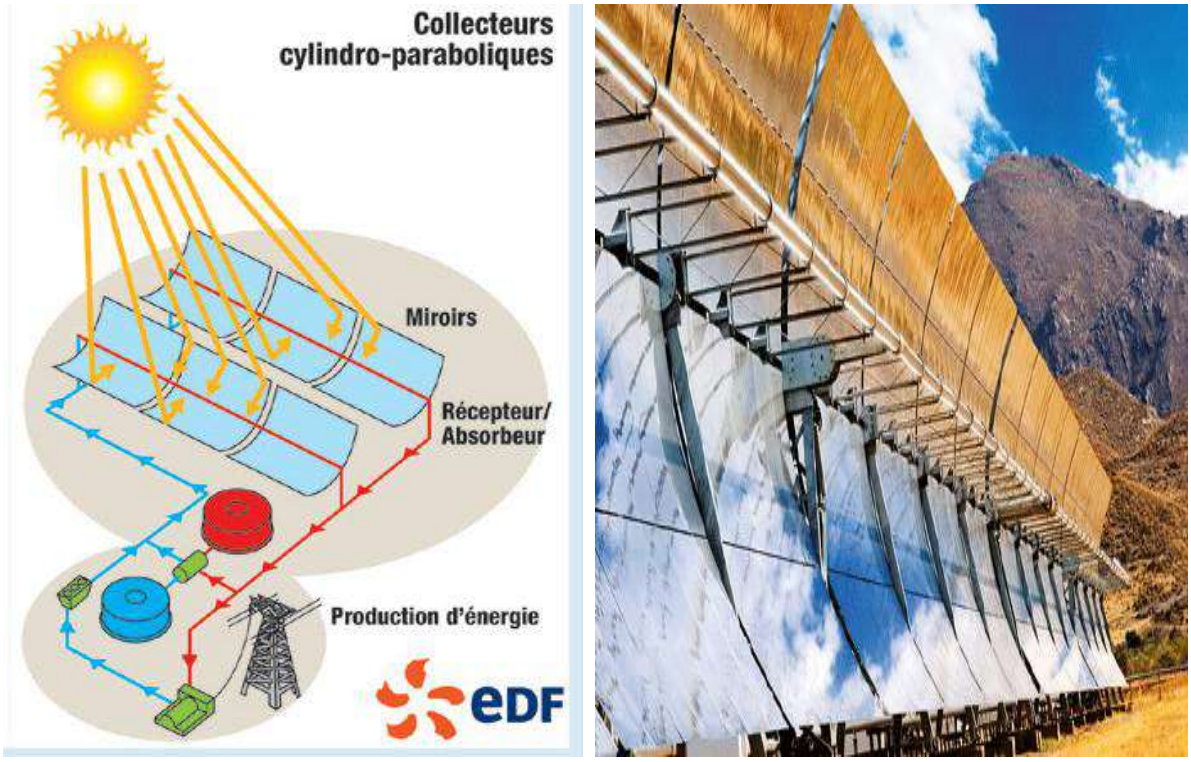



**Figure I.12** : Centrale cylindro-parabolique [15].

### I.5.2.b Concentrateur linéaire de Fresnel

C'est essentiellement le sujet de notre étude. Cette technologie est encore au stade de la démonstration.

Le concept est simple et facile par rapport aux autres collecteurs solaires à concentration de la même famille. Il se compose de miroirs plats et est moins cher que d'autres types de capteurs solaires à effet concentré.

Ce système utilise des miroirs plats, disposés en lames parallèles qui ont tendance à tourner de sorte que la réflexion du rayonnement solaire soit toujours incluse dans le récepteur. Avec une performance optique inférieure à 30 ou 40% par rapport à des CSP équivalents [5].

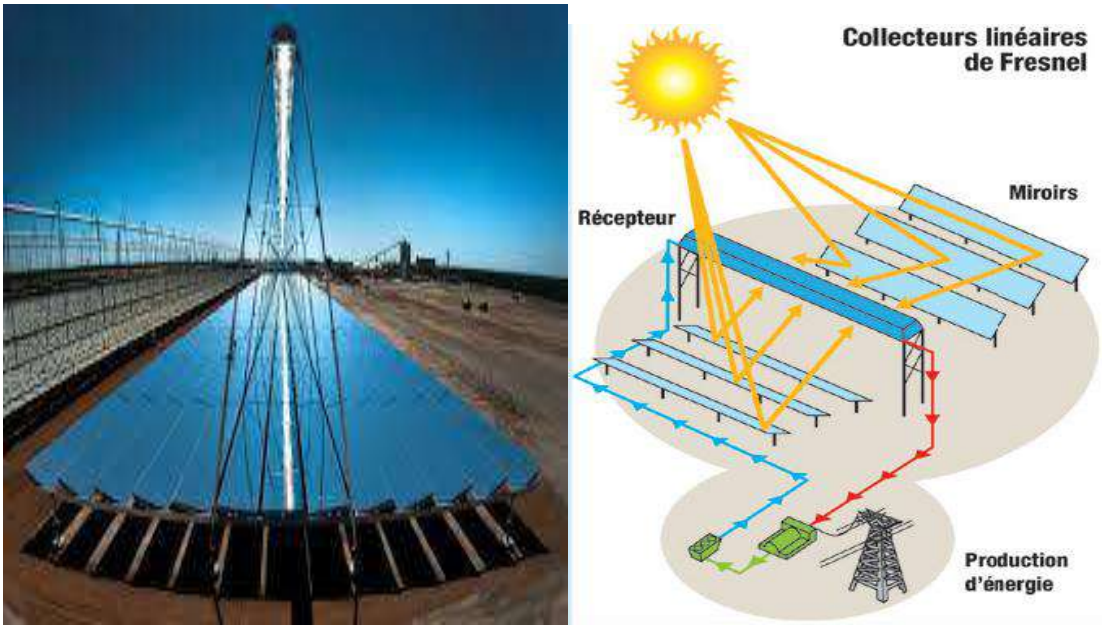



**Figure I.13** : Concentrateur linéaire de Fresnel [15].

## I.6 Comparaison des quatre principaux types de concentrateurs

Ces technologies diffèrent de la concentration solaire sensiblement les unes des autres, non seulement en ce qui concerne les aspects techniques et économiques, mais aussi en ce qui concerne leur fiabilité, leur maturité et leur expérience opérationnelle dans des conditions d'échelle de service. (Tableau I.1)

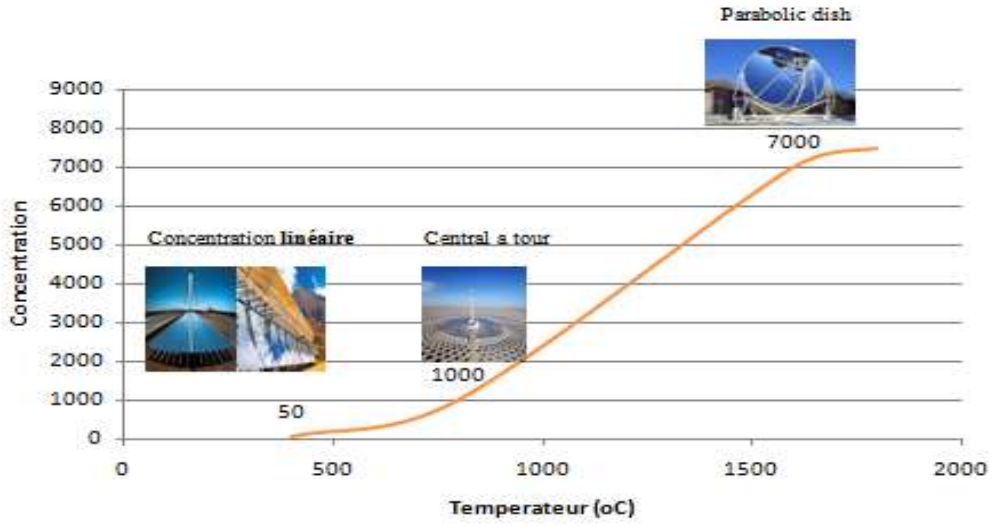



**Figure I.14:** comparaison entre les 4 technologies.

**Tableau I.1 :** comparaison des quatre principaux types de concentrateurs [3].

| concentrateur | Système à concentration linéaire | | Système à concentration ponctuelle | |
|---|---|---|---|---|
| Type de champ solaire | Cylindro-parabolique | Linéaire de Fresnel | Tour solaire | Parabole |
| Etat de l'art | commercial | commercial | Pré-commercial | Prototypes opérationnels |
| Taille type d'une unité (MW) | 5-200 | 1-200 | 10-100 | 0,1 |
| Besoins pour la construction | importants | simple | important | Modérés |
| Température de fonctionnement | 390-550 | 270-550 | 550-1000 | 800-900 |
| Fluide caloporteur courants | Huile thermique/ eau | Huile thermique/ eau | Air/ sels fondus/ eau | air |
| Fiabilité | élevée | moyenne | moyenne | moyenne |
| Intégration avec l'environnement | difficile | facile | moyen | moyen |

## I.7 Avantages et inconvénients de ces technologies

Les avantages et les inconvénients des quatre technologies présentés dans le Tableau (I.2)

**Tableau. I.2:** Les avantages et les inconvénients des quatre types de concentrateurs [3].

| Type de concentration | Avantages | Désavantages |
|---|---|---|
| Cylindro-parabolique | Disponible commercialement, avec une production de plus de 12 milliards kWh/ La température atteinte s'élevé à 500 oC(400oC actuellement )/ L'investissement et le coût d'opération sont mois chers par rapport aux autres/ Il a le meilleure facteur d'utilisation des terres de toutes les technologies solaires/ Nécessite le moins de matériel/ Le concept hybride est déjà utilisé.– La capacité de stockage est plus grande. | L'utilisation du fluide caloporteur (huile) restreint la température atteinte à 400oC. |
| Linéaire de Fresnel | Moins de miroirs utilisés/ Pas de vide à l'intérieur du tube récepteur, ce qui facilite sa conception et sa durabilité/ Les contraintes mécaniques dues à la poussée du vent sont réduites par la disposition plane des miroirs/ Réduction du coût de la construction en raison d'un assemblage rapide/ Faible risque d'entraîner des dommages/ L'utilisation des terres est plus efficace. | La performance optique est inférieure par rapport au miroir cylindro-parabolique/ Un miroir secondaire est souvent demandé/ Période d'opération moindre. |

| | | |
|---|---|---|
| Tour solaire | Ce type de concentration a une haute efficacité de conversion et une température potentielle au-delà de 1000◦C/ Stockage à une température haute/ Il est possible d'effectuer de l'opération hybride. | L'investissement et le coût exigé sont importants, et il n'est pas pratique pour la commercialisation. |
| Parabole | Caractérisés par une grande efficacité, modularité, autonomie de fonctionnement, et une capacité inhérente hybride (la capacité à fonctionner sur l'énergie solaire ou un combustible fossile, ou les deux). | Cette technologie est en phase de développement d'ingénierie et de défis techniques restent concernant les composants solaires et la disponibilité commerciale d'un moteur. |

**Tableau I.2 'Suite':** Les avantages et les inconvénients des quatre types de concentrateurs.

## I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vus l'histoire du concentrateur linéaire de Fresnel et son fonctionnement en général, nous avons également découvert les types de concentration et les avons comparés entre eux en termes de propriétés et d'énergie produite.

Bien que l'idée de concentration Linéaire de Fresnel ait plus d'un siècle, la technologie est encore jeune. La technologie linéaire de Fresnel se distingue des concentrateurs paraboliques par sa simplicité, qui permet de réduire les coûts. Les performances cependant inférieures ne permettent pas d'affirmer avec certitude quelle technologie sera la meilleure à l'avenir.

# *Chapitre II*

## Généralités sur le gisement solaire et l'énergie photovoltaïque

## II.1 INTODUCTION

Les énergies renouvelables se révèlent aujourd'hui, comme sources de production d'électricité vitales, obtenues à partir des gisements inépuisables telle que « le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les végétaux ou encore les marées ». Vus les progrès technologique ces dernières années, ces formes alternatives de production d'électricité deviennent, pour certaines, compétitives par rapport aux combustibles fossiles en voie de raréfaction (pétrole, gaz, et le charbon).

Pour toutes les applications directes de l'énergie solaire, le gisement solaire local doit être caractérisé soigneusement puisqu'il présente des variations géographiques et saisonnières importantes.

Il est très important de procéder préalablement à des campagnes de mesures du

gisement solaire, par exemple en cas de possibilité de microclimats très accentués ou de projets de centrales solaires à concentrateurs où la connaissance fine de la répartition entre le rayonnement direct et le rayonnement diffus est nécessaire.

Dans ce chapitre, nous apprendrons à connaître le gisement solaire, les coordonnées célestes, les rayonnements solaires, l'énergie solaire photovoltaïque et ces types chacun séparément.

## II.2 Position géométrique du soleil

### II.2.1 Définition

Le soleil est une étoile située à environ 150millions de kilomètres de la Terre. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène, son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète (soit $2*10^{30}$ kg).

Le soleil est composé de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments lourds (Fer, Néon, Azote, Silicium, …).

### II.2.2 Mouvement de la terre autour du soleil

La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Sa distance moyenne est de 149.6 millions de km, La terre tourne par rapport à cet écliptique céleste avec une déclinaison qui varie avec les saisons, En vingt-quatre heures, la terre effectue une rotation complète d'Ouest en Est autour de son axe ; c'est la base de notre système horaire. De cette rotation découle la succession des jours et des nuits [19].

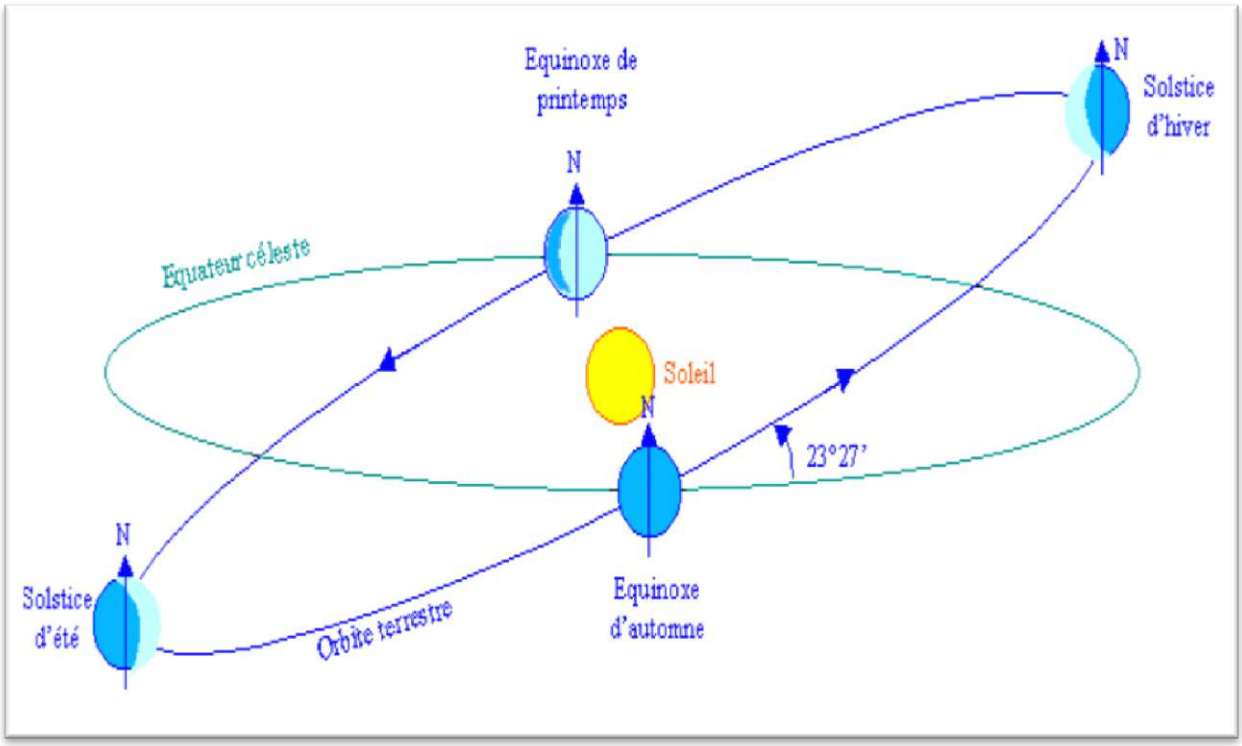



**Figure II.1:** Mouvement de la Terre.

### II.3 La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire de rayon indéfini, établie dans les cieux et ayant comme centre l'œil d'un observateur terrestre. La sphère est la base du système de coordonnées employé pour déterminer les positions des astres. Elle est également utilisée pour désigner les intervalles de temps [20].

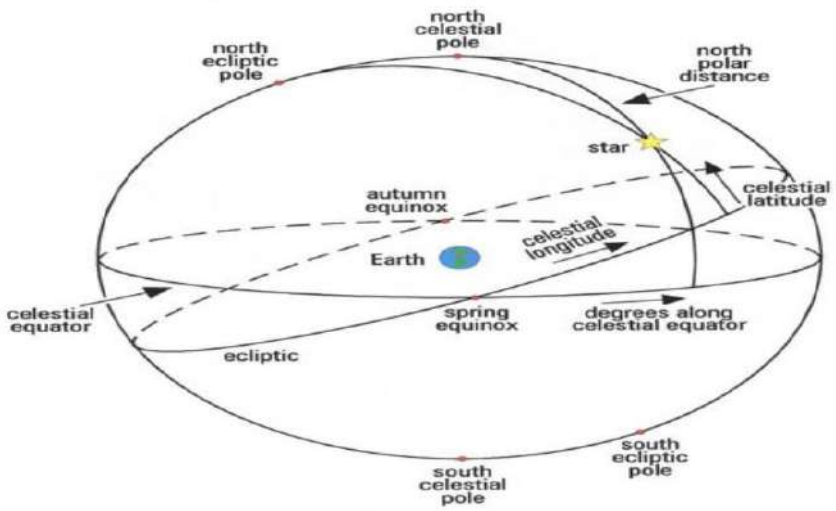



**Figure II.2:** La sphère céleste.

## II.4 Les coordonnées célestes

### II.4.1 Les coordonnées géographiques

Sont des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

#### II.4.1.a La longitude (L)

Comptée positivement de 0 à +180$^o$ vers l'est et négativement de 0 à -180$^o$ vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

#### II.4.1.b La latitude (ϕ)

Permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle est comptée positivement de 0 à +90$^o$ vers le nord et négativement de 0 à -90$^o$ vers le sud.

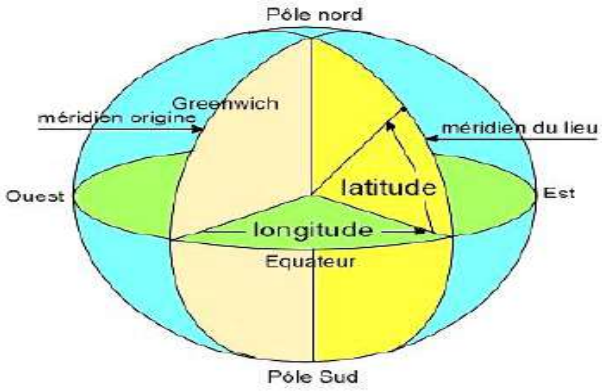



**Figure II.3:** coordonnées géographiques du lieu.

### II.4.2 Les coordonnées horaires

#### II.4.2.a. L'angle horaire (ω)

Est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe .Elle est comptée positivement dans le sens rétrograde de 0 à +360°, une heure idéale vaut donc 15° d'angle et ω=0° (12h:00) au méridien de Greenwich.

#### II.4.2.b La déclinaison (δ)

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle est varie au cours de l'année de +23°27' à -23°27'et détermine l'inégalité des durées des jours. δ est donnée par la relation suivante :

$$23,45.\sin\left(\frac{360}{365}(N+284)\right). \qquad \text{(II-1)}$$

N : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1èrejanvier (1 à 366).

Elle est comptée positivement de 0 à +90° de (E) vers P (pole boréal), et négativement de 0 à -90° de (E) vers P' (pole austral).

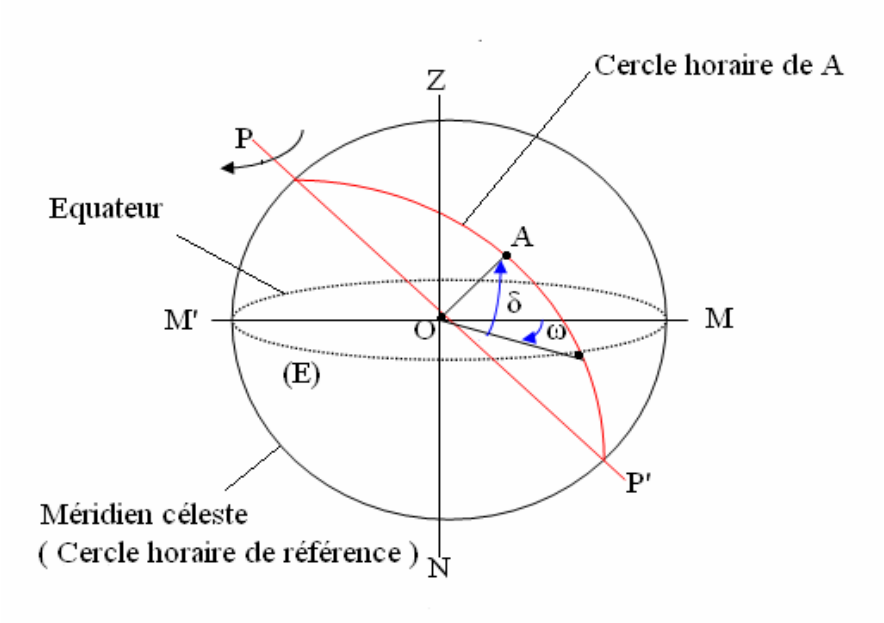



**Figure II.4:** coordonnées horaires.

### II.4.3 Coordonnées Horizontales

#### II.4.3.a La hauteur (h)

Est l'angle entre la direction du soleil et sa projection .Elle est comptée positivement de 0 à +90° vers le zénith et négativement de 0 à -90° vers le nadir [20].

#### II.4.3.b L'azimut (a)

Est l'angle entre la direction de soleil et la direction de sud**.** On peut le compter positivement de 0 à +180° vers l'ouest et négativement de 0 à -180° vers l'est.

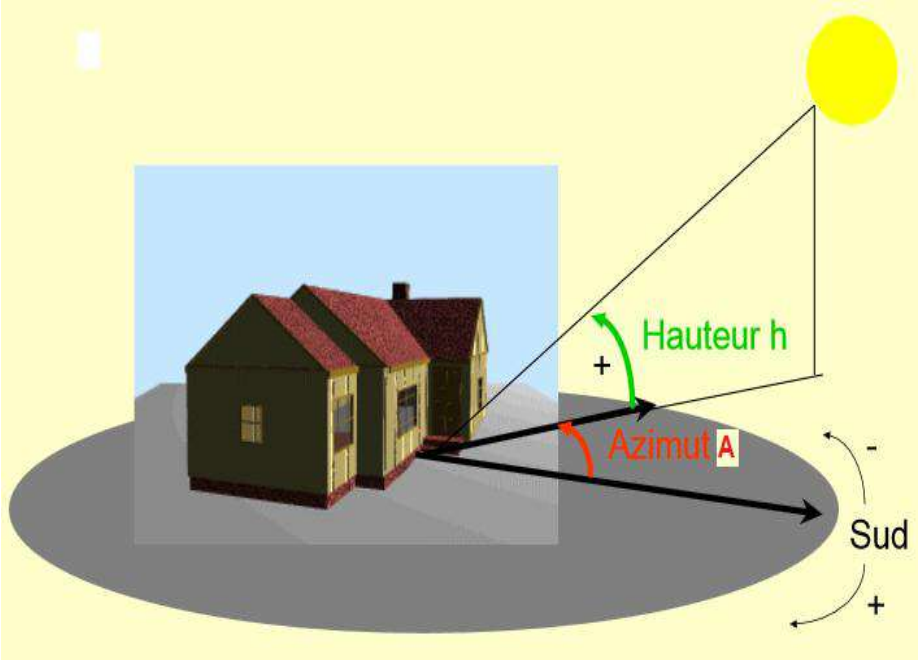



**Figure II.5:** Coordonnées Horizontales.

## II.5 Temps solaires

### II.5.1 Temps solaire vrais (TSV)

Le temps solaire vrais, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil, ce temps est indiqué par les cadrans solaires et les héliographes, Il est donné par la relation suivante:

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15}. \qquad \text{(II-2)}$$

### II.5.2 Temps solaire moyen (TSM)

Le temps solaire moyen est appelé parfois temps local, Il est donné par la relation suivante:

$$TSM = TSV - Et \tag{II-3}$$

Où :

$$Et = 9{,}87.\sin\left[2.\frac{360}{365}(N-81)\right] - 7{,}53.\cos\left[\frac{360}{365}(N-81)\right] - 1{,}5.\sin\left[\frac{360}{365}(N-81)\right] \tag{II-4}$$

Et : est l'équation du temps exprimée en minutes.

N : est le numéro du jour dans l'année.

### II.5.3 Temps civil

Le temps civil est le temps moyen avec l'origine à minuit.

### II.5.4 Temps universel (TU)

Le temps universel est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine), appelé encore GMT (Greenwich Mean Time). Est donné par la relation suivante :

$$TU = TSM - \frac{L}{15}. \tag{II-5}$$

Où : L est la longitude .Tel que :

L < 0 : Pour les sites situés à l'Est de Greenwich.

L > 0 : Pour les sites situés à l'Ouest de Greenwich.

L = 0 : Pour les sites situés au méridien de Greenwich .

### II.5.5 Temps légal (TL)

Le temps légal est une heure liée au TU par une différence fixe exprimée en un nombre entier d'heures qui dépend de la longitude et des coutumes de chaque pays. Est donné par la relation suivante :

$$TL = TU + \Delta H\ . \tag{II-6}$$

Où :

ΔH : Est le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

## II.6 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. En dehors de l'atmosphère terrestre, il donne un éclairement énergétique à peu prés constant et égale à 1367w/m2, appelé de ce fait constante solaire.

Types de rayonnements

### II.6.1 Rayonnement direct

Le rayonnement solaire direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire.

### II.6.2 Rayonnement diffus

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension.

### II.6.3 Rayonnement global

C'est la somme des deux types de rayonnements direct et diffus.

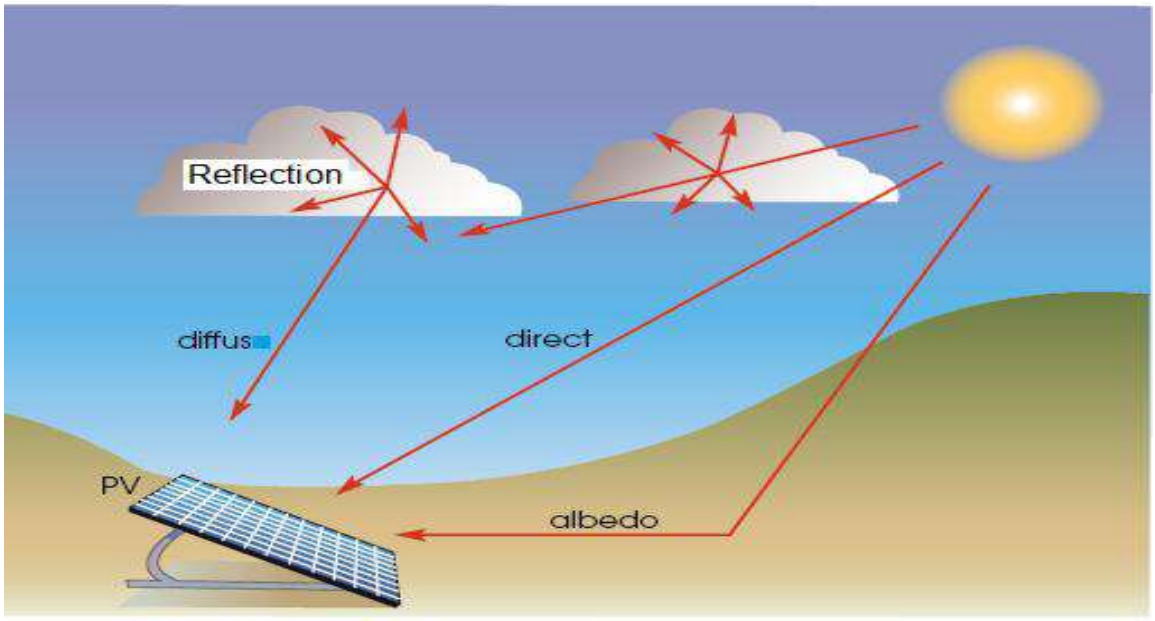



**Figure II.6:** Le rayonnement solaire.

### II.7 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté.

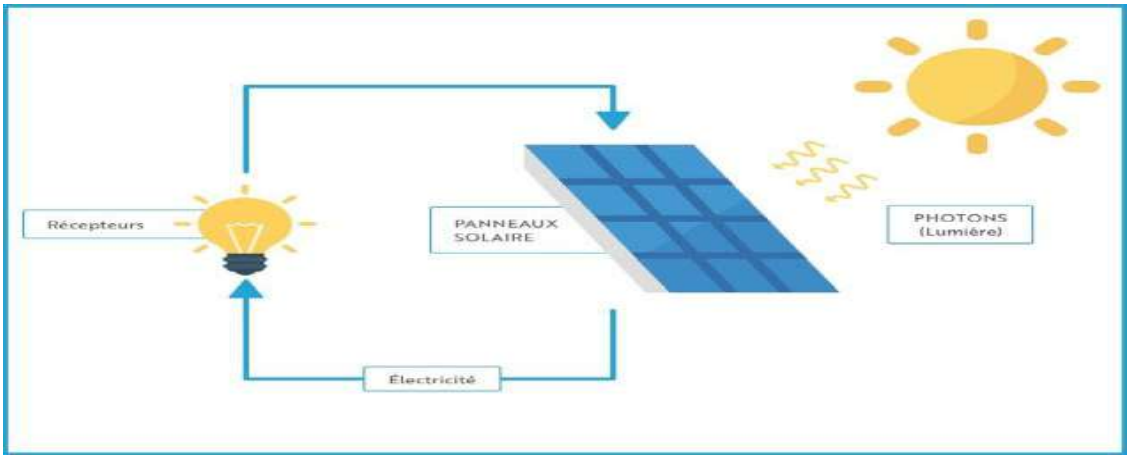



**Figure II.7:** conversion photovoltaïque.

## II.8 Le solaire photovoltaïque non concentré

Les technologies à base de silicium constituent plus de 90% du marché photovoltaïque mondial. Elle provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme [21] :

### II.8.1.Les cellules monocristallines

C'est la filière historique du photovoltaïque. Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en une seule pièce. Elles ont un bon rendement mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ».

### II.8.2 Les cellules polycristallines

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples. Elles ont un rendement plus faible que les cellules monocristallines mais leur coût de production est moindre.

Des avancées technologiques permettent aujourd'hui de produire des cellules policrystallines à couches minces afin d'économiser le silicium. Ces cellules ont une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres d'épaisseur.

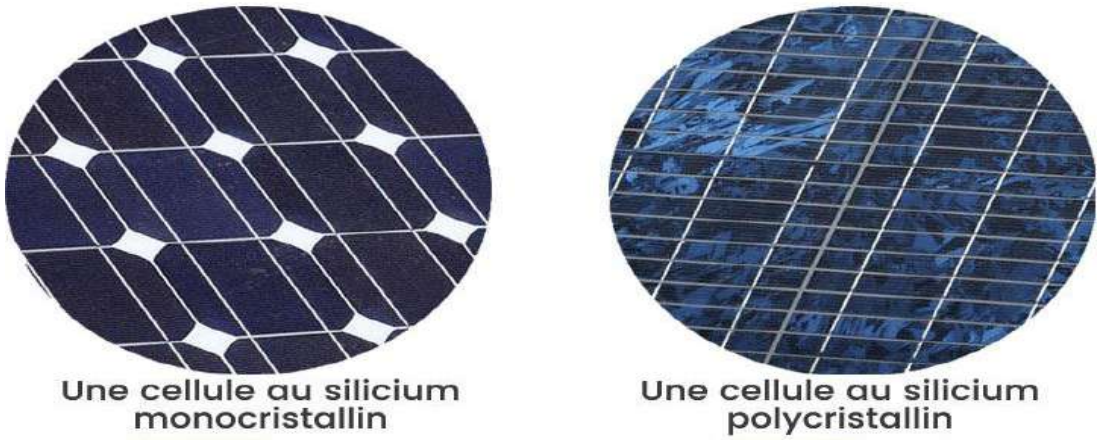



**Figure II.8:** cellule monocristalline et poly cristalline.

## II.9 Le solaire photovoltaïque concentré

Le principal objectif de la recherche actuelle dans le domaine du solaire photovoltaïque c'est d'augmenter le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique des installations pour en réduire les coûts. Choix des matériaux semi-conducteurs (silicium ou autre), combinaison de plusieurs technologies (hétérojonction), introduction de nanotechnologies… plusieurs axes de recherches sont étudiés. Si certains cherchent avant tout à améliorer le rendement des cellules solaires, d'autres cherchent à optimiser à tous les niveaux le captage de l'énergie lumineuse et sa conversion. Tout cela a conduit au développement de cellules solaires photovoltaïques concentrées (CPV), qui visent à concentrer la lumière du soleil sur les cellules solaires afin d'augmenter la densité de flux d'énergie et donc la quantité d'électricité produite [22].

Lorsque le photovoltaïque à concentration est utilisé dans des endroits avec un rayonnement direct normal élevé (voir carte ci-dessous)(figure II.9), cela devient très intéressant.

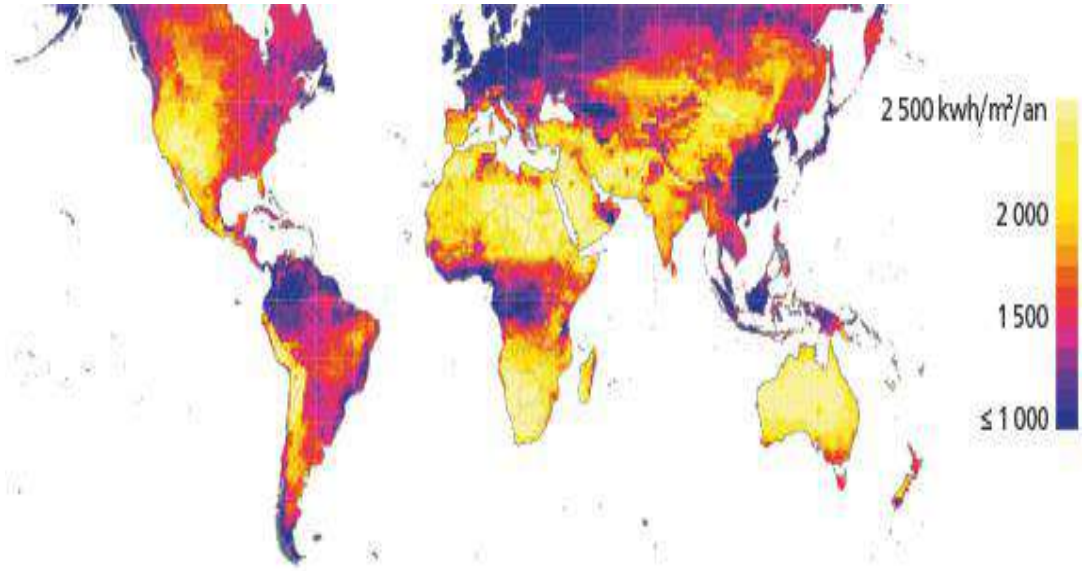



**Figure II.9:** Ensoleillement mondial par an et par m² [23].

Les parties claires sont donc les plus exploitables pour la filière photovoltaïque sous concentration.

### II.9.1 comparaison des différentes concentrations photovoltaïques

Différents systèmes existent. Nous pouvons définir 3 types de concentrations. La basse, moyenne et haute concentration. Elles ont toutes un facteur de concentration différent.

#### II.9.1.a La basse concentration

La basse concentration consiste à obtenir un facteur de concentration entre 2 et 100 « soleils ». Elle est réalisée le plus généralement grâce à des miroirs de Fresnel car ils ne permettent pas une grande concentration. Il est possible d'en utiliser un ou plusieurs.

L'intérêt de ces méthodes est qu'elles permettent de produire une électricité peut coûteuse car les miroirs sont à très bas prix. Il est aussi possible d'utiliser des cellules classiques en silicium afin de profiter d'un marché compétitif et moins onéreux.

La figure ci-dessous montre un système mis en place par Axiosun en partenariat avec le CEA. Ce principe permet de concentrer 12 « soleils »

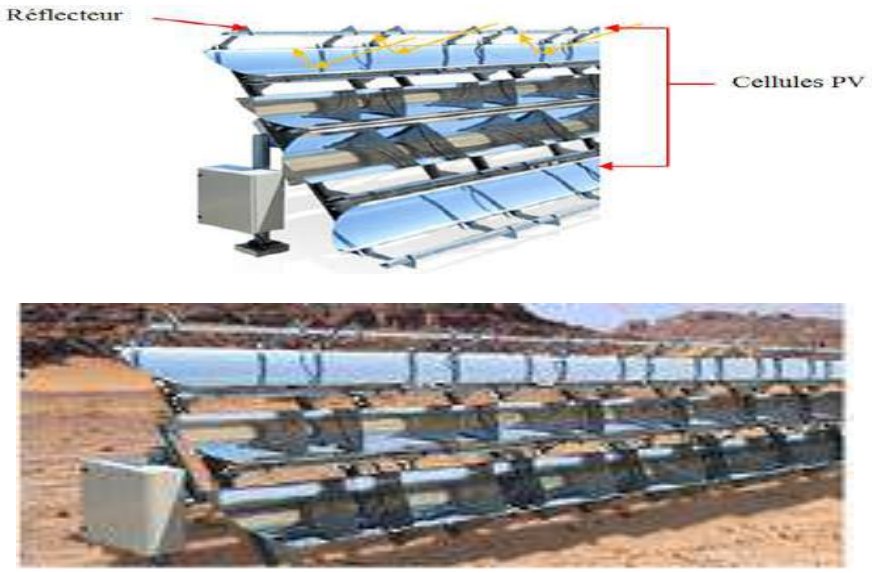



**Figure II.10:** Système LCPV d'Axiosun [24].

### II.9.1.b La moyenne et haute concentration

La moyenne et haute concentration augmente le rayonnement solaire par un facteur de 100 à 1000. Nous pouvons préciser que la moyenne a pour maximum 300 « soleils » [22].

Ces procédés utilisent généralement des lentilles de Fresnel à la place des miroirs mais bien-sûr beaucoup de systèmes sont mis en place.

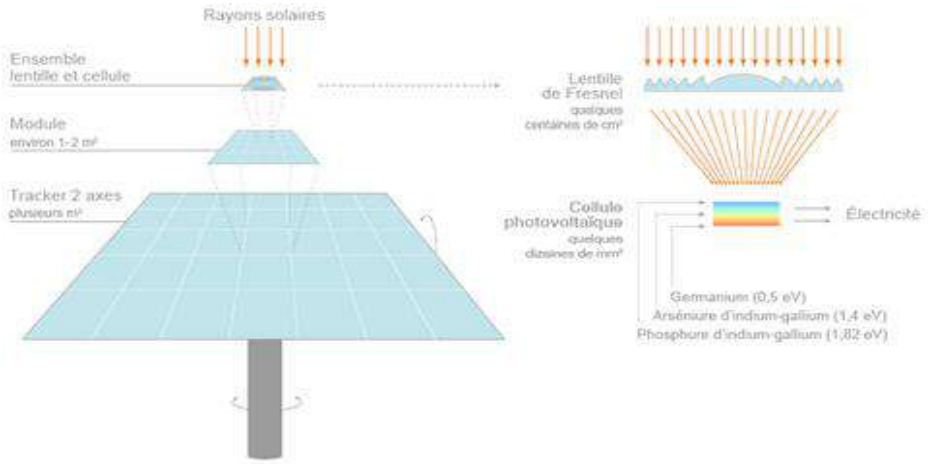



**Figure II.11:** Système d'ensemble MCPV [25].

### II.9.2 la composition des systèmes photovoltaïques sous concentration

Plusieurs systèmes de concentration existent ou sont encore à l'étude. Nous allons vous en présenter quelques-uns par la suite. Les composants des systèmes diffèrent mais le fonctionnement reste toujours le même.

Voici la composition des systèmes photovoltaïques sous concentration :

- Récepteur solaire (cellule PV)
- Concentrateur (lentille ou miroirs de Fresnel)
- Traqueurs
- Dissipateur

Il est préférable d'utiliser des traqueurs afin qu'ils suivent l'avancé du soleil cela permettra d'optimiser le système. Ces traqueurs vous seront expliqués par la suite.

Malgré cela, il reste un problème majeur, car une augmentation du flux lumineux augmente considérablement la température de contact de la cellule.

Par conséquent, il est préférable d'ajouter un dissipateur thermique qui permet d'évacuer cet excès de chaleur afin que la température maximale moyenne des cellules ne dépasse pas 100 °C.

### II.9.2.a les cellules photovoltaïques

Les technologies de cellules seront différentes Suivant le système utilisé. Pour une basse concentration (augmenter le rendement à moindre coût) utilise des cellules « classique » en silicium (figure II.12). Alors que la haute et moyenne concentration utilise des cellules plus performantes.

- Comme avec la basse concentration, les cellules utilisées sont des cellules classiques en silicium poly-cristallin ou monocristallin.

Les cellules ont un rendement situé seulement entre 10 et 14% pour une cellule poly-cristalline ou encore entre 11% et 16% pour du poly-cristallin

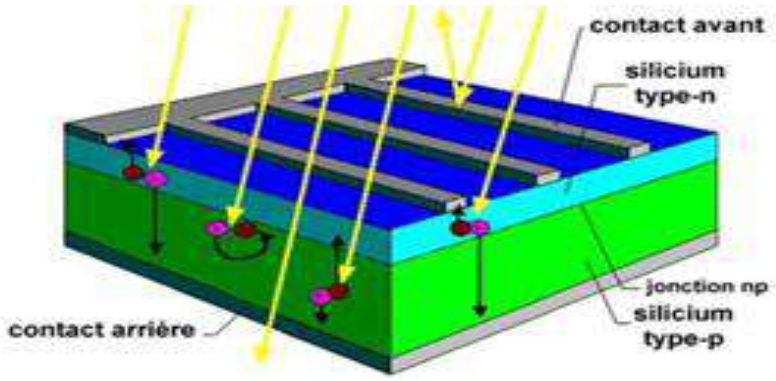



**Figure II.12:** Cellule photovoltaïque Silicium [26].

- La HCPV (haute concentration) utilise plutôt des cellules de types composées III-V (Figure Ci-dessous). Ces cellules sont beaucoup plus performantes et donc adaptées à la haute concentration (système plus coûteux mais très performant). (figure II.13)

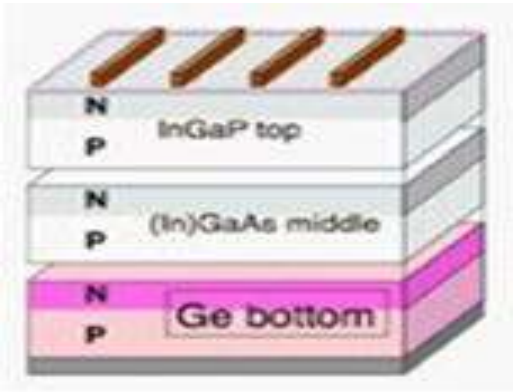



**Figure II.13:** Cellule photovoltaïque III-V [26].

Les cellules multi-jonctions sont composées de 3 matériaux. Généralement la première couche est duInGaP (Phosphure de gallium indium), la seconde duInGaAs (Arseniure de gallium indium) et la dernière du Ge (Germanium).

Ces 3 jonctions ont pour le principal intérêt d'avoir une énergie de gap différente qui permet de couvrir le spectre solaire et de couvrir un maximum de longueurs d'ondes.

### II.9.2.b les concentrateurs solaires

- **Les miroirs**

**Le miroir Cassegrain** La société Américo-Espagnole Sol-focus a développé un système de concentration basé sur le miroir Cassegrain (figure II.14). Le télescope de Cassegrain est un dispositif optique composé de deux miroirs, un miroir primaire concave et parabolique, dit objectif, et un miroir secondaire convexe hyperbolique. Ce réflecteur concentre jusqu'à 650 fois la puissance incidente du soleil et est composé à 97% de matériaux recyclables tel que l'aluminium et le verre. Le verre est traité pour une exposition à long terme aux ultraviolets [27].



**Figure II.14:** ensemble du réflecteur Cassegrain [27].

- **Le miroir de Fresnel** permet de mettre à plat une parabole en la «découpant » en plusieurs tronçons (figure II.15). L'espace occupé est donc restreint comparé à une parabole classique et la prise au vent se voit réduite puisque chaque mouvement de miroir est contrôlé par des moteurs. On peut donc orienter les miroirs pour réguler la concentration.



**Figure II.15:** parabole a miroir de Fresnel [28].

- **Les lentilles** ou lentilles à échelon (figure II.16). Ce type de lentille a permis de réduire considérablement l'épaisseur du verre en reproduisant le schéma d'une lentille de taille normale sur différents échelons.

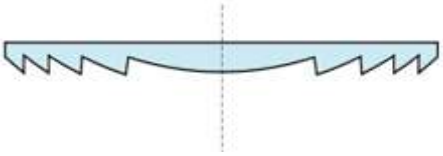


**Figure II.16:** lentille de Fresnel [29].

- **Le dissipateur**

Un gros problème subsiste quand on veut faire du solaire a haut rendement, L'augmentation du flux lumineux augmente énormément la température de contact de la cellule. Les cellules ont en moyenne une température maximale de 100°C. Et pour ce faire, il est indispensable pour le bien être de la cellule d'ajouter un dissipateur qui permet d'évacuer cette chaleur excessive. Pour cela on a 2 types de dissipateur actif et passif.

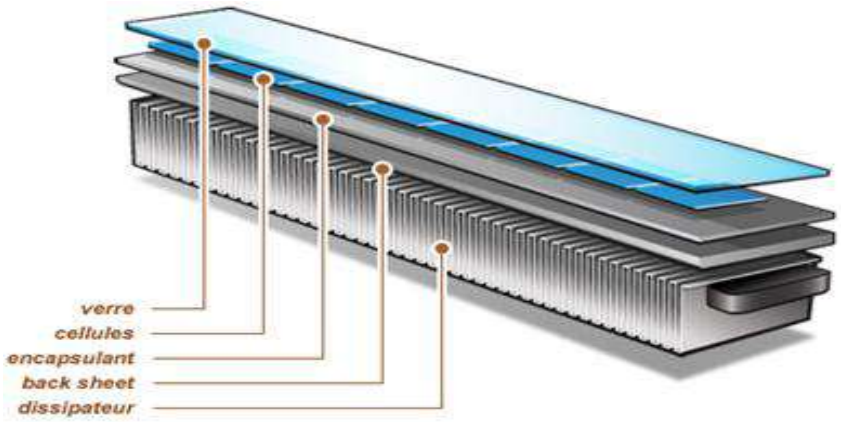



**Figure II.17:** ensemble du dissipateur [30].

- **Les traqueurs** l'utilisation de la technologie de suivi permettant aux modules solaires de suivre la trajectoire du soleil peut augmenter la production d'électricité d'environ un tiers (à condition d'optimiser l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface). Certains affirment qu'elle peut être augmentée jusqu'à 40% dans certaines régions, par rapport à des modules à angle fixe.

Il existe deux principaux types de système de suivi :

-Traqueur mono-axe : le panneau tourne autour d'un axe selon un déplacement azimutal d'est en ouest au cours d'une journée.

-Traqueur double axe : le panneau tourne selon un axe d'est en ouest et selon un axe vertical.

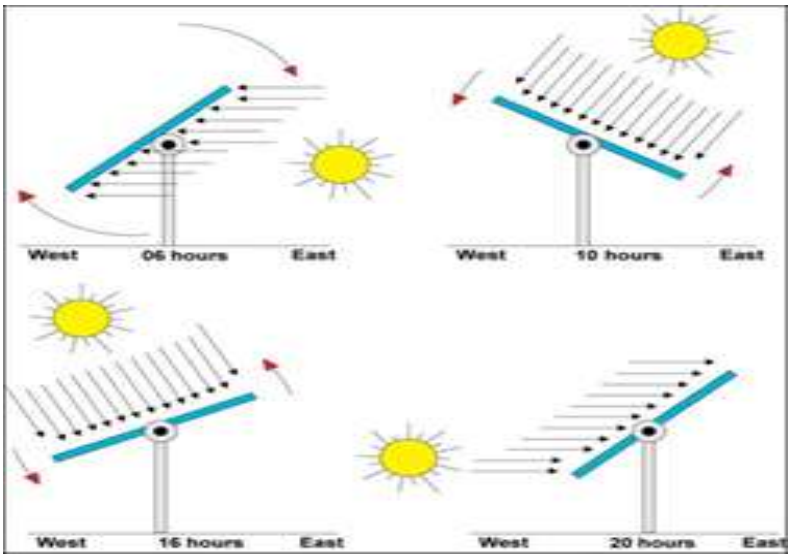



**Figure II.18:** système de suivi du soleil.

## II.10 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre une définition générale du gisement solaire avec un résumé de quelques notions et théories de base relatif au gisement solaire, dont nous avons besoin et en particulier le rayonnement solaire global sur Terre pour une exploitation de l'énergie solaire par un capteur ou concentrateur solaires.

L'énergie solaire est disponible sur toute la surface de notre planète. Cette énergie peut être exploitée de trois manières: l'énergie thermique, l'énergie thermodynamique et enfin l'énergie photovoltaïque, sur laquelle nous nous sommes concentrés dans cette partie.

# *Chapitre III*

## Présentation des différents composants du système

## III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présentera les différents composants eux quelle nous avons besoin pour réaliser notre concentrateur linéaire de Fresnel. Notre concentrateur est constitué d'une partie mécanique qui sert à tourner les miroirs et les diriger vers le rayonnement perpendiculaire du soleil en fonction de la trajectoire de soleil et également une partie électronique constituée d'une carte microcontrôleur « Arduino » et une horloge a temps réel.

## III.2 Le schéma synoptique

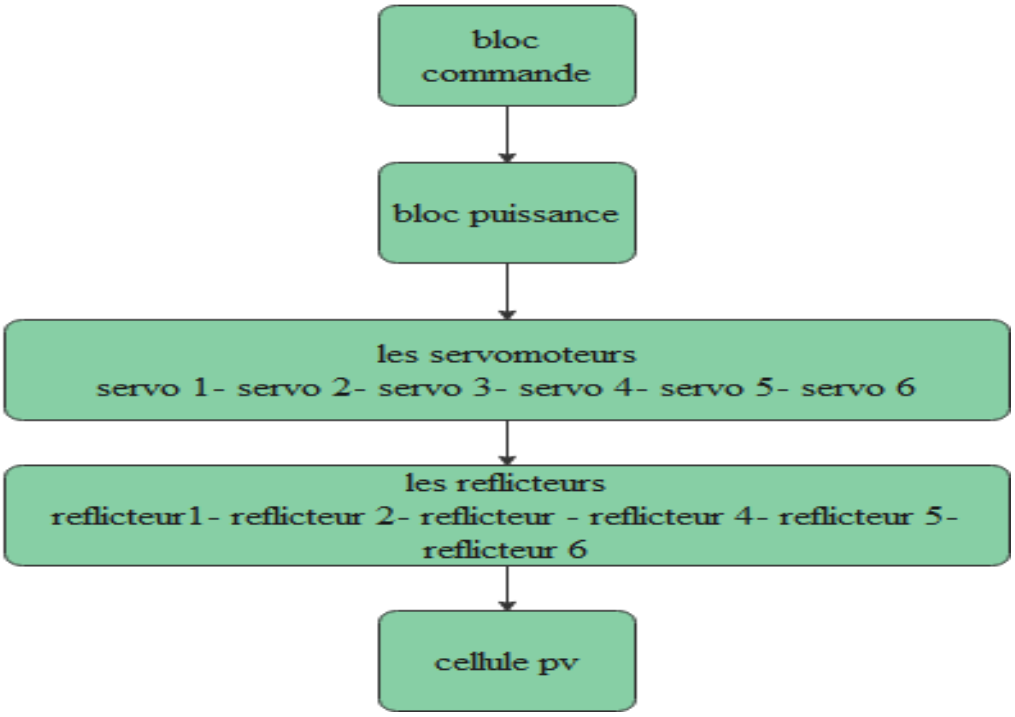



**Figure III.1:** schéma synoptique de réalisation.

La figure ci-dessus (figure III.1) présente un schéma synoptique général de notre réalisation. Le système à concentrateur de Fresnel que nous proposons est illustré par un schéma synoptique. Ce système est basé sur les informations injecté à la carte Arduino, Elles vont être converties dans cette dernière en valeur numérique qui fait la commande des servomoteurs pour font tourner les miroirs pour concentrer des rayonnements sur le panneau solaire.

## III.3 Etude des différents blocs

### III.3.. Le bloc commande

Le bloc commande de notre système est basé complètement sur Arduino Uno. Il est composé de deux choses principales : le matériel et le logiciel.

### III.3.1.a Le circuit Arduino

Arduino est une plate-forme de prototypage d'objet interactif à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation. Sans tout connaître ni tout comprendre de l'électronique, cet environnement matériel et logiciel permet à l'utilisateur de formuler ses projets par l'expérimentation directe. La société Arduino a créé plusieurs modèles d'Arduino : (Arduino Miga, Arduino Micropro, Arduino Uno …).

### III.3.1.a.1 Le microcontrôleur

Un microcontrôleur est un petit processeur informatique relié à des entrées et des sorties numériques (0 ou 1) ou analogiques (tension variable). Il est capable de mémoriser et d'exécuter un programme visant à interpréter les entrées pour agir sur les sorties. Il se programme en général à l'aide d'un ordinateur mais peut fonctionner de manière autonome.

Le modèle UNO de ARDUINO est une carte électronique dont le cœur est un microcontrôleur ATMEL de référence ATMega328P.

### III.3.1.a.2 Les caractéristiques de l'A Tmega328P

L'ATmega328P est le microcontrôleur de 8 bits de la famille AVR qui équipe certains des modèles les plus populaires de cartes Arduino. (Figure III.2)

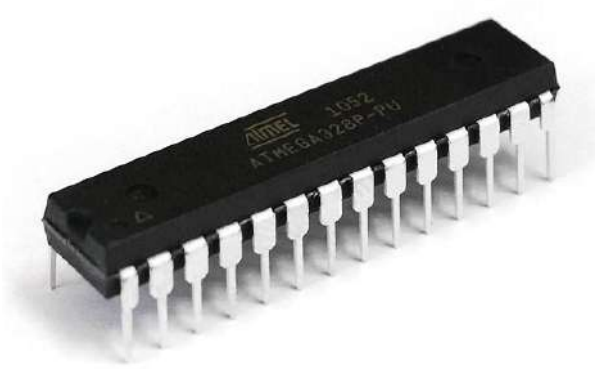



**Figure III.2 :** microcontrôleur Atmega328P.

Ce microcontrôleur contient 28 broches, avec 14 broches digitales (in/out) avec 6 de ses 14 broches qu'on peut utiliser comme PWM (générateur des signaux) out.

Les caractéristiques générales peuvent être résumées dans le tableau suivant [31] :

**Tableau III.1 :** Les caractéristiques de l'A Tmega328P

| | |
|---|---|
| Input Voltage (recommended) | 7-12 V |
| Digital I/O Pins | 14 (6 PWM output) |
| Analog Input Pins | 6 |
| DC Current per I/O Pin | 20 mA |
| DC Current for 3.3V pin | 50 mA |
| Mémoire Flash | 32 KB (ATmega328P) |
| SRAM | 2 KB (ATmega328P) |
| EEPROM | 1 KB (ATmega328P) |
| Clock Speed | 16 MHz |
| la largeur | 68.6 mm 53.4 mm |
| poids | 25 g |

**III.3.1.a.3 Configuration des broches ATMega328** [31]

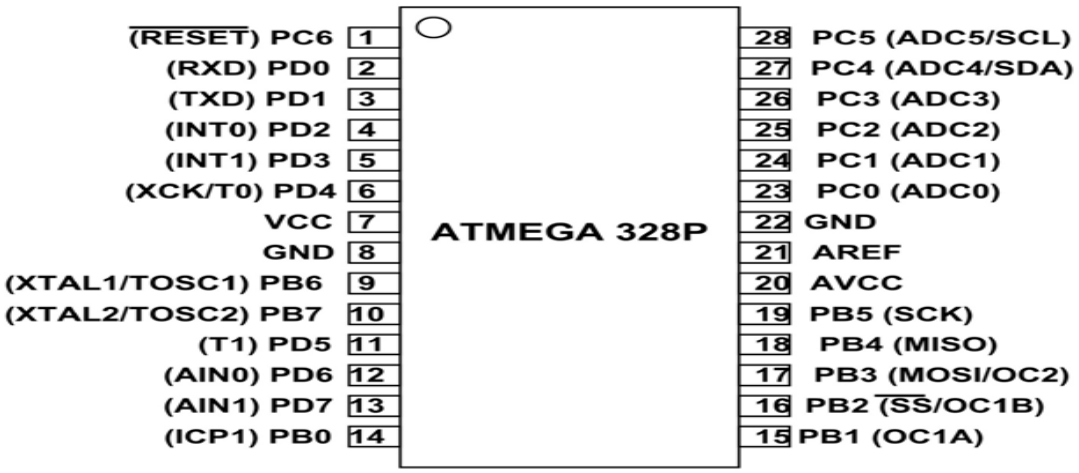



**Figure III.3 :** Brochage ATMega328P.

ATMEGA328P est une puce à 28 broches comme indiqué dans le diagramme de broches ci-dessus. De nombreuses broches de la puce ont ici plus d'une fonction.

Broches : 7, 8, 22

7: VCC : Tension d'alimentation numérique, (on peut utiliser de 6v au minimum jusqu'à 20v max).

8, 22 : GND : terre.

Broches : 14, 15, 16, 17, 18, 19, 9 et 10 : port B : sont des ports de 8bit bidirectionnel (in/out).

Vous trouverez ci-dessous le mappage des broches entre Arduino Uno et la puce ATmega328P [32].

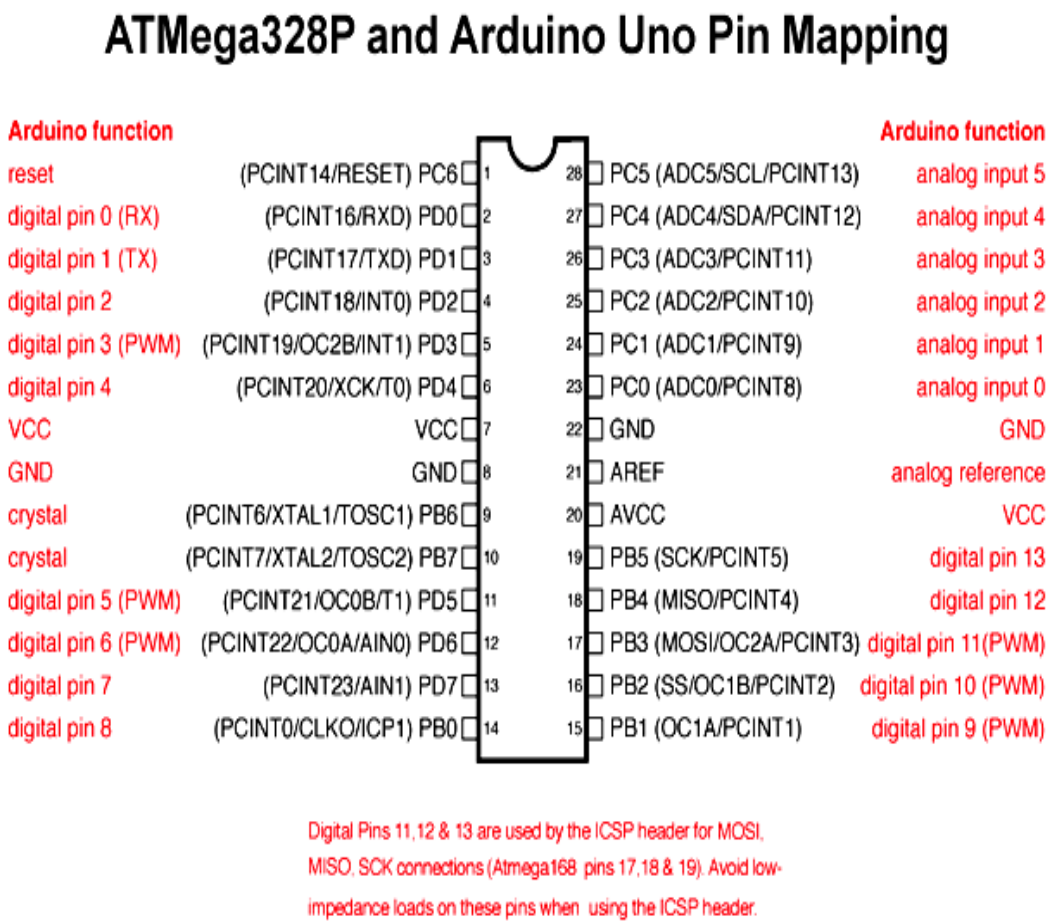



**Figure III.4 :** mappage des broches entre Arduino Uno et la puce ATmega328P [32].

### III.3.1.a.4 La carte Arduino uno

La carte Arduino Uno  dispose :

- De 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)).

- De 6 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques).

- D'une vitesse de l'horloge 16Mhz.

- D'une connexion USB.

- D'un connecteur d'alimentation jack.

- D'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"), et d'un bouton de réinitialisation (reset).

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur, Pour pouvoir l'utiliser et se lancer, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB (ou de l'alimenter avec un adaptateur secteur ou une pile, mais ceci n'est pas indispensable, l'alimentation étant fournie par le port USB).

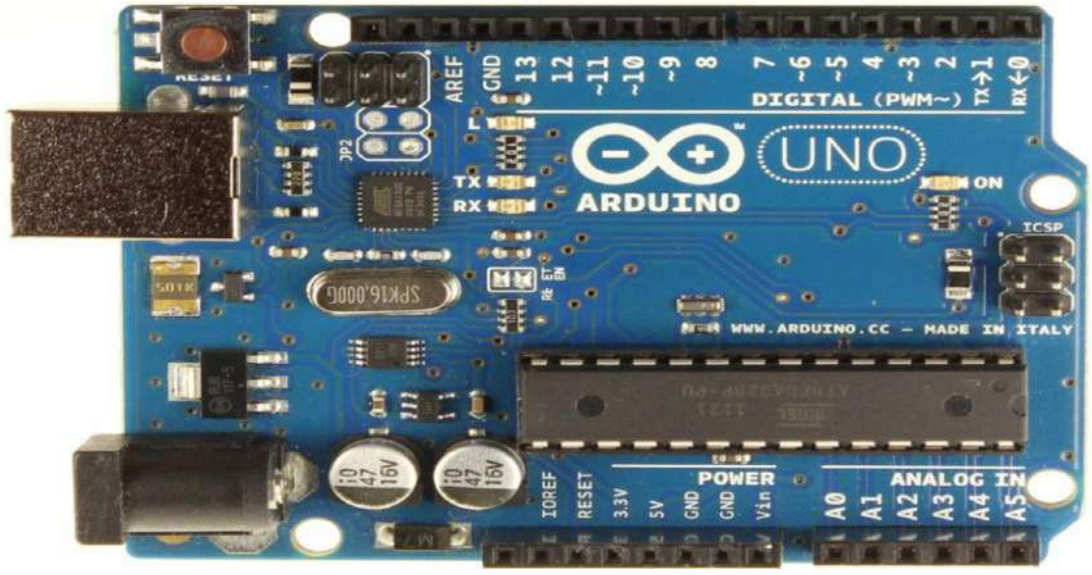



**Figure III.5:** Une carte Arduino Uno.

Source : ARDUINO.CC

- **Alimentation d'une carte Arduino**

  On a :

  -Un port USB type B mini pour le transport des données et pour l'alimentation électrique.

  -Régulateur de tension 5 V. est responsable de la conversion de la tension d'entrée par le bouchon 3, une tension de 5 V régulé. Nécessaire pour le fonctionnement de la plaque et pour alimenter les circuits externes

  - Connecteur d'alimentation de l'arduino (si besoin) 9 à 12V connecteur 2.1 mm avec le + au centre courant continu (DC).

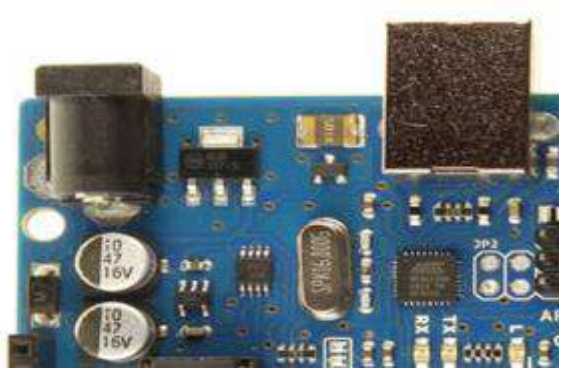


**Figure III.6 :** L'alimentation du carte Arduino Uno.

- **Entrées analogiques**

Le second connecteur du bas comporte les légendes A0 à A5. Ces broches d'entrée permettent de mesurer une tension pour pouvoir en utiliser les valeurs dans les programmes. Précisons que les broches servent à mesurer une tension et non un courant.

Le circuit d'entrée auquel chacune des broches donne accès possède une résistance interne (impédance) très importante, ce qui fait que le courant passant par la broche est toujours très faible. Ces entrées sont désignées comme étant de type analogique, et elles le sont par défaut, mais on peut également les exploiter en tant qu'entrées numériques ou même comme sorties numériques [33].

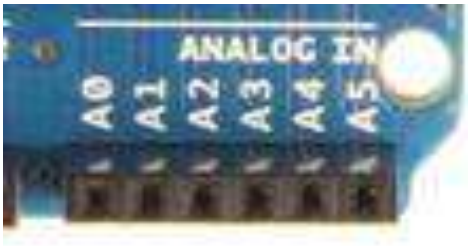



**Figure III.7:** Les entrées analogiques

- **Connexions numériques**

Passons maintenant aux deux connecteurs du haut de la carte, et commençons par celui de droite. Les légendes désignent des entrées numériques de 0 à 13 en partant de la droite (Digital). Ces broches peuvent servir d'entrées ou de sorties.

Lorsqu'on les utilisé en tant que sorties, elles se comportent comme les broches de source de tension présentées plus haut, sauf qu'elles fonctionnent toutes en 5 V et qu'elles peuvent être activées et désactivées depuis un programme. Si on active une de ces broches, la tension présente sera à 5 V. Si on désactive la broche, la tension sera à 0 V. Comme pour les broches de tension, il faut veiller à ne jamais dépasser le courant maximal qu'elles peuvent supporter. Les deux premières broches à droite (0 et 1) portent une légende supplémentaire (RX et TX) pour la transmission et la réception. Ces deux broches sont réservées à la communication ; elles sont, d'une façon indirecte, les connexions en émission et en réception de la connexion USB vers votre ordinateur.

Toutes les broches numériques peuvent supporter jusqu'à 40 mA/5V. C'est largement suffisant pour alimenter une LED standard, mais assurément pas pour alimenter directement un moteur électrique.




**Figure III.8:** Les entrées numériques.

### III.3.1.b L’horloge en temps réel

#### III.3.1.b.1 Définition

Les horloges en temps réel (RTC), comme son nom l'indique, sont des modules d'horloge. Le CI d'horloge en temps réel (RTC) DS1307 est un dispositif à 8 broches utilisant une interface I2C. Le DS1307 est une horloge / calendrier basse consommation avec 56 octets de mémoire SRAM de secours. L'horloge / calendrier fournit des données qualifiées pour les secondes, les minutes, les heures, le jour, la date, le mois et l'année. La date de fin de chaque mois est automatiquement ajustée, en particulier pour les mois de moins de 31 jours [34].

Le principal avantage du RTC est qu'il dispose d'un système de batterie de secours qui maintient l'horloge / calendrier en marche même en cas de panne de courant. Un courant exceptionnellement faible est nécessaire pour maintenir le RTC animé. Nous pouvons trouver ces RTC dans de nombreuses applications comme les systèmes embarqués et les cartes mères d'ordinateurs, etc.

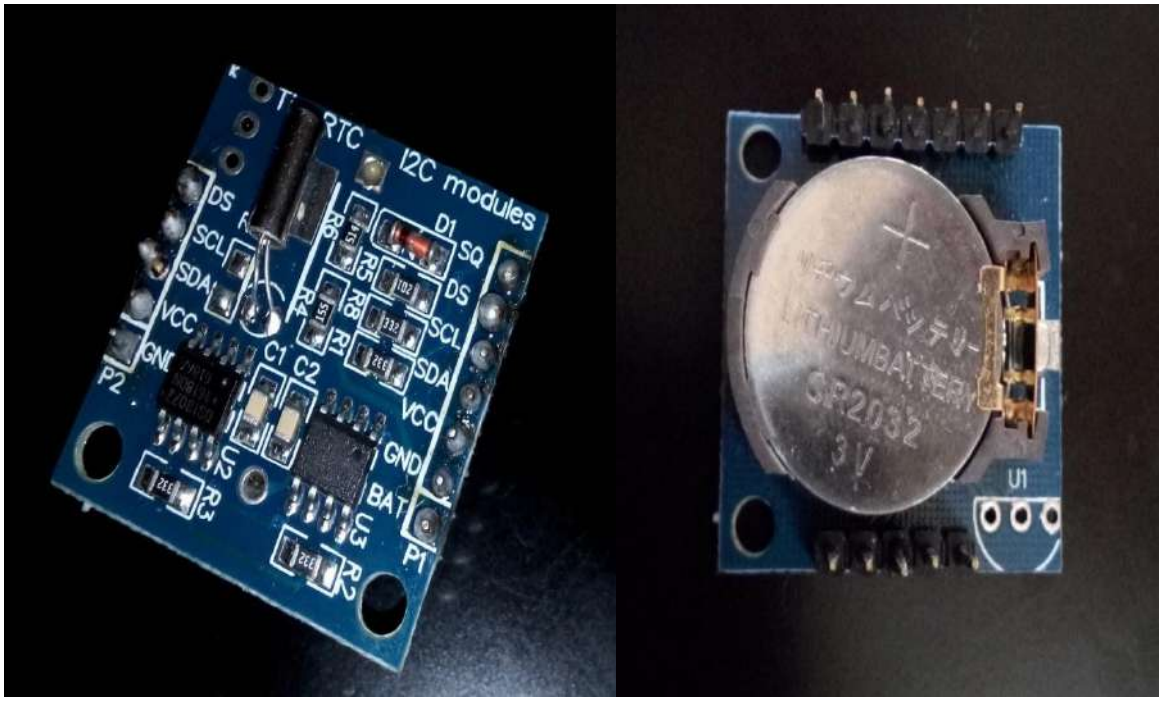



**Figure III.9:** Module RTC DS1307.

### III.3.1.a.2 Description des broches du DS1307

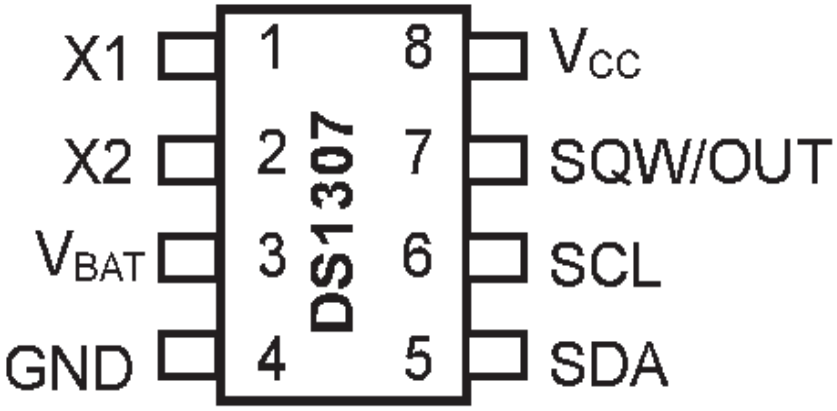



**Figure III.10:** Les broches du module RTC DS1307.

- **Broche 1, 2:** Connexions pour cristal de quartz standard 32,768 kHz. Le circuit d'oscillateur interne est destiné à fonctionner avec un cristal ayant une capacité de charge spécifiée de 12,5 pF. X1 est l'entrée de l'oscillateur et peut également être connecté à un oscillateur externe de 32,768 kHz. La sortie de l'oscillateur interne, X2 est dérivée si un oscillateur externe est connecté à X1.
- **Broche 3 :** entrée de batterie pour toute cellule au lithium 3 V standard ou autres sources d'énergie. La tension de la batterie doit être comprise entre 2 V et 3,5 V pour un fonctionnement approprié. La tension nominale du point de déclenchement de la protection en écriture à laquelle l'accès au RTC et à la RAM utilisateur est refusé est définie par le circuit interne à 1,25 x VBAT nominal. Une batterie au lithium de 48 mAh ou plus sauvegardera le DS1307 pendant plus de 10 ans en l'absence d'alimentation à 25 ° C. Reconnu UL pour assurer contre le courant de charge inverse lorsqu'il est utilisé dans le cadre d'une conjonction avec une batterie au lithium.
- **Broche 4:** masse.
- **Broche 5**: entrée / sortie de données série. L'entrée / sortie de l'interface série I2C est le SDA, qui est un drain ouvert et nécessite une résistance de rappel vers le haut, permettant une tension de rappel jusqu'à 5,5 V. Indépendamment de la tension sur VCC.

- **Broche 6:** entrée d'horloge série. Il s'agit de l'entrée d'horloge de l'interface I2C et est utilisé dans la synchronisation des données.
- **Broche 7:** onde carrée / pilote de sortie. Lorsqu'elle est activée, le bit SQWE est réglé sur 1, la broche SQW / OUT émet l'une des quatre fréquences d'onde carrée (1 Hz, 4 kHz, 8 kHz et 32 kHz). Il s'agit également d'un drain ouvert et nécessite une résistance de rappel externe. Il nécessite l'application de Vcc ou de Vb à pour faire fonctionner SQW / OUT, avec une tension de rappel admissible de 5,5 V et peut être laissé flottant s'il n'est pas utilisé.
- **Broche 8:** alimentation principale. Lorsque la tension est appliquée dans les limites normales, l'appareil est entièrement accessible et les données peuvent être écrites et lues. Lorsqu'une alimentation de secours est connectée à l'appareil et que VCC est inférieur à VTP, la lecture et l'écriture sont interdites. Cependant, à basse tension, la fonction d'indication de l'heure fonctionne toujours.

**III.3.1.b.3 Les caractéristiques du DS1307**

-Signal de sortie d'onde carrée programmable.

-Circuit automatique de détection et de commutation de panne de courant.

-Consomme moins de 500 nA en mode batterie de secours avec l'oscillateur en marche.

-Disponible en DIP ou SOIC 8 broches.

-Reconnu par Underwriters Laboratory (UL).

-L'horloge en temps réel (RTC) compte les secondes, les minutes, les heures, la date du mois, le mois, le jour de la semaine et l'année avec une compensation pour les années bissextiles valable jusqu'à 2100.

-RAM non volatile de 56 octets pour le stockage de données.

-Interface à deux fils (I2C).

**III.3.1.c L’environnement de la programmation**

Le logiciel de programmation de la carte Arduino sert d'éditeur de code (langage proche du C). Une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte au travers de la liaison USB. Le câble USB alimente à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information CE programme appelé IDE Arduino [35].

- **Structure générale du programme (IDE Arduino**)

  Comme n'importe quel langage de programmation, une interface souple et simple est exécutable sur n'importe quel système d'exploitation Arduino basé sur la programmation en C.

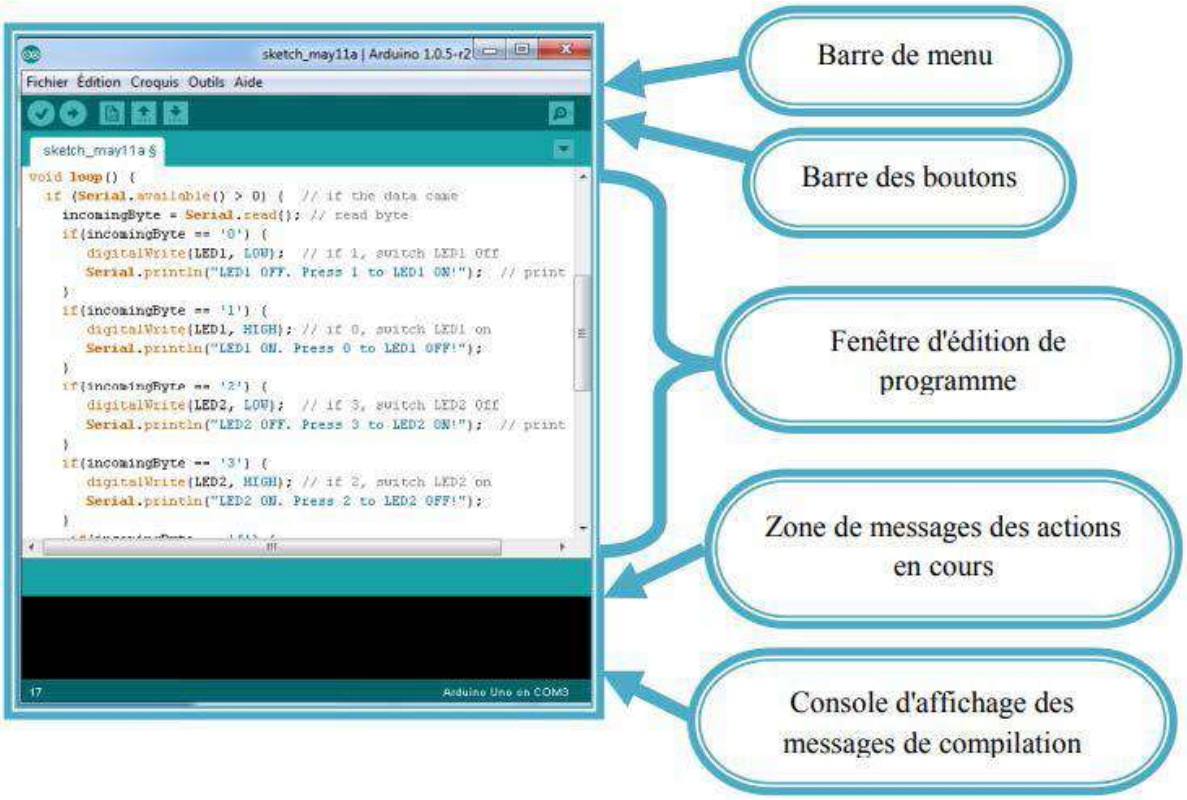



**Figure III.11:** Interface IDE Arduino.

- **Les étapes de téléchargement du programme** [35]

Une simple manipulation enchaînée doit être suivie afin d'injecter un code vers la carte Arduino via le port USB.

1. On conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel IDE Arduino.

2. On vérifie ce programme avec le logiciel Arduino (compilation).

3. Si des erreurs sont signalées, on modifie le programme.

4. On charge le programme sur la carte.

5. On câble le montage électronique.

6. L'exécution du programme est automatique après quelques secondes.

7. On alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation autonome (pile 9 volts par exemple).

8. On vérifie que notre montage fonctionne.

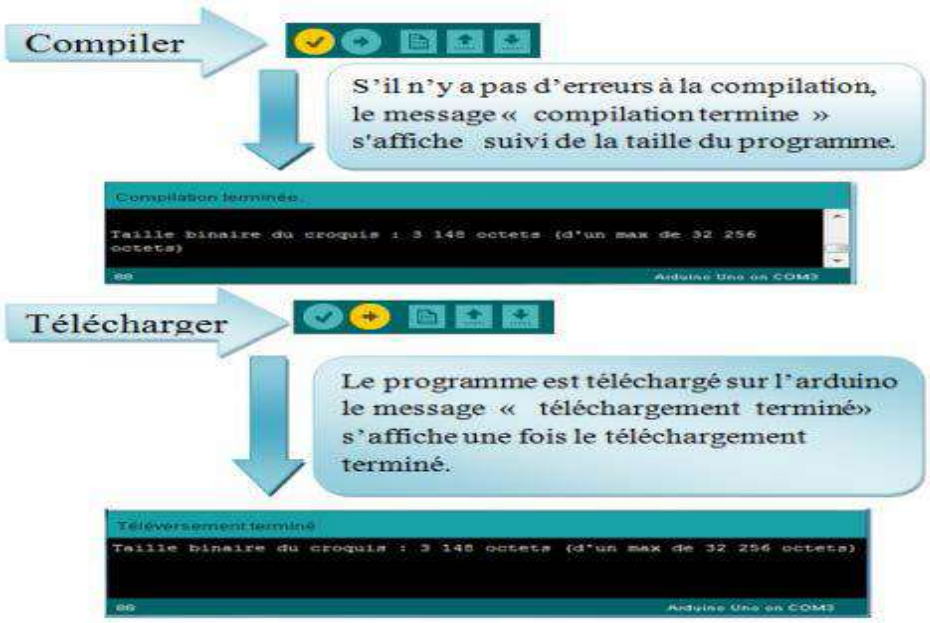



**Figure III.12:** Les étapes de téléchargement du code.

### III.3.2 Le bloc puissance

Le bloc puissance de notre système inclure de 3 composants sont : un servomoteur, un miroir et un panneau solaire

### III.3.2.a Le servomoteur

#### III.3.2.a.1 Définition

Un servomoteur est un type de moteur particulier. Sa fonction principale consiste à assurer la production d'un mouvement afin de répondre à une commande externe. Comme l'étymologie du terme le laisse deviner (""servomoteur"" vient du latin ""servus"", ""esclave""), le servomoteur désigne simultanément un système asservi et un actionneur utilisé pour le déclenchement d'une action [36].

Il embarque dans le même boîtier l'électronique et la mécanique. Un servomoteur est capable de maintenir une position prédéterminée dans les instructions.




**Figure III.13:** Servomoteur.

### III.3.2.a.2 Les composants d'un servomoteur

Un servomoteur est un ensemble mécanique et électronique comprenant [37] :

-Un moteur à courant continu

-Un réducteur en sortie de ce moteur diminuant la vitesse mais augmentant le couple

-Un potentiomètre (faisant fonction de diviseur résistif) qui génère une tension variable, proportionnelle à l'angle de l'axe de sortie

-Un dispositif électronique d'asservissement

-Un axe dépassant hors du boîtier avec différents bras ou roues de fixation.

Il est commandé par l'intermédiaire d'un câble électrique à trois fils :

Masse : Noir ou Marron

5V : Rouge

Signal : Jaune ou Blanc ou Bleu

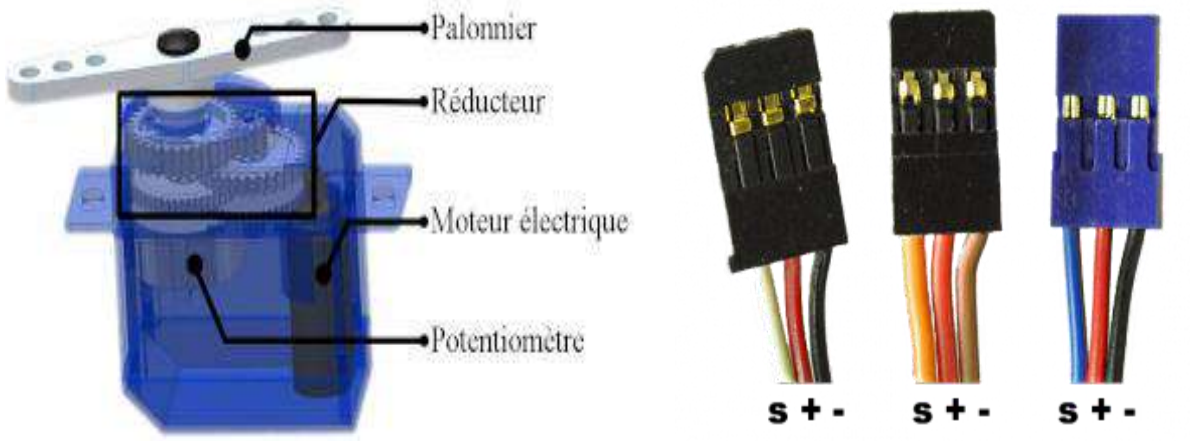



**Figure III.14:** Les composants du servomoteur [38].

### III.3.2.a.3 Principe de fonctionnement d'un servomoteur

La partie électrique d'un servomoteur ne dispose que de 3 fils codés par couleur, pour des servomoteurs type modélisme, et 5 fils pour des servomoteurs de grosse puissance, qui permettent d'alimenter le moteur et de lui transmettre des ordres de positions sous forme d'un signal codé en largeur d'impulsion plus communément appelés PWM ou RCO (Rapport Cyclique d'Ouverture). Cela signifie que c'est la durée des impulsions qui détermine l'angle absolu de l'axe de sortie et donc la position du bras de commande du servomoteur. Le signal est répété périodiquement, en général toutes les 20 millisecondes, ce qui permet à l'électronique de contrôler et de corriger continuellement la position angulaire de l'axe de sortie, cette dernière étant mesurée par le potentiomètre [38].

Lorsque le moteur tourne, l'axe du servomoteur change de position, ce qui modifie la résistance du potentiomètre. Le rôle de l'électronique est de commander le moteur pour que la position de l'axe de sortie soit conforme à la consigne reçue : c'est un asservissement.

### III.3.2.a.4. Les type de servomoteur

Il existe 3 catégories du servomoteur sont :

- **Servomoteur standard** déplacement de 0° A 180°.

- **Servomoteur a rotation continu** la différence entre ce type et le servomoteur standard c'est : le servomoteur à rotation continue tourne comme un motoréducteur à courant continu (c'est l'impulsion de commande qui définit le sens et la vitesse de rotation).
- **Servomoteur analogique avec signal de feedback** un signal analogique dépendant de la position du servomoteur permet de connaître la position réelle de celui-ci. Ce signal permet d'améliorer la précision et la stabilité.

### III.3.2.b Les miroirs

Les miroirs sont recouverts d'un matériau ayant une réflectivité minimale de 90% et doivent être supportés par une tige montée sur le cadre de support avec des roulements des deux côtés pour tourner librement en fonction des angles de rotation des moteurs.



**Figure III.15:** Un miroir.

### III.3.2.c Les cellules photovoltaïques

- Les technologies de cellules seront différentes Suivant le système utilisé. Pour une basse concentration (augmenter le rendement à moindre coût) utilise des cellules « classique » en silicium poly-cristallin ou monocristallin. Les cellules ont un rendement situé seulement entre 10 et 14% pour une cellule poly-cristalline ou encore entre 11% et 16% pour du monocristallin. Alors que la haute et moyenne concentration utilise des cellules plus performantes de types composées III-V.

Ces cellules sont beaucoup plus performantes et donc adaptées à la haute concentration (système plus coûteux mais très performant).

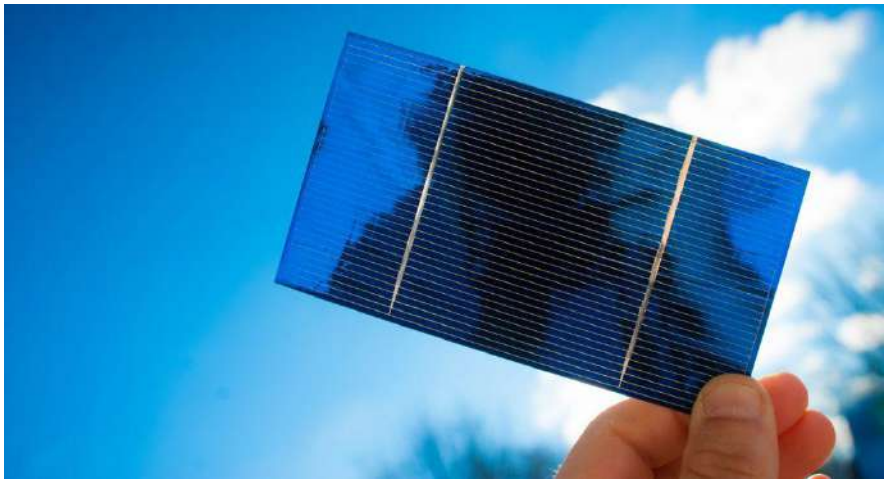


**Figure III.16:** cellule photovoltaïque.

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents composants d'un condensateur solaire, débutant du contrôleur Arduino jusqu'au le récepteur qui est une cellule photovoltaïque, qui nous faut comprendre pour assurer le bon fonctionnement de notre système.

# *Chapitre IV*

## Conception et réalisation et résultats

## IV.1 Introduction

Un concentrateur linéaire de Fresnel est une installation solaire basée sur le principe de la rotation des miroirs de Fresnel pour suivre le soleil sur sa trajectoire et focaliser du rayonnement solaire sur un récepteur thermodynamique ou photovoltaïque.

Après avoir présenté des différents composants de notre système, nous présenterons étape par étape la partie la plus importante de notre mémoire qui est la conception et la réalisation du système.

Notre réalisation se décompose en trois parties principales :

• Partie programmation.

• Partie mécanique.

• Partie électrique.

## IV.2 Cahier de charge

Nous allons réaliser un concentrateur solaire de type Fresnel contrôlé par un Arduino Uno, et nous utiliserons la méthode de suivi avec les équations qui utilisent le rapport entre la latitude du lieu et la date et l'heure du jour à l'aide du DS1307.

Les six miroirs sont tournés dans un axe par 6 servomoteurs chacun. Des Minis servomoteurs *9G SG-90* pour actionner l'axe de l'azimut à l'angle calculé toutes les 5 minutes et ainsi déplacer les miroirs à un angle qui reflète les rayons du soleil vers le panneau solaire installé au-dessus des miroirs.

## IV.3 Principe de fonctionnement d'un concentrateur de type Fresnel

Son principe de fonctionnement est de s'orienter les miroirs vers le Soleil tout au long de la journée et réfléchissez les rayons vers le panneau solaire, ce qui a pour effet d'augmenter la production d'énergie de manière substantielle, En effet, la position du soleil varie constamment, à la fois pendant la journée, mais aussi pendant les différentes périodes de l'année.

L'idée derrière est que le surplus d'énergie produite grâce à la meilleure concentration du rayonnement sur le panneau sera plus important que l'énergie perdue pour orienter les miroirs de manière optimale. En effet, un concentrateur photovoltaïque de type Fresnel peut augmenter le rendement des panneaux solaires jusqu'a 40% par rapport à une installation fixe d'un panneau orientée plein Sud.

Suivre le soleil peut se faire sur deux axes : en azimut d'est en ouest, à mesure de l'avancée de la journée et en hauteur selon la saison et l'avancée de la journée aussi. Dans notre cas nous avons  suivrons le soleil sur le premier axe d'est en ouest seulement.

Dans notre étude, nous présentons un système de concentration solaire de type Fresnel où la partie mécanique a été calculée et vérifiée pour assurer une transmission d'une faible puissance motrice via des mécanismes de réduction appropriés.

Pour cela nous avons dû prendre en compte la zone géographique dans laquelle nous travaillions et dans laquelle les expériences ont été menées, et ses coordonnées, nous avons pris la ville de MEDEA comme lieu pour placer notre système.




**Figure IV.1**: Les coordonnées géographiques de site MEDEA.

## IV.4 Partie programmation

### IV.4.1 L'organigramme

Avant de passer à la programmation, nous devons réaliser un organigramme qui explique le déroulement des différentes séquences, tant intérieures qu'extérieures, il comportera plusieurs boucles dont la fin d'exécution succède toujours à son commencement.

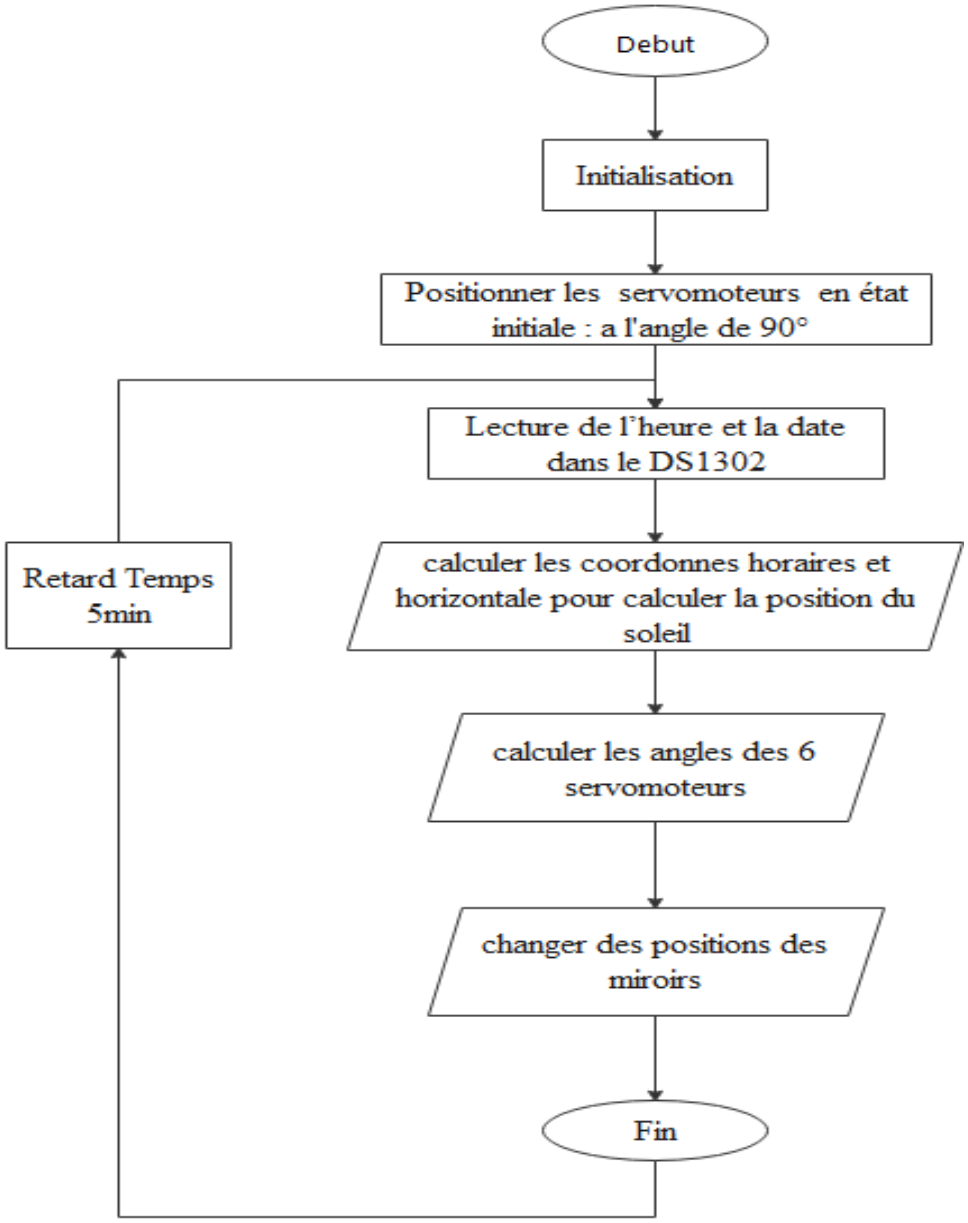



**Figure IV.2**: Organigramme d'un concentrateur de type Fresnel application aux panneaux solaires photovoltaïques

### IV.4.2 Programmation

La carte Arduino uno est une carte programmable, elle peut être programmée avec le logiciel Arduino représenté dans la figure (IV.3).

Nous avons préféré de photographier l'interface du logiciel Arduino dans laquelle nous avons simulé notre programme.

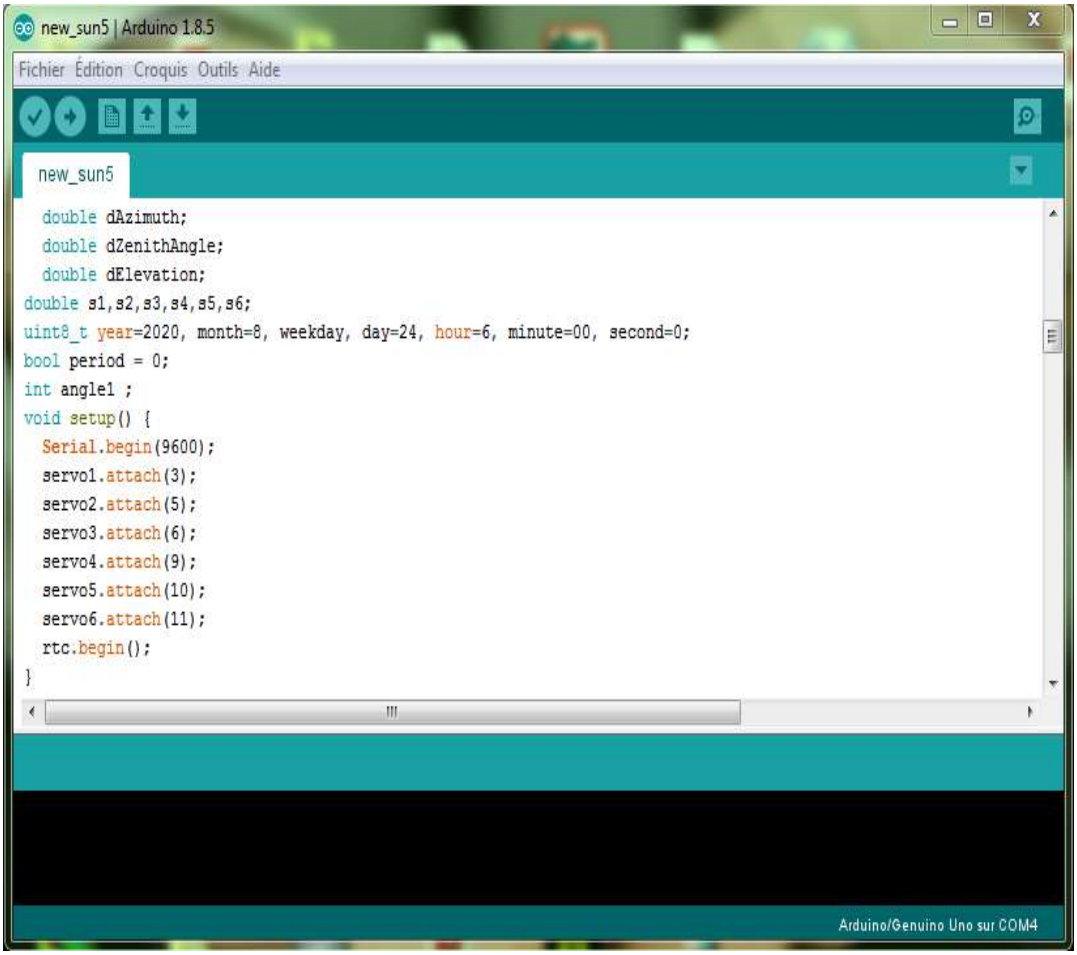



**Figure IV.3**: interface du logiciel Arduino

Pour écrire un programme du notre système, nous avons commencé étape par étape.

- La première étape a été d'écrire du code pour régler le module RTC DS1307.
- Deuxièmement, écrire du code pour programmer le servomoteur, dont l'un est alors les six servomoteurs ensemble.
- La troisième étape consistait à écrire les équations nécessaires pour calculer la position du soleil et les angles des miroirs en fonction de celui-ci.
- La dernière étape consistait à rédiger un programme final complet pour les étapes précédentes.

## IV.5 Partie mécanique

La base de cette étude tient au fait que la course du soleil est connue et qu'à tout moment de la journée on connaît la position du soleil par rapport à un endroit particulier, contrairement à ce que l'on trouve dans de nombreuses publications, le suivi du soleil ne dépendra pas des capteurs de la `` lumière '', mais de la `` relation '' entre la latitude du lieu et la date et l'heure du jour.

Le contrôle mécanique sera effectué par des servomoteurs, chacun portant un miroir.

### IV.5.1 Les composants

Le system mécanique comprend

-6 servomoteurs.

-6 miroirs de 30cm*5cm.

-6 supports pour fixer les miroirs.

-cellule photovoltaïque.

-support de 30cm pour fixer la cellule.

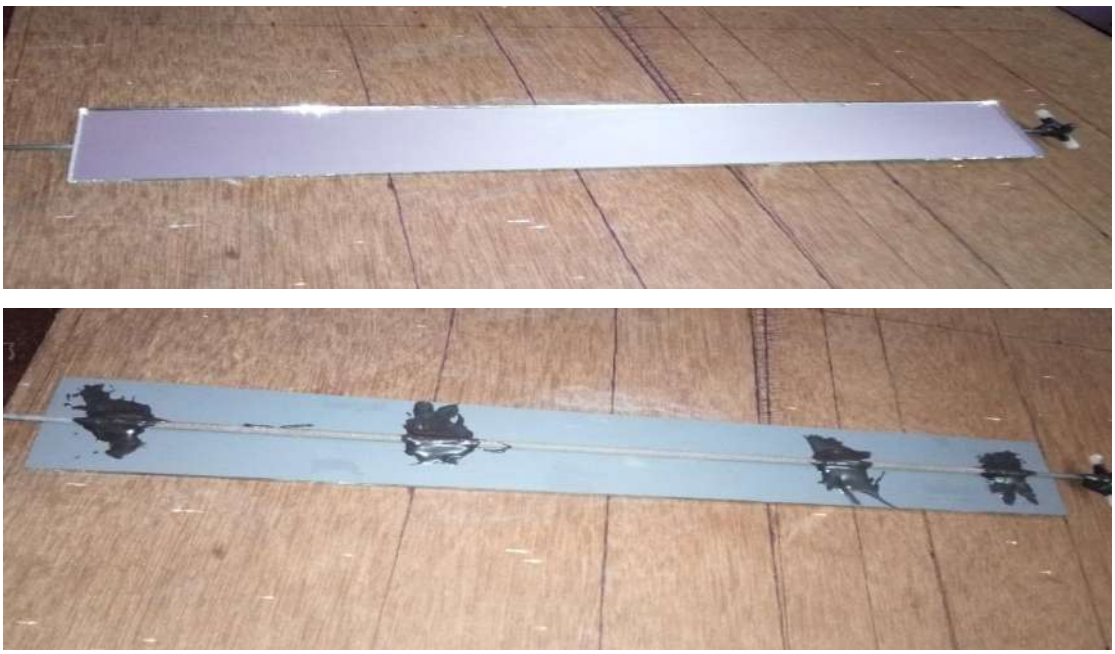


**Figure IV.4**: miroir fixer sur un support métallique.



**Figure IV.5**: Installation des servomoteurs.

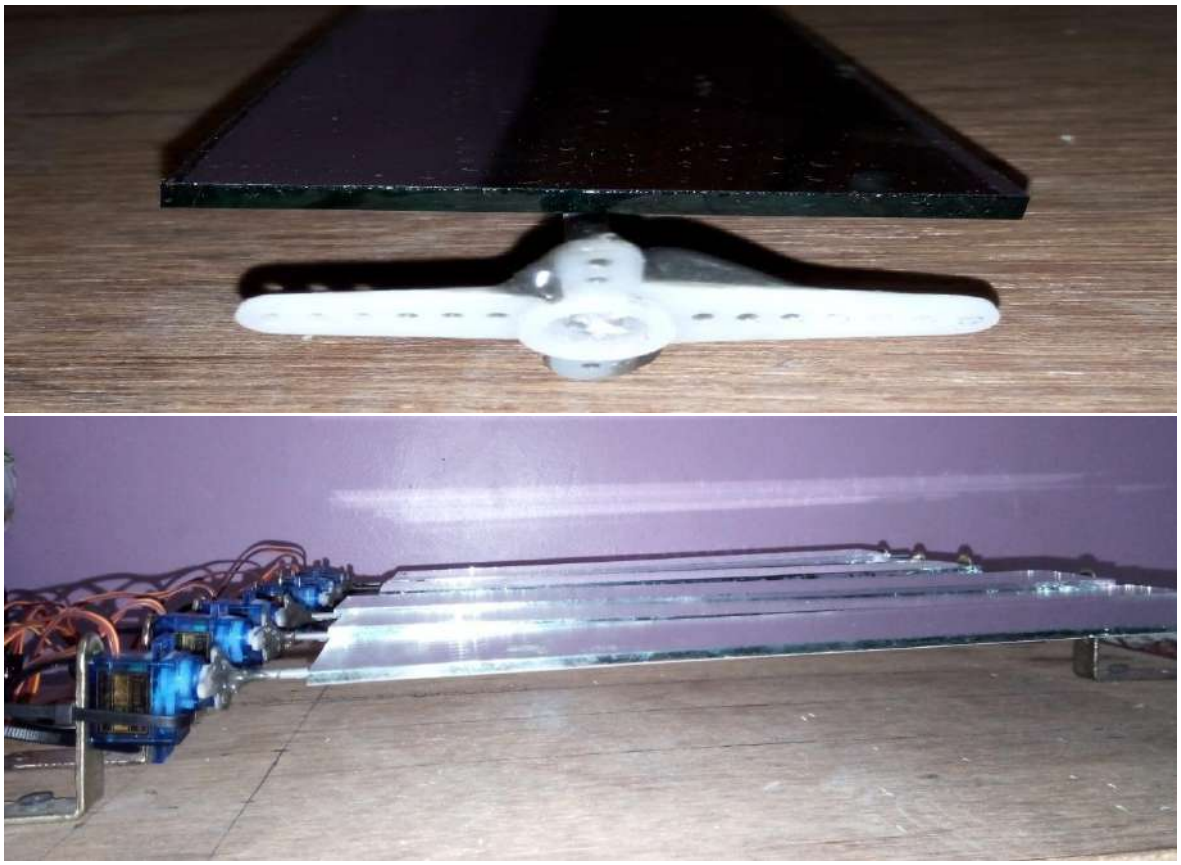


**Figure IV.6**:Connections des miroirs aux servomoteurs.

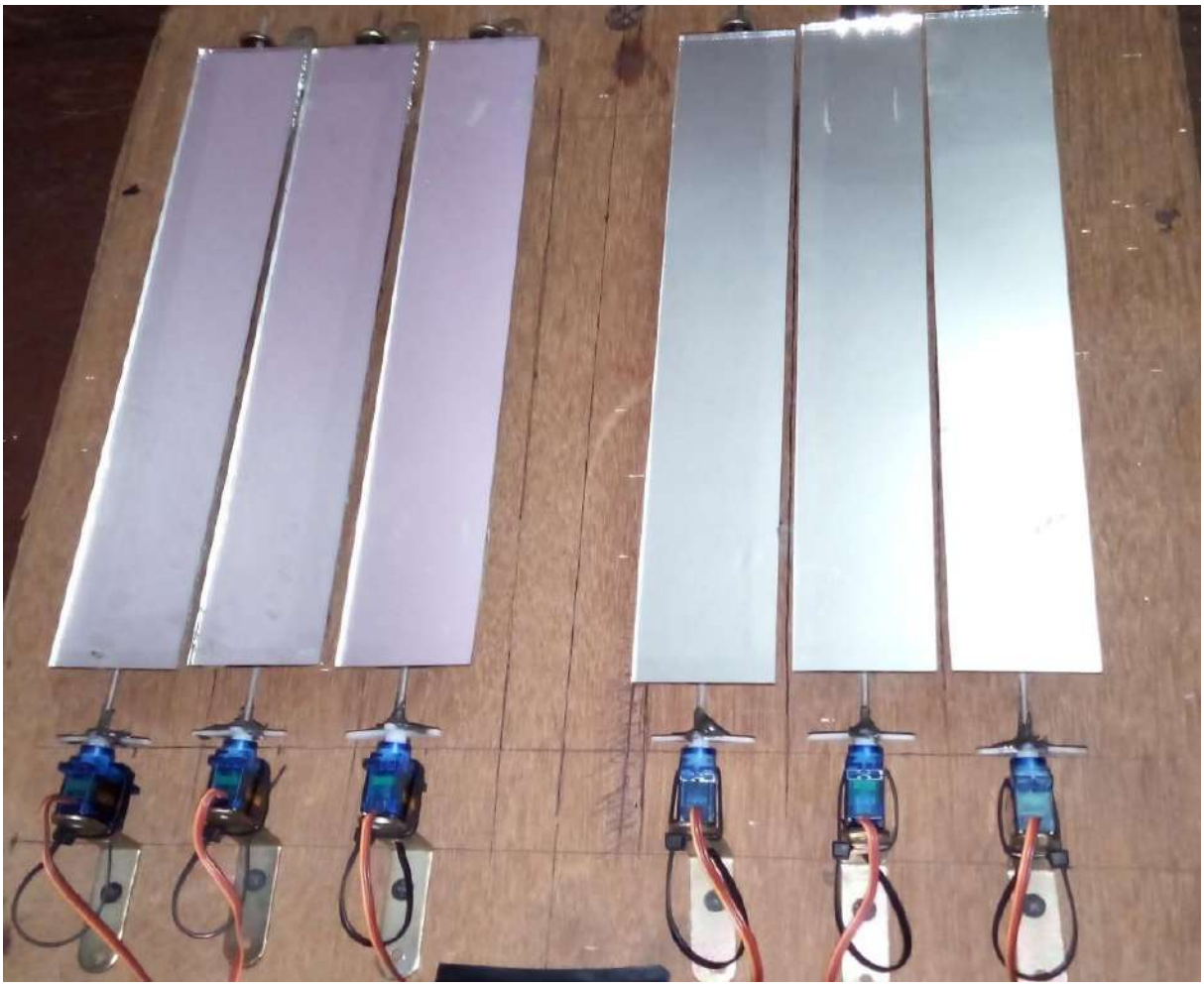


**Figure IV.7**: Vue de dessus de l'installation coté mécanique.

La deuxième partie de la mécanique (installation du panneau solaire) n'a pas été faite en raison du manque de capacités, car le travail a été effectué à la maison loin de l'université et du laboratoire en raison de la propagation de Covid 19, veuillez comprendre.

### IV.5.2 Modélisation mathématique du système

L'angle maximum des réflecteurs et la distance entre le miroir et l'autre sont calculés avec précision, et la distance entre chacun d'eux et le support de plaque a été aussi calculé pour que notre système fonctionne complètement et sans défaut.

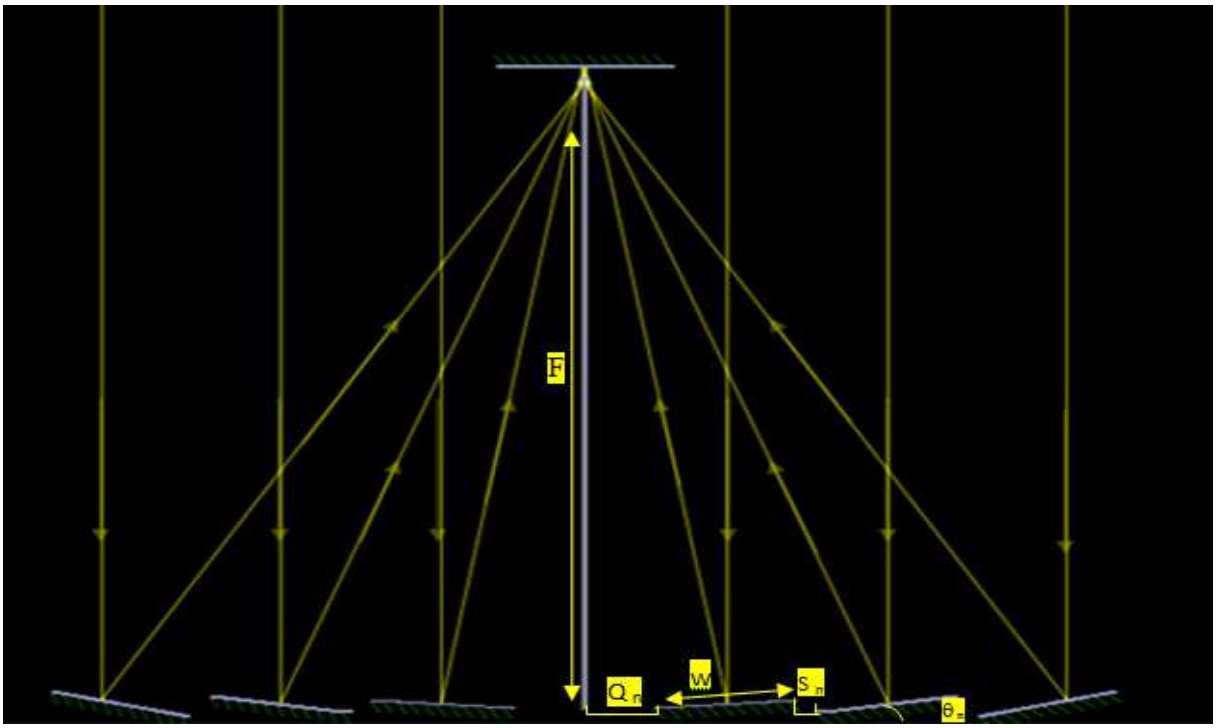



**Figure IV.8**: Schéma d'un concentrateur de type Fresnel (application photovoltaïque).

Chaque miroir est caractérisé par trois paramètres qui sont :

La position ($Q_n$).

L'angle d'inclinaison ($\theta_n$).

Le décalage ($S_n$).

Les expressions suivantes ont été utilisées pour obtenir ces paramètres en utilisant de simples relations d'optiques géométriques.

$$\theta_n = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\frac{Q_n + \left(\frac{w}{2}\right)\cos\left(\theta_n - 1\right)}{f + \left(\frac{w}{2}\right)\sin\left(\theta_n - 1\right)}\right] \quad \text{(IV-1)}$$

$$S_n = w\ \sin\theta_{n-1}\tan\left(2\theta_n + \xi_0\right) \quad \text{(IV-2)}$$

$$Q_n = Q_{n-1} + w\ \cos\theta_{n-1} + S_n \quad \text{(IV-3)}$$

Avec :

W = 50 mm est la largeur des miroirs.

F= 300mm est la distance focale.

$\xi_0$ est la moitié de la distance angulaire du soleil en un point quelconque sur terre.

($\xi_0$ =16'=0.26°).

Les conditions standards :

$Q_0$= -25 mm; $\theta_0$= $0^o$; $S_1$=0 mm;

$S_1$=0 mm; $Q_1$=25 mm;

Les paramètres du notre système en peut les calculer avec 2 méthodes :

- **$1^{er}$ méthode**

Pour déterminer les valeurs constantes de chaque partie de notre système, nous résolvons les équations précédentes au jour où le soleil est au plus petit point de l'année (21-12/a midi).

On a d'après le schéma ci-dessous et d'après ce que nous avons étudié précédemment dans le gisement solaire :

**Les cordonnées du lieu de Médéa**

-Latitude : $\phi$=36,26 N.

-Longitude : $\lambda$=2,74 E..

**La déclinaison** $\delta$= –23,45 (au solstice d'hiver).

**L'angle horaire** $\omega$= 15.(TSV-12) =0 (a midi) (TSV: temps solaire vrais).

**La hauteur angulaire** h=Acos [(sin $\phi$ *sin $\delta$) + (cos $\phi$ *cos $\delta$*cos $\omega$)

H= w.sin$\theta_n$; et $S_n$=H/tan (h) ;

Apres les calcules nous avons extrait le tableau suivant :

h=30,$3^o$ ;

**Tableau IV.1**:paramètres du système étudié calculé théoriquement.

| N° | H n (mm) | S n (mm) | Q n (mm) | θn max (degrés) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,91 | 0 | 25 | 4,7° |
| 2 | 3,92 | 1,4 | 75 | 9,5° |
| 3 | | 4,3 | 125 | 13,5° |
| 1’ | 1,91 | 0 | 25 | -4,7° |
| 2’ | 3,92 | 1,4 | 75 | -9,5° |
| 3’ | | 4,3 | 125 | -13,5° |

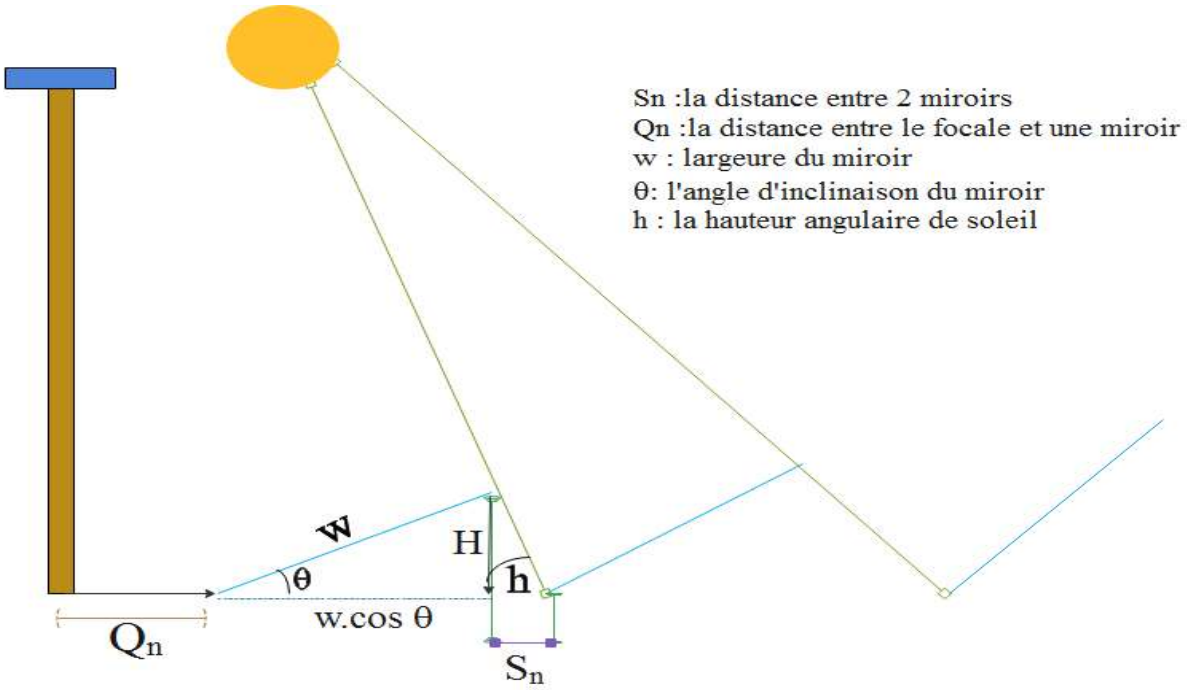



**Figure IV.9**: Schéma d’une partie du concentrateur de type Fresnel (application photovoltaïque).

**2eme méthode**

Calcules directes avec l'EXCEL par les équations précédentes des paramètres des miroirs :

**Tableau IV.2**:paramètres du système étudié calculé avec l'EXCEL.

| $N^o$ | $S_n$ (mm) | $Q_n$ (mm) | $\theta_{n\,max}$ (degrés) |
|---|---|---|---|
| 1 ; 4 | 0 | 25 | (+,-) $4,7^o$ |
| 2 ; 5 | 1,4 | 75 | (+,-) $9,5^o$ |
| 3 ; 6 | 4,3 | 125 | (+,-) $13,5^o$ |

## IV.6 Partie électrique/électronique

L'électronique sera constituée par microcontrôleur Arduino UNO, assisté par un module RTC DS1307 gérant la date et l'heure.

### IV.6.1 Les composants

-Carte Arduino uno.

-Module RTC DS1307.

-Alimentation (5V/1A).

-cellule photovoltaïque.

- Un PC avec port USB pour la programmation.

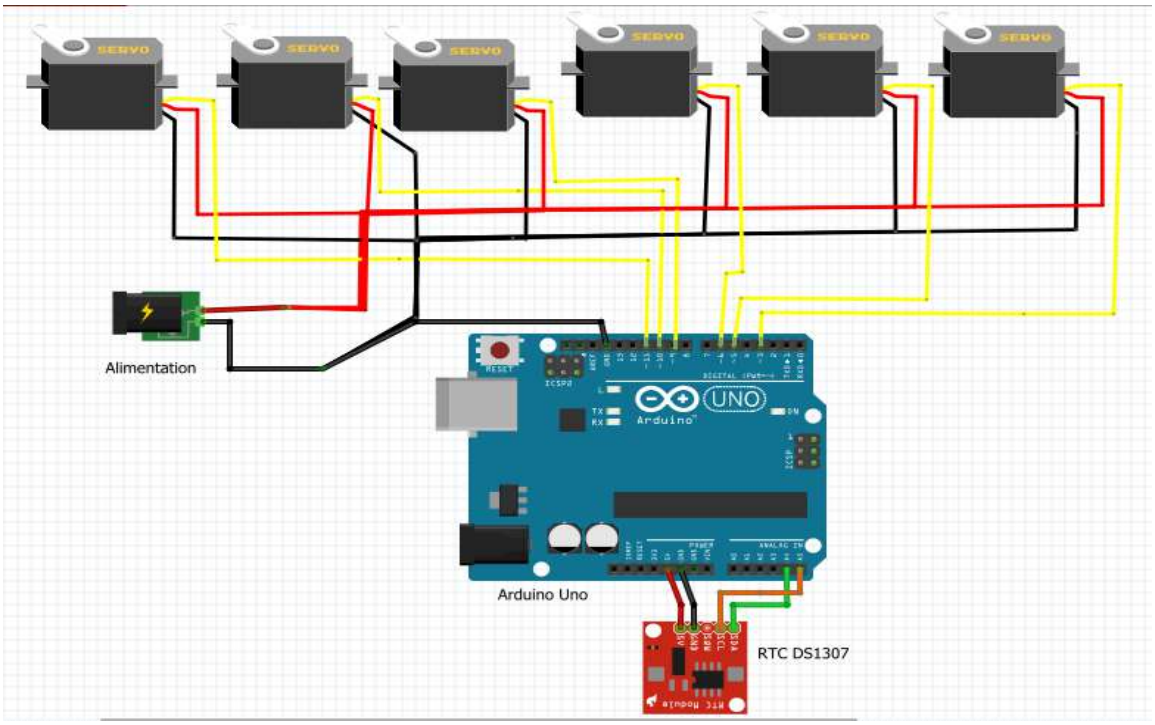



**Figure IV.10**: Schéma de bronchement de la partie électronique du notre système.

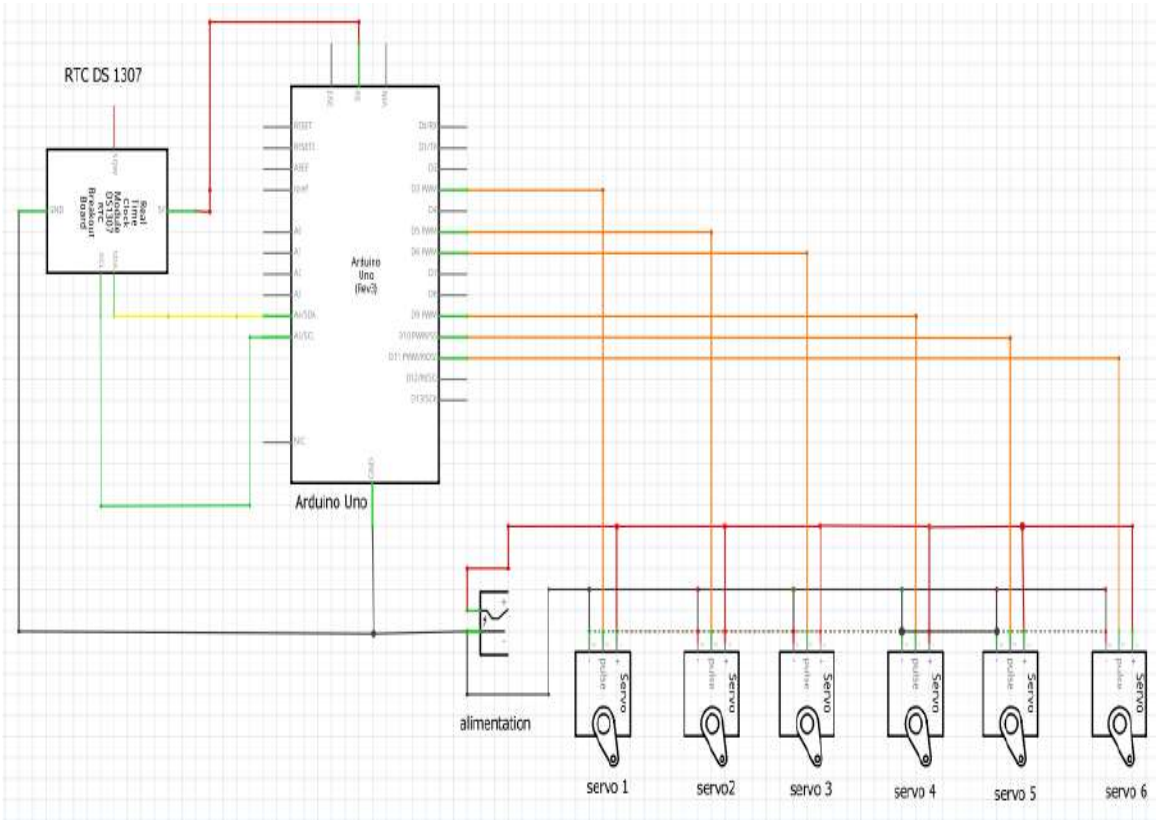
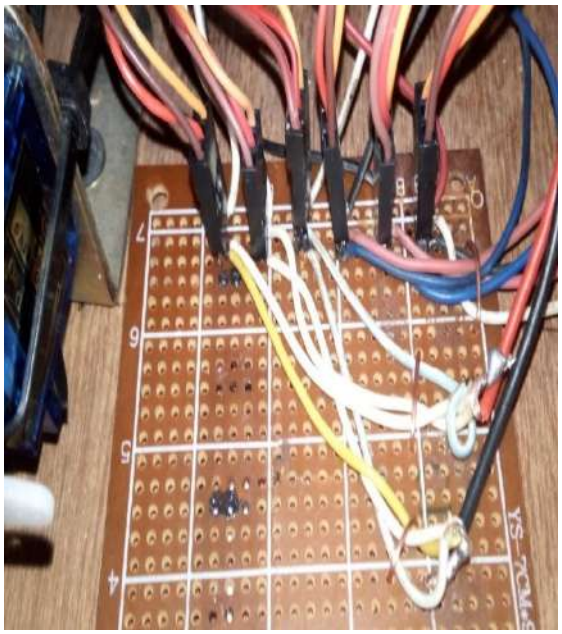
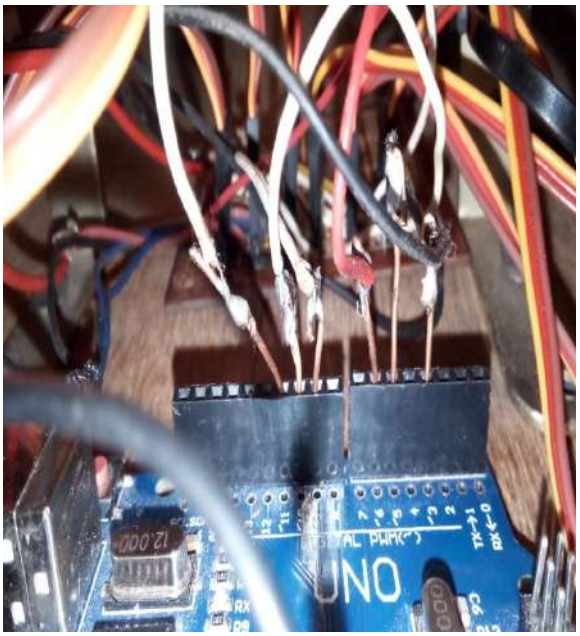



**Figure IV.11**: Schéma électrique du système.

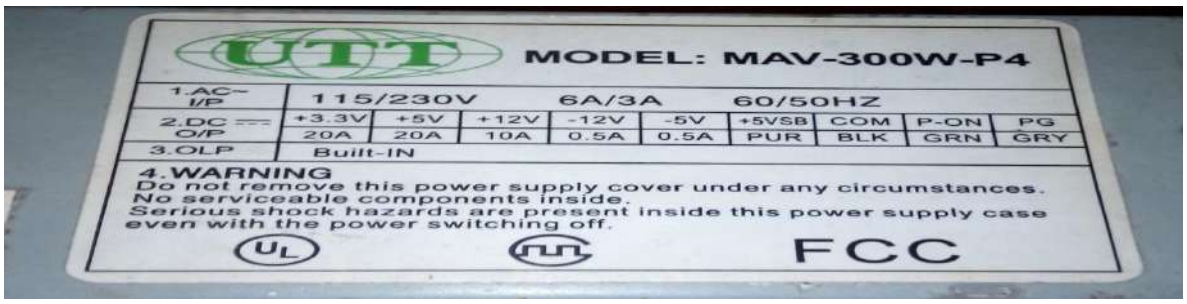
On a utilisé  des supports  pour faciliter le montage ou démontage des servomoteurs, en cas de changement.



**A:** branchement



**B:** branchement Arduino




**C:** Alimentation



**D:** Photo du haut pour le montage

**Figure IV.12**:Photos réels  branchement électrique du système.

## IV.7 Réalisation et résultats

### IV.7.1 réalisation

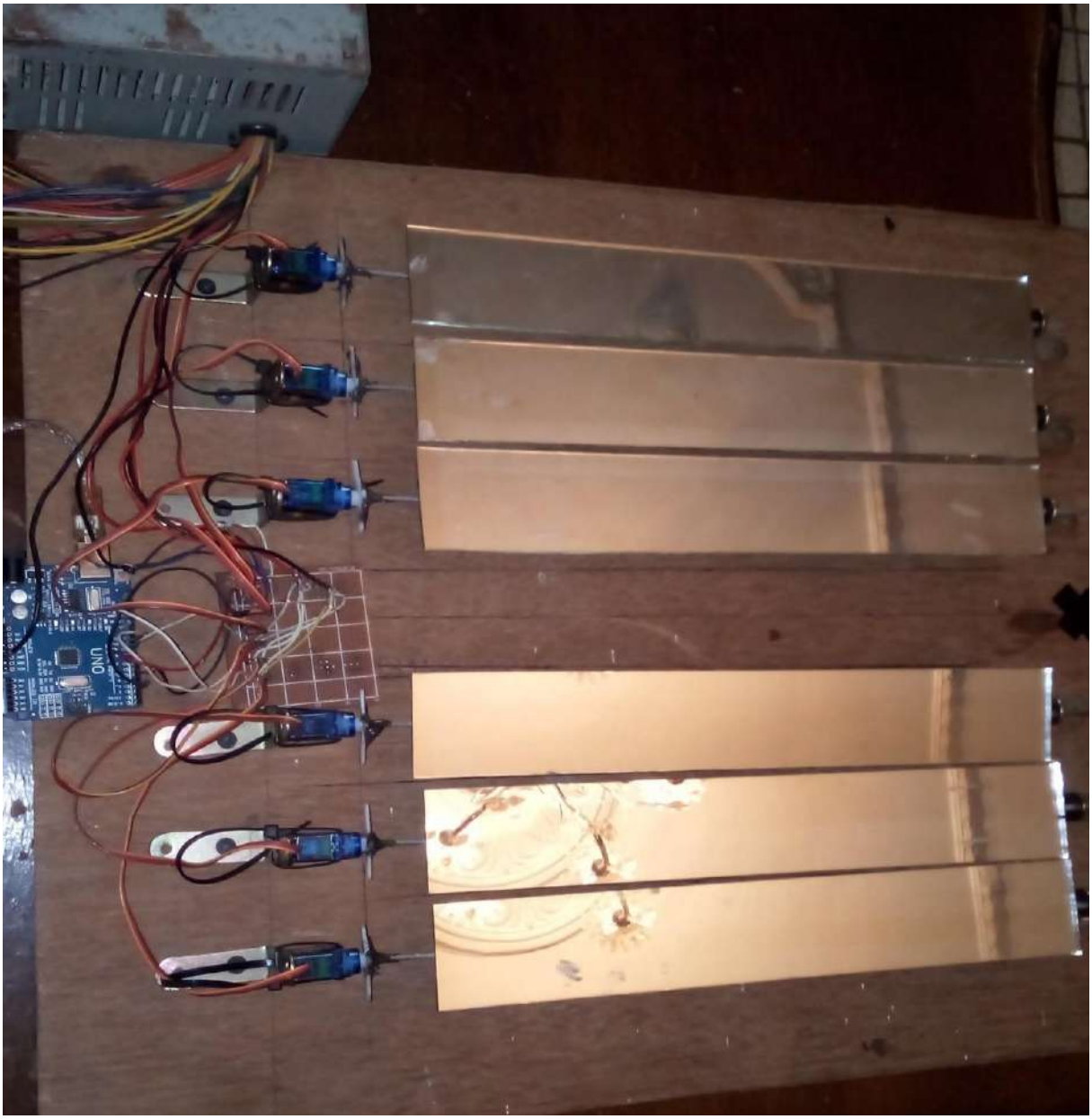



**Figure IV.13**:Photos réels  branchement électrique du système.

Apres le lancement du programme on a obtenu les résultats suivants :

Nous avons pris des captures d'écran pour calculer la position du soleil et les angles des réflecteurs à 5 fois dans la journée.

Le jour où les calculs sont effectués est le 20/09/2020.

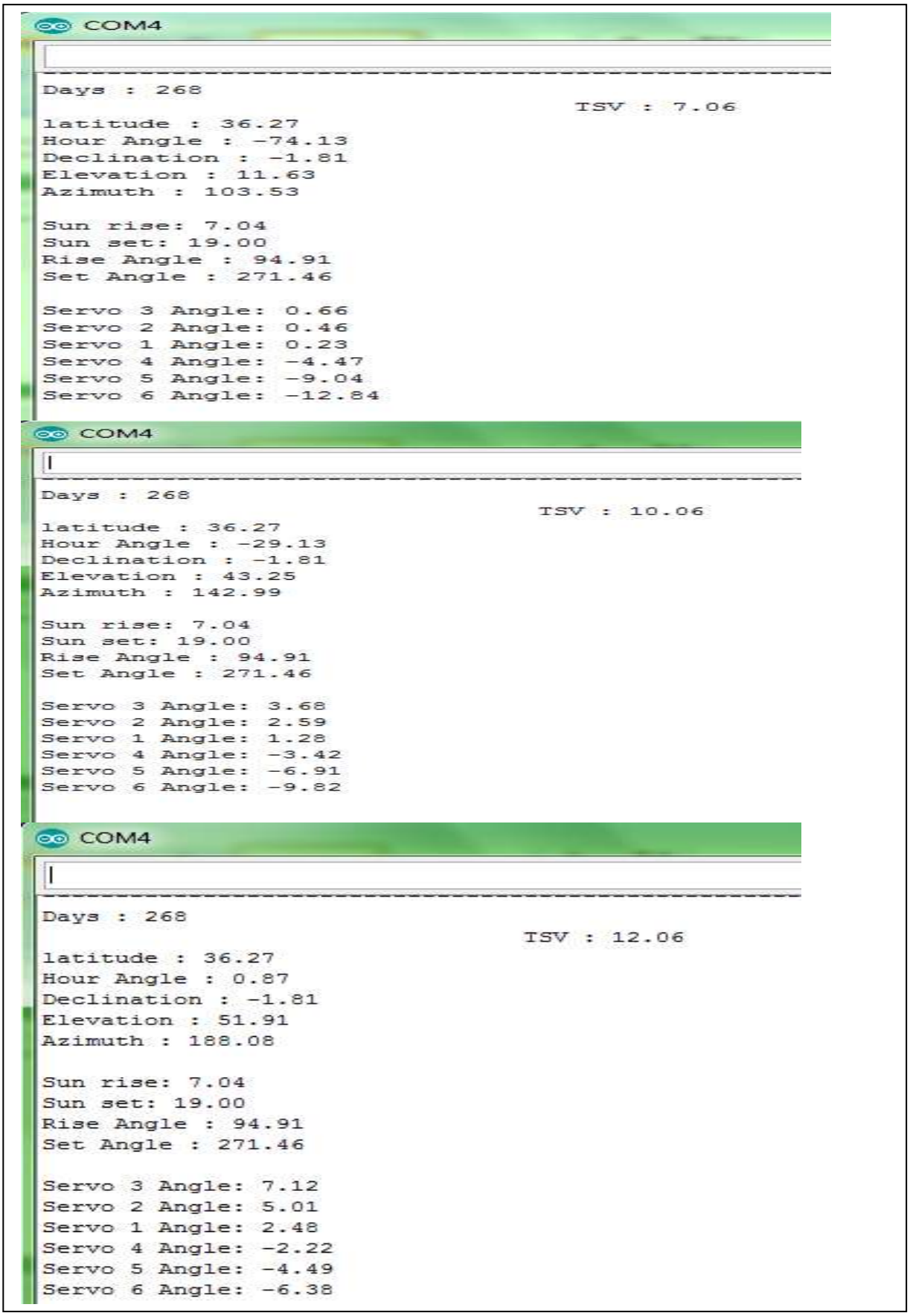



**Figure IV.14**:résultats obtenus.

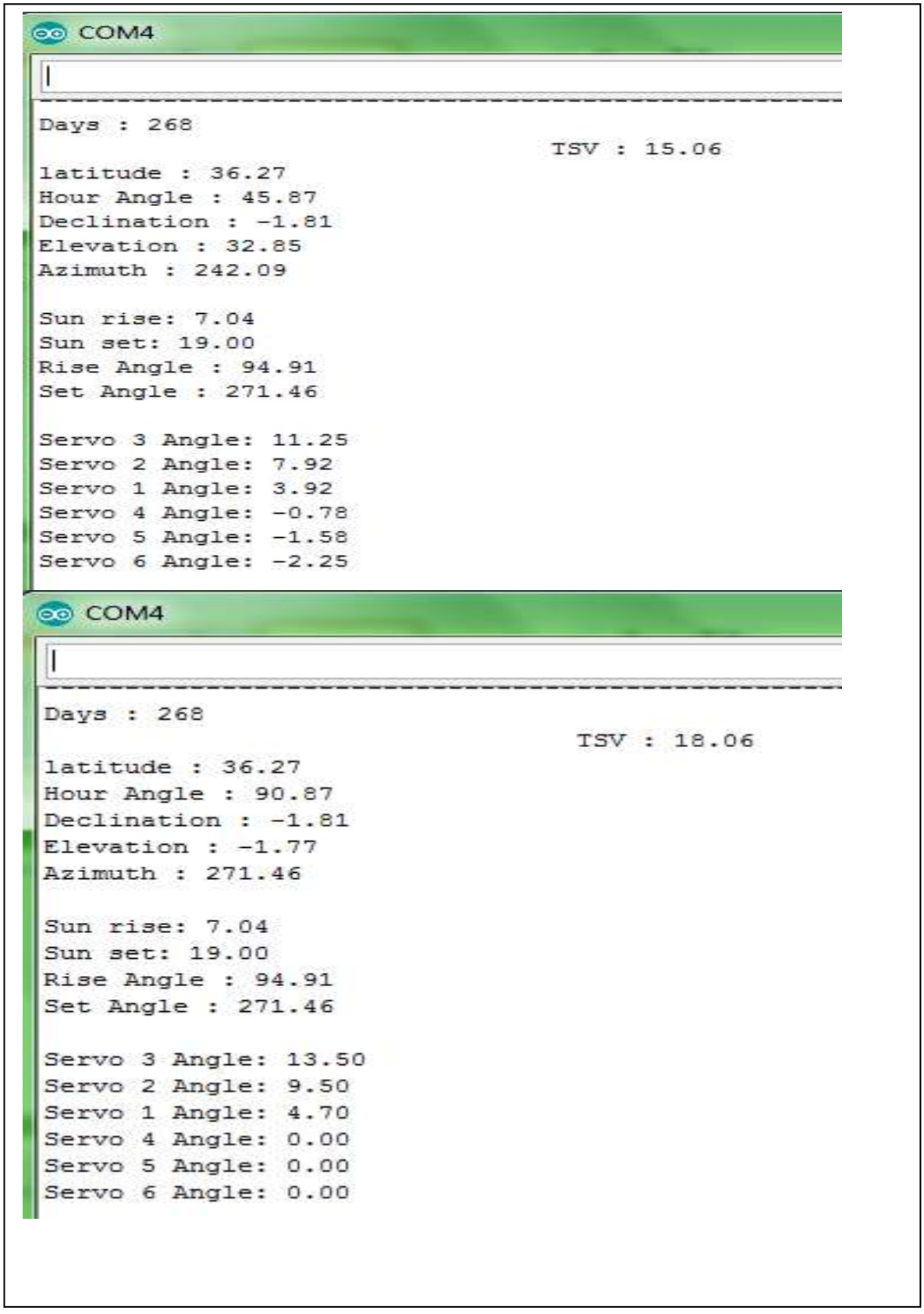



**Figure IV.15** : (suite) résultats obtenus.

### IV.7.2 Définition du TSV

Le TSV calculé dans le programme et affiché dans les résultats est le temps solaire vrai, on a inclue des équations dans le code pour calculer ce dernier en fonction des coordonnées et de l'heure de la zone dans laquelle le système doit être réalisé, les quelles [39] :

- **L'heure solaire locale ou vraie (TSV) et l'heure locale (LT)**

L'heure solaire locale de midi (HNL) est définie comme lorsque le soleil est le plus haut dans le ciel. L'heure locale (LT) varie généralement de celle de l'heure d'été en raison de l'excentricité de l'orbite terrestre et des ajustements humains tels que les fuseaux horaires et l'heure d'été.

- **Méridien de l'heure normale locale (LSTM)**

Le méridien de l'heure standard locale (LSTM) est un méridien de référence utilisé pour un fuseau horaire particulier et est similaire au méridien principal, qui est utilisé pour l'heure de Greenwich.

Le (LSTM) est calculé selon l'équation:

$$LSTM = 15^{o}\,\Delta T_{UTC} \qquad \text{(IV-4)}$$

Où ΔT UTC est la différence entre l'heure locale (LT) et le temps universel coordonné (UTC) en heures. ΔT UTC est également égal au fuseau horaire. 15 ° = 360 ° / 24 heures. Par exemple, Sydney Australie est UTC +10, donc le méridien de l'heure standard locale est de 150 ° E. Phoenix, USA est UTC -7 donc le LSTM est 105 ° W.

- **Équation du temps (EoT)**

L'équation du temps (EoT) (en minutes) est une équation empirique qui corrige l'excentricité de l'orbite terrestre et l'inclinaison axiale de la Terre. Une approximation précise à moins d'une demi-minute est:

$$EoT = 9{,}87.\sin(2B) - 7{,}53.\cos(B) - 1{,}5.\sin(B) \qquad \text{(IV-5)}$$

Où $$B = \frac{360}{365}(d - 81) \qquad \text{(IV-6)}$$

En degrés et d est le nombre de jours depuis le début de l'année.

- **Facteur de correction du temps (TC)**

Le facteur de correction du temps net (en minutes) tient compte de la variation de l'heure solaire locale (LST) dans un fuseau horaire donné en raison des variations de longitude dans le fuseau horaire et intègre également l'EoT ci-dessus.

$$TC = 4\left(Longitude - LTSTM\right) + EoT \qquad \text{(IV-7)}$$

Le facteur de 4 minutes vient du fait que la Terre tourne de 1 ° toutes les 4 minutes.

- **Heure solaire locale (TSV)**

L'heure solaire locale (TSV) peut être trouvée en utilisant les deux corrections précédentes pour ajuster l'heure locale (LT).

$$TSV = LT + \frac{TC}{60} \qquad \text{(IV-8)}$$

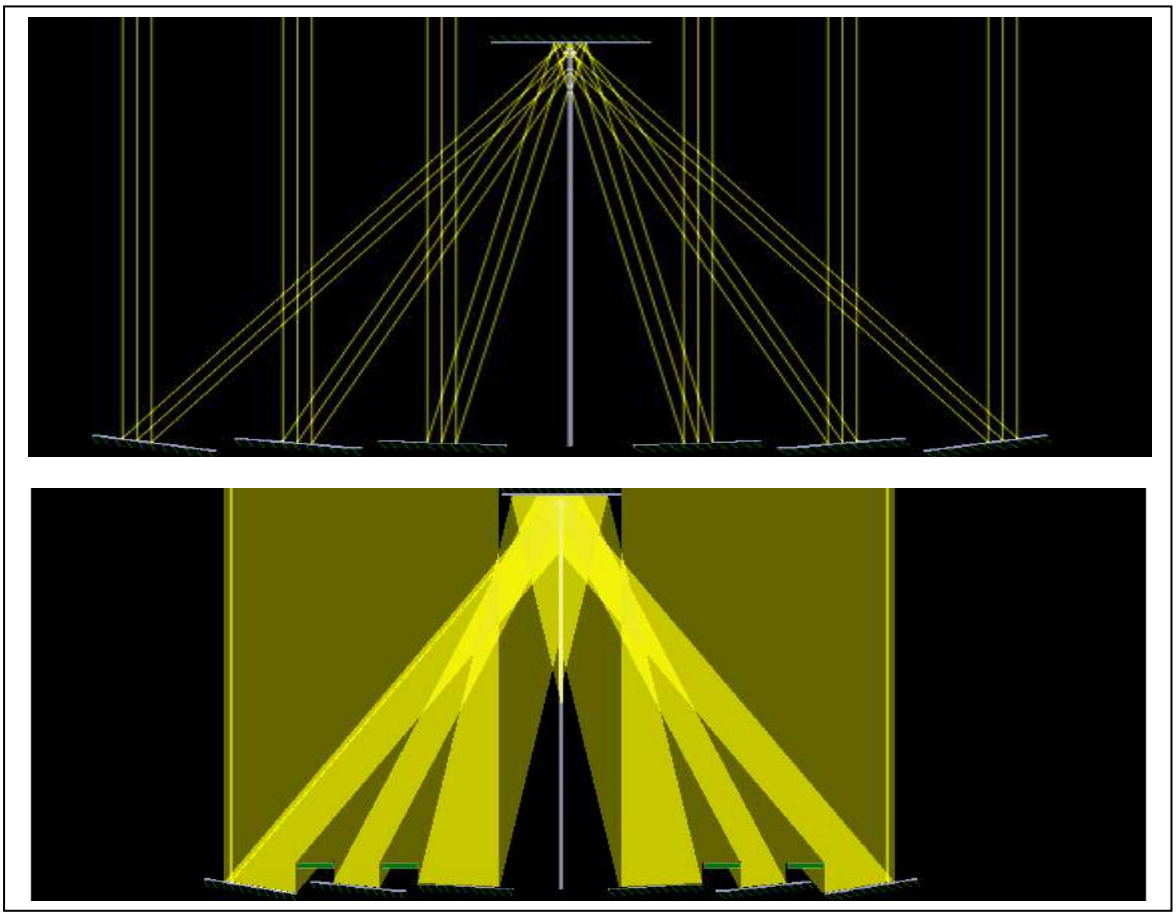


**Figure IV.16** : dessin par ‘ crocodile physiques’ du notre système.

Les angles des réflecteurs dessinés  sont les même que les angles calculées du système.

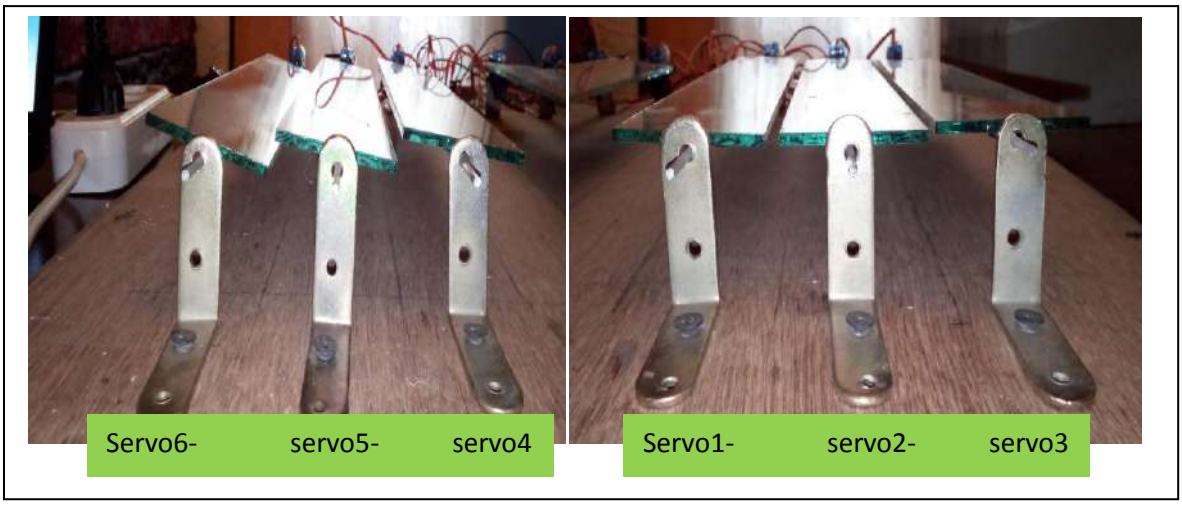



**Figure IV.17** : position des réflecteurs a 7:00AM.

**Tableau IV.3** : résultats obtenu a 7 :00h.

| | |
|---|---|
| Date et heur | 25/09/2020  7 :00AM |
| Azimut du soleil | 103.53$^{o}$ |
| Angle Servo 1 | 0.23$^{o}$ |
| Angle Servo 2 | 0.46$^{o}$ |
| Angle Servo3 | 0.66$^{o}$ |
| Angle Servo 4 | -4.47$^{o}$ |
| Angle Servo 5 | -9.04$^{o}$ |
| Angle Servo 6 | -12.84$^{o}$ |

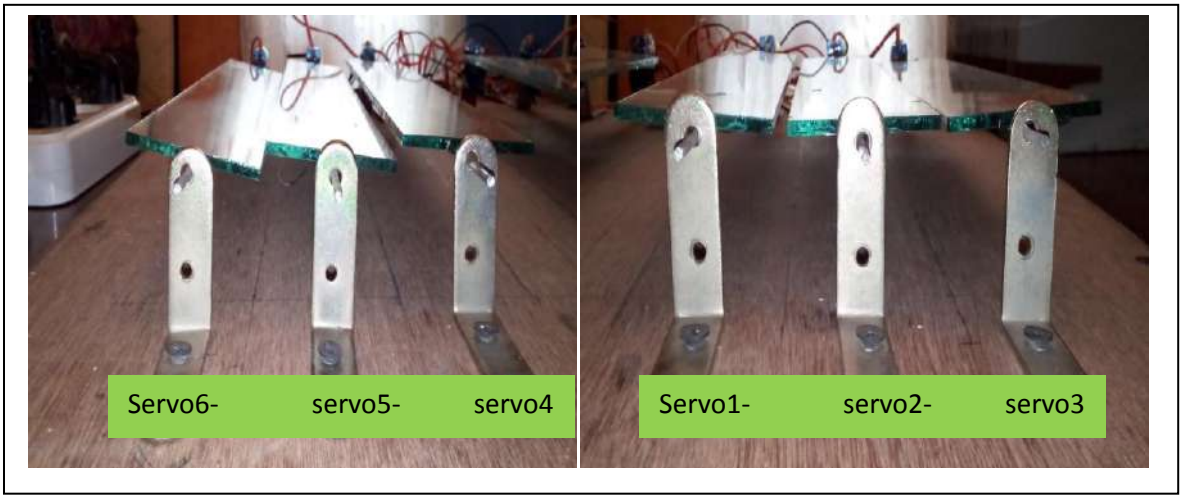



**Figure IV.18** : position des réflecteurs a 10:00AM.

**Tableau IV.4** : résultats obtenu a 10:00h.

| | |
|---|---|
| Date et heur | 25/09/2020 10:00AM |
| Azimut du soleil | 142.99$^{o}$ |
| Angle Servo 1 | 1.28$^{o}$ |
| Angle Servo 2 | 2.59$^{o}$ |
| Angle Servo3 | 3.68$^{o}$ |
| Angle Servo 4 | -3.42$^{o}$ |
| Angle Servo 5 | -6.91$^{o}$ |
| Angle Servo 6 | -9.82$^{o}$ |

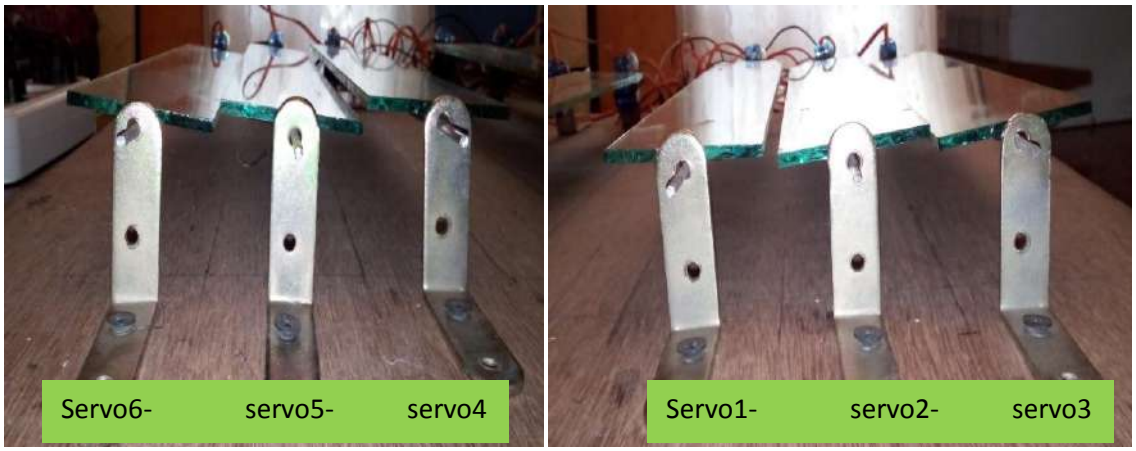



**Figure IV.19** : position des réflecteurs à midi.

**Tableau IV.5** : résultats obtenu à midi.

| | |
|---|---|
| Date et heur | 25/09/2020 12 :00PM |
| Azimut du soleil | 188.08$^{o}$ |
| Angle Servo 1 | 2.48$^{o}$ |
| Angle Servo 2 | 5.01$^{o}$ |
| Angle Servo3 | 7.12$^{o}$ |
| Angle Servo 4 | -2.22$^{o}$ |
| Angle Servo 5 | -4.49$^{o}$ |
| Angle Servo 6 | -6.38$^{o}$ |

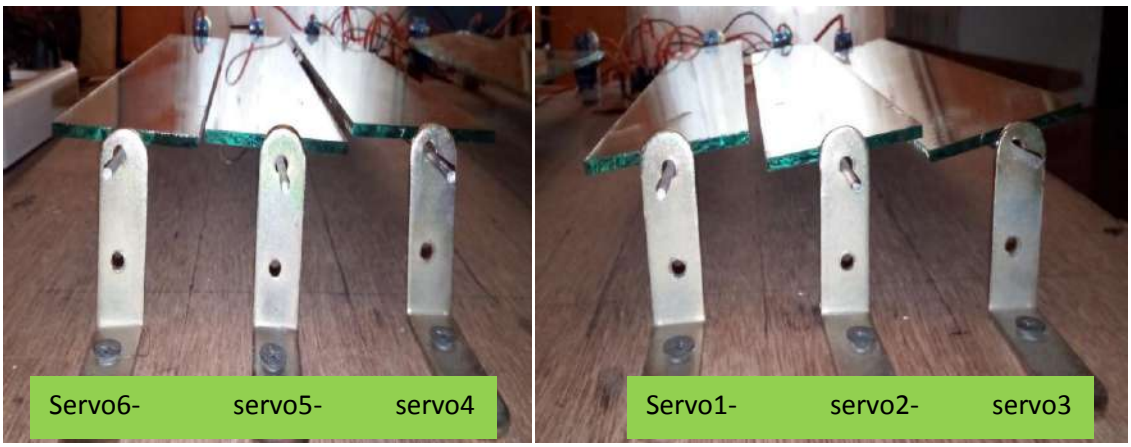



**Figure IV.20** : position des réflecteurs a 15:00PM.

**Tableau IV.6** : résultats obtenu a 15 :00h.

| | |
|---|---|
| Date et heur | 25/09/2020 15 :00PM |
| Azimut du soleil | $242.09^{o}$ |
| Angle Servo 1 | $3.92^{o}$ |
| Angle Servo 2 | $7.92^{o}$ |
| Angle Servo3 | $11.25^{o}$ |
| Angle Servo 4 | $-0.78^{o}$ |
| Angle Servo 5 | $-1.58^{o}$ |
| Angle Servo 6 | $-2.25^{o}$ |

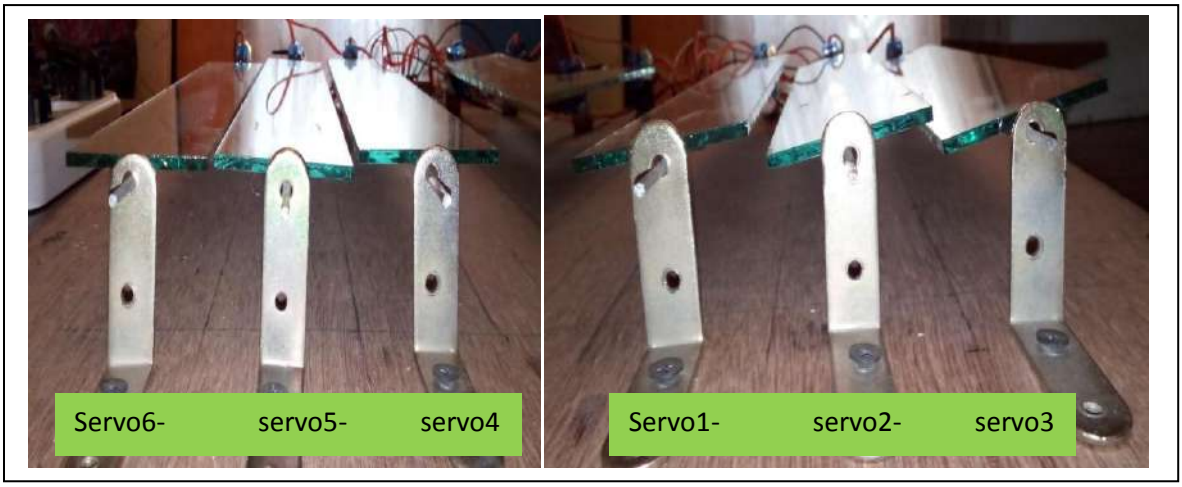



**Figure IV.21** : position des réflecteurs a 18:00PM.

**Tableau IV.7** : résultats obtenu a 18 :00h.

| | |
|---|---|
| Date et heur | 25/09/2020 18 :00PM |
| Azimut du soleil | 271.46$^{o}$ |
| Angle Servo 1 | 4.70$^{o}$ |
| Angle Servo 2 | 9.50$^{o}$ |
| Angle Servo3 | 13.50$^{o}$ |
| Angle Servo 4 | 0$^{o}$ |
| Angle Servo 5 | 0$^{o}$ |
| Angle Servo 6 | 0$^{o}$ |

## IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté tous les étapes de la réalisation de notre concentrateur solaire de type Fresnel appliqué au panneau photovoltaïque et tous les composants utilisé et le programme qui suivi la trajectoire de soleil et faire tourner les réflecteurs pour capter et concentrer le maximum des rayonnements solaires sur le panneau photovoltaïque.

Nous avons fait le travail des trois domaines différents (la mécanique, l'électronique et programmation, l'énergie solaire), qui n'a pas été facile.

Les travaux pratiques ont été effectués à la maison loin du laboratoire et de l'université en raison de la propagation de Covid 19, ce qui a rendu plus difficile la réalisation du projet et malgré tout les difficultés qui nous avons intercepté et la limitation des moyens pour faire des essaies de comparaison entre l'énergie produit par un panneau fixe et un panneau avec concentrateur de type Fresnel, nous avons réalisé ce modeste projet.

# *Conclusion générale*

# Conclusion générale

Ce projet de fin d'étude a été une occasions précieuse pour nous de faire un travail multidisciplinaire en reliant l'électronique, l'automatisation, la mécanique, la programmation, l'optique et les énergies renouvelables, et même le travail en collaboration avec des étudiants d'autres départements et ingénieurs sous la supervision des professeurs encadrant.

Notre projet est basé sur le principe de la rotation des miroirs de Fresnel en fonction du mouvement du soleil tout au long de la journée, basé sur les équations du gisement solaire, pour réfléchir les rayons du soleil sur les panneaux solaires en utilisant une carte Arduino ,et voir si le rendement est meilleur que d'installer les panneaux solaires de manière classique.

En perspective, nous souhaitons améliorer les outils utilisés dans ce projet et ajouter d'autres matériaux pour construire la partie mécanique et protéger le système contre les changements brusques de climat et de température.

Malgré les difficultés que nous avons rencontrées, nous avons voulu fournir tout ce que nous pouvions, pour que ce travail, si Dieu le veut, soit au niveau du projet de fin d'études-master.

# *Bibliographie*

## Bibliographie

[1] L. LOUAZENE, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla", magister, Université El Hadj Lakhdar - Batna, Algérie 2008.

[2] V. Laramée, «La Californie inaugure la plus grande centrale solaire thermodynamique du monde», journal de l'environnement, 2014. [Consulté le 1 septembre 2020].

[3] F. Veynandt, "Cogénération hélio thermodynamique avec concentrateur linéaire de Fresnel: modélisation de l'ensemble du procédé", Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), France 2011.

[4] A. FERRIÈRE, "Centrales solaires thermodynamiques", Techniques de l'ingénieur Énergies renouvelables. Éditions TI, https://www.techniques-ingenieur.fr, 2008 [Consulté le 7 septembre 2020].

[5] H. Karoua, "Etude des performances thermiques d'un capteur solaire avec effet de concentration de type Fresnel", Doctorat, Université de M'hamed Bougara, Boumerdès, Algérie 2011.

[6] "Barbecue solaire Fresnel - Solar Brother", Solar Brother, 2020. [En ligne]. Disponible: https://www.solarbrother.com/creation/fabriquer-un-four-solaire/baritchen-solaire-fresnel. [Consulté le 15 juillet 2020].

[7] G. Morin, J. Dersch, W. Platzer, M. Eck et A. Häberle, Comparaison des centrales électriques à collecteur linéaire de Fresnel et parabolique. Énergie solair, 86e éd. 2012, p. P. 1-12.

[8] M. Ahmed et A. Amin, "Analyse thermique des performances du concentrateur solaire linéaire de Fresnel", Journal of Clean Energy Technologies, vol. 4, non. 5, pp. 316-320, 2016. [Consulté le 24 septembre 2020].

[9] M. H, A. M et A. A, " Analyse thermique des performances du concentrateur solaire linéaire de Fresnel ", Analyse thermique des performances du concentrateur solaire linéaire de Fresnel. Journal of Clean Energy Technologies, pp. 316-320, 2016.

[10] Irena.org, 2012. [En ligne]. Disponible: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE_Technologies_Cost_Analysis-SOLAR_PV.pdf. [Consulté le 07 août 2020].

[11] Beltagy, H., Semmar, D., & Said, N. "Performances d'une centrale à concentrateur de Fresnel de moyenne puissance sur sites Algériens", Mediterranean Journal of Modeling and Simulation, 2014.

[12] P. L, S. R et B. J, Perforance thermique du concentrateur solaire réfléchissant Fresnel linéaire avec absorbeurs à cavité trapézoïdale. Applied Energy , 87e éd. Applied Energy, 2009, p. 541-550.

[13] S. Flores Larsen, M. Altamirano et A. Hernández, Perte de chaleur d'un absorbeur à cavité trapézoïdale pour un concentrateur solaire à réflexion de Fresnel linéaire, 39e éd. 2011, pp. 198-206.

[14] T. ARRIF, "Étude numérique d'un récepteur solaire pour des systèmes avec effet de concentration", Doctorat, Université Mohamed Khider - Biskra, Algérie 2014.

[15] S. ANDRIEUX, "Le solaire thermodynamique à concentration", EDF, 2012. [En ligne]. Disponible: https://www.edfenergy.com/about/research-development. [Consulté le 26 août 2020].

[16] "Un concentrateur solaire couplé à un moteur Stirling mis en marche au CDER-Bouzaréah. - Centre de Développement des Energies Renouvelables", Cder.dz, 2020. [En ligne]. Disponible: https://www.cder.dz/spip.php?article4049. [Consulté le 5 septembre 2020].

[17] Faiman , D, Ultra high cell efficiency on the path towards fossil-competitive PV economics.In workshop proceedings " The path to ultra-high efficient photovoltaic", Ispra, Italy, 2001.

[18] "Livre L'énergie solaire", EDF France, 2012. [En ligne]. Disponible: https://www.edf.fr/groupe-edf/qui-sommes-nous/activites/recherche-et-developpement/toutes-les-actualites-de-la-r-d/livre-l-energie-solaire. [Consulté le 10 juin 2020].

[19] L. MILOUDI, "Etude et simulation de la poursuite de la trajectoire de soleil par un panneau solaire photovoltaïque", maître, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES, Algérie 2012.

[20] Y. CHIBA, "ETUDE DE L'UTILISATION D'UN BASSIN D'EAU COMME CAPTEUR SOLAIRE", magister, Université Mintouri Constantine, Algérie 2005.

[21] "Solaire photovoltaïque", Connaissance des Énergies, 2020. [En ligne]. Disponible: https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique#notes. [Consulté le 10 juin 2020].

[22] "Le photovoltaïque sous concentration - Solarpedia", Fr.solarpedia.net, 2020. [En ligne]. Disponible: http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_photovolta%C3%AFque_sous_concentration. [Consulté le 16 juillet 2020].

[23] "Page de publication - Meteonorm (de)", Meteonorm (en), 2012. [En ligne]. Disponible: https://meteonorm.com/en/publications. [Consulté le 20 juillet 2020].

[24] "Axiosun et le CEA-Liten signent un accord de collaboration - Enerzine", Enerzine.com, 2012. [En ligne]. Disponible: https://www.enerzine.com/axiosun-et-le-cea-liten-signer-un-accord-de-collaboration/12151-2012-04. [Consulté le 3 septembre 2020].

[25] "Énergie solaire en Chine", Fr.m.wikipedia.org, 2004. [En ligne]. Disponible: https://fr.m.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_en_Chine. [Consulté le 3 septembre 2020].

[26] Www2.cnrs.fr, 2014. [En ligne]. Disponible: http://www2.cnrs.fr/sites/thema/fichier/thema_5.pdf. [Consulté le 3 septembre 2020].

[27] "Accueil - Greenfield Technologies LLC", Greenftechn.com, 2014. [En ligne]. Disponible: https://greenftechn.com/. [Consulté le 5 septembre 2020].

[28] "Green Field Solar Solution Private Limited, Chennai - Importateur de Solar DC Distribution Box et Solar Array Junction Box", https://www.gfsolarindia.com, 2013. [En ligne]. Disponible: https://www.gfsolarindia.com/. [Consulté le 5 septembre 2020].

[29] «Fichier: Fresnel lens.svg - Wikimedia Commons», Commons.wikimedia.org, 2013. [En ligne]. Disponible: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresnel_lens.svg. [Consulté le 5 septembre 2020].

[30] "Maison - SunPartner Group", SunPartner Group. [En ligne]. Disponible: https://www.sunpartnergroup.fr/. [Consulté: 6 septembre 2020].

[31] "ATmega328P - Microcontrôleurs AVR 8 bits", Atmel.com. [En ligne]. Disponible: http://www.atmel.com/devices/atmega328p.aspx. [Consulté le 14 août 2020].

[32] "Microcontrôleur ATMega328P", Components101. [En ligne]. Disponible: https://components101.com/microcontrollers/atmega328p-pinout-features-datasheet. [Consulté le 13 septembre 2020].

[33] A. Benkortbi et M. Feroukh, "Conception et réalisation d'un suiveur du soleil a base de la carte arduino uno", maître, université Dr YAHIAFARES de MEDEA, Algérie 2015.

[34] "RTC DS1307 IC - Description de la broche d'horloge en temps réel, fonctionnement et fonctionnalités", ElProCus - Projets électroniques pour les étudiants en génie. [En ligne]. Disponible: https://www.elprocus.com/rtc-ds1307. [Consulté le 12 septembre 2020].

[35] S. GRIM et M. AICHE, "Commande d'un panneau solaire à l'aide d'une carte arduino", Master, Université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU, Algérie 2018.

[36] "Servomoteur: définition, traduction", largus.fr, 2019. [En ligne]. Disponible: https://www.largus.fr/dictionary/moteur-energie/servomoteur-9864401.html. [Consulté le 11 septembre 2020].

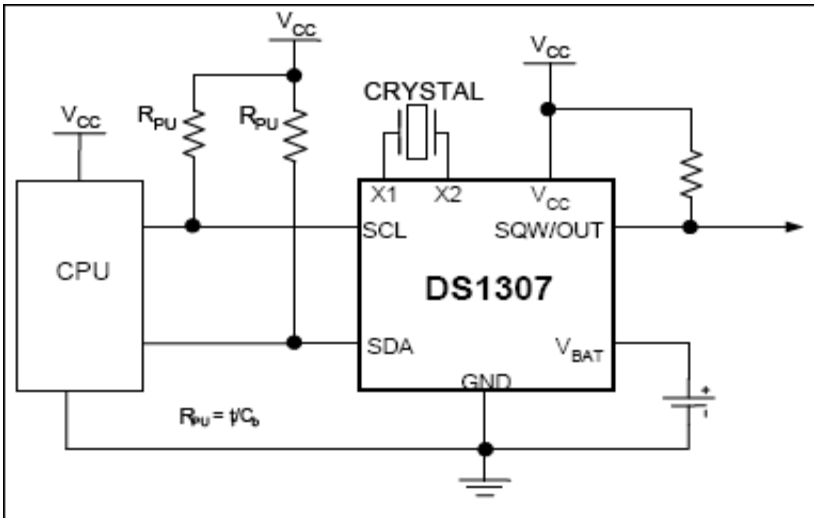
[37] A. ZARIFI et T. SAADI, "Simulation et réalisation de la commande d'un servomoteur a courant continu a base de la carte ARDUINO", Doctorat, Université Akli Mouhand Oulhadj-Bouira, Algérie 2017.

[38] "Servomoteur (analogique)", astups.motards.net. [En ligne]. Disponible: https://astups.motards.net/t8-servomoteur-analogique. [Consulté le 10 septembre 2020].

[39] "Énergie solaire", Pveducation.org. [En ligne]. Disponible: https://www.pveducation.org/. [Consulté le 27 août 2020].

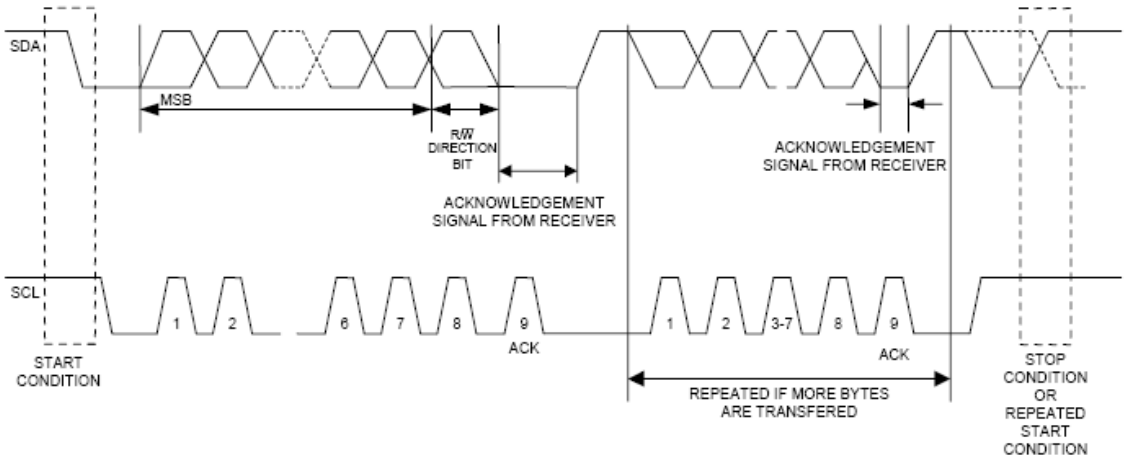
# *Annexe*

Figure A.1: CIRCUIT DE FONCTIONNEMENT TYPIQUE du RTC DS1307




Source : Maxim integrated

Figure A.2: Transfert de données sur le bus série $I^2C$ (RTC DS1307)




Source : Maxim integrated

## Le programme téleverser vers la carte Arduino pour le control des 6 servomoteurs pour tourner les miroirs :

```
#include <Servo.h>

#include "RTCDS1307.h"


#define lati 36.2675//latitude de lieu etudier(medea)

#define longi 2.75//longitude de lieu

#define pi    3.14159265358979323846

#define twopi (2*pi)

#define rad   (pi/180)

#define dEarthMeanRadius     6371.01  // In km

#define dAstronomicalUnit    1495978707  // In km

int months[12]={31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31};//N jours (utiliser dans les calcules des coordonnes celestials)

RTCDS1307 rtc(0x68);

Servo servo1;

Servo servo2;

Servo servo3;

Servo servo4;

Servo servo5;

Servo servo6;

int Ddays;

double Hangle,//angle horaire

     decl,//declinaison

     elevation,//hauteur angulaire du soleil

     coseleva,//cos elevation

     sinlat,//sin latitude

     coslat,//cos latitude

     sindecl,//sin declinaison

     cosdecl,//cos declinaison
```

```
    hangle,
    sinHangle,//sin angle horaire
    cosHangle,//cos angle horaire
    x,
    tsv,//temps solaire vrai
    lt,//temps local
    lst,//temps solaire local
    sunrise, //leve de soleil
    sunset,//couche de soleil
    srise,sset;
double dElapsedJulianDays;//date julian
double dDecimalHours;
double dEclipticLongitude;
double dEclipticObliquity;
double dRightAscension;
double dDeclination;//declinaison
double dSin_EclipticLongitude;
double dMeanLongitude;
double dMeanAnomaly;
double dOmega;
double dGreenwichMeanSiderealTime;//gsrm
double dLocalMeanSiderealTime;//lstm
double dLongitude;//longitude
double dLatitudeInRadians;//latitude
double dHourAngle;//hangle horaire
double dCos_Latitude;
double dSin_Latitude;
double dCos_HourAngle;
double dParallax;
double dAzimuth;
```

```
  double dZenithAngle;
  double dElevation;
double s1,s2,s3,s4,s5,s6;
uint8_t year=2020, month=8, weekday, day=24, hour=6, minute=00, second=0;//date et temps
bool period = 0;
int angle1 ;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  servo1.attach(3);//servo1 attacher au pin 3
  servo2.attach(5);//servo2 attacher au pin 5
  servo3.attach(6);//servo3 attacher au pin 6
  servo4.attach(9);//servo4 attacher au pin 9
  servo5.attach(10);//servo5 attacher au pin 10
  servo6.attach(11);//servo6 attacher au pin 11
  rtc.begin();
}
void loop() {
rtc.getDate(year, month, day, weekday);// lire la date dans RTC
rtc.getTime(hour, minute, second, period);//lire l'heure dans RTC


rise_set();//determination du leve et couche de soleil
Ddays =  Days0fYear(day,month);
Hangle = HourAngle(hour,minute);
SunCal();
DAzimuth(year,month,day,hour-1,minute,second,longi,lati);
if(dAzimuth<srise or dAzimuth>sset){Serial.print(hour);Serial.print(":");Serial.print(minute);      Serial.println(" Time is night ..");delay(3000);return;}
s3= (((dAzimuth-srise)/(sset-srise))*(13.5));//calculer l'angle du servo3
s2= (((dAzimuth-srise)/(sset-srise))*(9.5));//calculer l'angle du servo2
s1= (((dAzimuth-srise)/(sset-srise))*(4.7));//calculer l'angle du servo1
```

```
s4 =-(13.5-s1);//calculer l'angle du servo4

s5 =-(9.5-s2);//calculer l'angle du servo5

s6 =-(4.7-s3);//calculer l'angle du servo6

//changement d'angle dans les servomoteurs

servo3.write(s3+90);

delay(50);

servo2.write(s2+90);

delay(50);

servo1.write(s1+90);

delay(50);

servo4.write(s4+90);

delay(50);

servo5.write(s5+90);

delay(50);

servo6.write(s6+90);

delay(50);

Serial.println("-----------------------------------------------------");

Serial.print("Days : ");Serial.println(Ddays);

Serial.print("                    TSV : ");Serial.println(tsv);//afficher le temps solaire vrais dans le moniteur
serie

Serial.print("latitude : ");Serial.println(lati);//afficher le temps solaire vrais dans le moniteur serie

Serial.print("Hour Angle : ");Serial.println(Hangle);//afficher l'angle horaire dans le moniteur serie

Serial.print("Declination : ");Serial.println(decl);//afficher la declinaison dans le moniteur serie

Serial.print("Elevation : ");Serial.println(elevation);//afficher la hauteur angulaire du soleil dans le moniteur serie

Serial.print("Azimuth : ");Serial.println(dAzimuth);//afficher l'azimut solaire dans le moniteur serie

Serial.println("");

Serial.print("Sun rise: ");Serial.println(sunrise);//afficher le temps de leve de soleil dans le moniteur serie

Serial.print("Sun set: ");Serial.println(sunset);//afficher le temps de couche de soleil dans le moniteur serie

Serial.print("Rise Angle : ");Serial.println(srise);//afficher l'azimut au leve dans le moniteur serie

Serial.print("Set Angle : ");Serial.println(sset);//afficher l'azimut au couche vrais dans le moniteur serie
```

```
Serial.println("");
Serial.print("Servo 3 Angle: ");Serial.println(s3);//afficher l'angle calculer du servo3 dans le moniteur serie
Serial.print("Servo 2 Angle: ");Serial.println(s2);//afficher l'angle calculer du servo2 dans le moniteur serie
Serial.print("Servo 1 Angle: ");Serial.println(s1);//afficher l'angle calculer du servo1 dans le moniteur serie
Serial.print("Servo 4 Angle: ");Serial.println(s4);//afficher l'angle calculer du servo4 dans le moniteur serie
Serial.print("Servo 5 Angle: ");Serial.println(s5);//afficher l'angle calculer du servo5 dans le moniteur serie
Serial.print("Servo 6 Angle: ");Serial.println(s6);//afficher l'angle calculer du servo6 dans le moniteur serie
Serial.println("");Serial.println("");Serial.print("Waiting 5 minutes ");//retard de temps 5min
for (int i=0;i<31;i++){
delay(10000);Serial.print(".");}
Serial.println("");
}
int Days0fYear(int dd,int mm){
int result;
for (int i =0; i<month-1;i++){
result += months[i];}
result +=day;
return result;
}
//calculer le temps solaire vrais
float HourAngle(float hh,float mm){
float result,eot,b,tc,lst;
hh +=mm/100;
lt=hh;
b=360/365*(Ddays-81);
eot = 9.87*sin(2*b)-7.53*cos(b)-1.5*sin(b);
tc =4*(longi-15)+eot;//LTSM c'est Méridien de l'heure normale locale calculé selon l'équation:LTSM=15*ΔTtuc dans notre cas LTSM=15*(1)
tsv=hh+tc/60;
result = 15*(tsv-12);
```

```
return result;
}
void SunCal(){//calculer la position du soleil
sinlat = sin(radians(lati));
coslat = cos(radians(lati));
decl = 23.45*sin(radians((360.0/365.0)*(Ddays+284.0)));
sindecl = sin(radians(decl));
cosdecl = cos(radians(decl));
sinHangle = sin(radians(Hangle));
cosHangle = cos(radians(Hangle));
elevation = degrees(asin((sinlat*sindecl)+(coslat*cosdecl*cosHangle)));
coseleva = cos(radians(elevation));
}
void rise_set(){
Ddays =  Days0fYear(day,month);
Hangle = HourAngle(hour,minute);
DAzimuth(year,month,day,hour-1,minute,second,longi,lati);

for (int h=5;h<9;h++){
for (int m=0;m<60;m++){
  DAzimuth(year,month,day,h-1,m,second,longi,lati);
  Hangle = HourAngle(h,m);SunCal();
  if (elevation>0){
    srise =dAzimuth;
    sunrise = h+(m/100.0);goto exi;
  }
}}
exi:
for (int h=17;h<21;h++){
for (int m=0;m<60;m++){
```

```
  DAzimuth(year,month,day,h-1,m,second,longi,lati);
  Hangle = HourAngle(h,m);SunCal();
  if (elevation<2.53){
    sset =dAzimuth;
    sunset = h+(m/100.0);return;
  }
}}


}
void DAzimuth(
  int iYear,
  int iMonth,
  int iDay,
  double dHours,
  double dMinutes,
  double dSeconds,
  double dLongitude,
  double dLatitude){
{dDecimalHours = dHours + (dMinutes
      + dSeconds / 60.0 ) / 60.0;
    long int iYfrom2000=iYear;//expects now as YY (from 2000)-2000;
    long int iA=(14-(iMonth))/12;
    long int iM=(iMonth)+12*iA-3;
     long int liAux3=(153*iM+2)/5;
    long int liAux4=365*(iYfrom2000-iA);
    long int liAux5=(iYfrom2000-iA)/4;
    dElapsedJulianDays=(double)(iDay+liAux3+liAux4+liAux5+59)+
                    -0.5+dDecimalHours/24.0;}
     { dOmega=2.1429-0.0010394594*dElapsedJulianDays;
    dMeanLongitude = 4.8950630+ 0.017202791698*dElapsedJulianDays; // Radians
```

```
  dMeanAnomaly = 6.2400600+ 0.0172019699*dElapsedJulianDays;
  dEclipticLongitude = dMeanLongitude + 0.03341607*sin( dMeanAnomaly )
    + 0.00034894*sin( 2*dMeanAnomaly )-0.0001134
    -0.0000203*sin(dOmega);
  dEclipticObliquity = 0.4090928 - 6.2140e-9*dElapsedJulianDays
    +0.0000396*cos(dOmega);
}



{

  dSin_EclipticLongitude= sin( dEclipticLongitude );
  double dY1 = cos( dEclipticObliquity ) * dSin_EclipticLongitude;
  double dX1 = cos( dEclipticLongitude );
  dRightAscension = atan2( dY1,dX1 );
  if( dRightAscension < 0.0 ) dRightAscension = dRightAscension + twopi;
  dDeclination = asin( sin( dEclipticObliquity )*dSin_EclipticLongitude );
}{
   dGreenwichMeanSiderealTime = 6.6974243242 +
    0.0657098283*dElapsedJulianDays
    + dDecimalHours;
     dLocalMeanSiderealTime = (dGreenwichMeanSiderealTime*15
    + dLongitude)*rad;
  dHourAngle = dLocalMeanSiderealTime - dRightAscension;
   dLatitudeInRadians = dLatitude*rad;
  dCos_Latitude = cos( dLatitudeInRadians );
  dSin_Latitude = sin( dLatitudeInRadians );
  dCos_HourAngle= cos( dHourAngle );
   dZenithAngle = (acos( dCos_Latitude*dCos_HourAngle
  *cos(dDeclination) + sin( dDeclination )*dSin_Latitude));
```

```
    double dY = -sin( dHourAngle );
    double dX = tan( dDeclination )*dCos_Latitude - dSin_Latitude*dCos_HourAngle;
    dAzimuth=atan2( dY, dX );
    if ( dAzimuth < 0.0 )
      dAzimuth = dAzimuth + twopi;
    dAzimuth = dAzimuth/rad;


    dParallax=(dEarthMeanRadius/dAstronomicalUnit)
      *sin(dZenithAngle);
    dZenithAngle=(dZenithAngle
      + dParallax)/rad;
    dElevation=90-dZenithAngle;
  }
} }
}
```