REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**

**CENTRE DE DEVLOPMMENT DES TECHNOLOGIE AVANCÉE**







**F**aculté de **T**echnologie

**D**épartement du **G**énie **E**lectrique

# Mémoire de fin d'études de Master en

Filière : Télécommunication

Spécialité : Système de télécommunication

---

# Etude et réalisation d'un suiveur solaire a base d'arduino

---

Présentés par :

**Bouahmed Alaa**

**Haddouk Faiza**

Proposés et Dirigés par :

**DR.Menasri Wahiba**

**DR.Garoudja Elyes**

**Promotion 2024-2025**

# Résume

Ce projet consiste à réaliser un concentrateur solaire cylindro-parabolique permettant de chauffer un fluide caloporteur (l'eau) en concentrant les rayons du soleil sur la ligne focale où est placé le tube absorbeur. Un système de poursuite automatique, basé sur des capteurs LDR et une carte Arduino, oriente le réflecteur en fonction de la position du soleil. Un capteur de température DS18B20, relié à une carte ESP32, mesure la température du fluide et transmet les données via Bluetooth et Wi-Fi. Ce système, simple, économique et écologique, permet de maximiser la captation du rayonnement solaire tout au long de la journée.



**Mots clés :** Concentrateur cylindro-parabolique, suivi solaire automatique, LDR, DS18B20, fluide caloporteur, ligne focale, affichage en temps réel, rayonnement solaire.



# Abstract

This project involves the development of a cylindrical-parabolic solar concentrator designed to heat a heat transfer fluid (water) by focusing sunlight onto the focal line where the absorber tube is located. An automatic tracking system, based on LDR sensors and an Arduino board, adjusts the reflector according to the sun's position. A DS18B20 temperature sensor, connected to an ESP32 board, measures the fluid's temperature and transmits the data via Bluetooth and Wi-Fi. This system is simple, low-cost, and environmentally friendly maximizes solar radiation capture throughout the day.



**Keywords:** Cylindrical-parabolic concentrator, solar tracking system, LDR, DS18B20, heat transfer fluid, focal line, real-time display, solar radiation.



# الملخص

يهدف هذا المشروع إلى تصميم و إنجاز مركز للطاقة الشمسية من النوع الأسطواني-المخروطي القادر على تسخين السائل ناقل للحرارة (الماء) ,عن طريق تركيز أشعة الشمس على الخط البؤري حيث يوجد الأنبوب الماص للحرارة. يعتمد النظام على تتتبع الشمسي الأوتوماتيكي باستخدام متتبعات ضوئية (LDR) مرتبطة بلوحة أردوينو لتوجيه العاكس حسب موقع الشمس, كما تم استخدام مستشعر الحرارة الرقمي (DS18B20) المتصل بلوحة ESP 32 لقياس درجة حرارة السائل و إرسال البيانات عن بعد عبر البلوتوث أو شبكة الواي فاي. يعتبر هذا النظام بسيطا, منخفض التكلفة و صديقا للبيئة, كما يسمح باستغلال أقصى قدر من الإشعاع الشمسي طوال اليوم.



**الكلمات المفتاحية** : مركز الطاقة الشمسية الأسطواني-المخروطي, التتبع الشمسي الأوتوماتيكي ,DS18B20 , LDR , سائل ناقل للحرارة, خط البؤري, العرض الفوري ,الإشعاع الشمسي.

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A ma mère qui a tout sacrifie pour moi*

*A mon père qui m'a beaucoup donné*

*A mes sœurs Djalila et Abla et mon frères Khaled pour leur présence réconfortante*

*A toute ma famille pour leur affection constante*

*A mes meilleures amies de scolarité et de vie quotidienne Manel et Khadidja pour leur encouragement et leur bonne humeur*

*A mon binôme Faiza pour son esprit d'équipe tout au long de ce projet*

*A tous mes enseignants du primaire jusqu'à ce jour.*

**Bouahmed Alaa**

# Dédicaces

*À celle qui a toujours été et restera mon modèle dans la vie, à la source de patience, d'espoir et d'optimisme, symbole d'amour et baume de guérison : « Ma chère maman ».*

*À mon cher et précieux père, mon pilier, ma sécurité et ma paix dans cette vie.*

*À mes frères, mes sœurs et leurs conjoints, ainsi qu'à toute ma famille bien-aimée, je vous dédie toute ma gratitude et mon affection.*

*À ma binôme dans ce projet, Alaa, qui a été un véritable soutien tout au long de ce parcours.*

*Et je n'oublie pas de remercier mes enseignants, de toutes les étapes de ma scolarité, qui ont été une lumière guidant mes pas sur le chemin du savoir et de la connaissance.*

**Haddouk Faiza**

# REMERCIEMENT

Avant tout, nous exprimons notre gratitude infinie envers Dieu Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance tout au long de ce parcours.

Nous adressons ensuite nos remerciements les plus sincères à nos parents, pour leur soutien inconditionnel, leurs sacrifices et leurs prières qui ont toujours été notre source de motivation et de courage.

Ce mémoire est le fruit de cinq années de travail sérieux et d'études universitaires, au cours desquelles nous avons acquis des connaissances, des compétences, et des expériences précieuses.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à nos enseignants encadrant, Mme Menasri Wahiba, M. Elyes Garoudja et M. Filali Walid, pour leur accompagnement, leurs conseils précieux et leur disponibilité tout au long de ce travail.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants responsables pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont dispensé, ainsi qu'à tout le personnel administratif de l'Université de Médéa, en particulier le corps du département de génie électrique, pour leur accompagnement et leur professionnalisme.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement les enseignants examinateurs pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de notre travail, ainsi que pour leurs remarques constructives et enrichissantes.

Enfin, nous exprimons notre sincère reconnaissance au personnel du CDTA (Centre de Développement des Technologies Avancées), pour leur accueil, leur encadrement technique et scientifique, ainsi que les moyens mis à notre disposition qui ont contribué à la réussite de ce projet.

Merci à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce projet.

# Table des matières

Résumé

Dédicaces

Remerciements

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale ..... 1

**Chapitre 01 :** Etude théorique sur l'énergie solaire

1.1 Introduction ..... 5

1.2 Énergie renouvelable ..... 5

1.2.1 Énergie éolienne ..... 5

1.2.2 Énergie biomasse ..... 6

1.2.3 Énergie géothermique ..... 6

1.2.4 Énergie hydraulique ..... 7

1.2.5 Énergie solaire ..... 7

1.3 Technologies d'énergie solaire ..... 7

1.3.1 Énergie photovoltaïque ..... 8

1.3.2 Énergie thermique ..... 8

1.4 Concentrateur solaire ..... 9

1.4.1 Types de concentrateurs ..... 9

1.5 Géométrie du Concentrateur cylindro-parabolique ..... 12

1.5.1 Concentration de rayonnement à un Concentrateur cylindro-parabolique ..... 13

1.5.2 Paramètres pour la description géométrique d'un Concentrateur cylindro parabolique ..... 14

1.6 Composent d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique ..... 16

1.6.1 Réflecteur ..... 16

1.6.2 Absorbeur ..... 16

1.6.3 Fluide caloporteur ..... 16

1.7 Systèmes de poursuite solaire ..... 17

1.7.1 Types des suiveurs solaires ..... 17

1.8 Conclusion ..... 18

**Chapitre 02 :** Partie matérielle et logicielle d'un concentrateur cylindro-parabolique

2.1 Introduction ..... 20
2.2 Description du système ..... 20
2.3 Partie électrique ..... 20
2.3.1 Arduino UNO ..... 20
2.3.2 Carte ESP32 ..... 22
2.3.3 Photo résistance LDR ..... 23
2.3.4 Moteur pas-a-pas Nema-34-86HSE8N-BC38 ..... 24
2.3.5 Driver DM860H ..... 25
2.3.6 Capteur de température DS18B20 ..... 27
2.3.7 Capteur DHT11 ..... 27
2.4 Partie mécanique ..... 28
2.4.1 Réflecteur ..... 28
2.4.2 Absorbeur ..... 28
2.5 Partie logicielle ..... 29
2.5.1 Ray Optics simulation ..... 29
2.5.2 Matlab ..... 29
2.5.3 Arduino IDE ..... 30
2.5.4 Site web de température ..... 33
2.5.5 Serial Bluetooth Terminal ..... 33
2.6 Conclusion ..... 33

**Chapitre 03 :** Expérimentation er résultats

3.1 Introduction ..... 35
3.2 Elément constitutifs du prototype ..... 35
3.3 Simulation ..... 35
3.4 Réalisation ..... 36
3.4.1 Réflecteur cylindro-parabolique ..... 36
3.4.2 L'absorbeur thermique ..... 37
3.4.3 Structure de support ..... 38
3.4.4 Système de fixation du moteur ..... 38
3.4.5 Système de suivi solaire et capteurs LDR ..... 39
3.4.6 Capteur de température et acquisition des données ..... 40
3.4.7 Fluide caloporteur ..... 40

3.4.8 Structure de support du réservoir .....41
3.5 Programmation .....41
3.5.1 Test des capteurs de lumière (LDR) .....41
3.5.2 Test du moteur .....42
3.5.3 Test du capteur de température DS18B20 avec ESP32 .....44
3.6 Expériences expérimentales .....46
3.6.1 Première expérience : Effet de concentration avec du papier aluminium .....46
3.6.2 Deuxième expérience : Test de l'effet à l'aide des plaques en verre .....46
3.7 Résultats et interprétation .....47
3.7.1 Test à vide .....47
3.7.2 Test avec fluide .....48
3.8 Conclusion .....49
Conclusion générale ..... 48
Références

# Liste des figures

**Chapitre 01 :** Etude théorique sur l'énergie solaire

Figure 1. 1 : Energie éolienne. .....5
Figure 1. 2 : Energie biomasse. .....6
Figure 1. 3 : Energie géométrique. .....6
Figure 1. 4 : Energie hydraulique. .....7
Figure 1. 5 : Technologies d'énergie solaire. .....7
Figure 1. 6 : Effet photovoltaïque. .....8
Figure 1. 7 **:** Types des concentrateurs solaires. .....9
Figure 1. 8 : Concentrateur parabolique avec un moteur Stirling. .....10
Figure 1. 9 : Concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel. .....11
Figure 1. 10 : Héliostat de la centrale solaire de Thémis. .....11
Figure 1. 11 : un Rayon solaire par un héliostat vers un point fixe. .....12
Figure 1. 12 : Concentrateur cylindro-paraboliques. .....13
Figure 1. 13 : Chemin des rayons parallèles à un miroir parabolique. .....13
Figure 1. 14 : Paramètres géométriques Concentrateur cylindro-parabolique. .....14
Figure 1. 15 : Longueur focale comme paramètre de forme. .....14
Figure 1. 16 : Relation entre l'angle de la jante et la valeur a / f. .....15
Figure 1. 17 : Principe de travail d'un réflecteur. .....16
Figure 1. 18 : Absorbeur. .....16
Figure 1. 19 : Types des suiveurs solaires. .....17
Figure 1.20 : Suiveur solaire passive. .....17

**Chapitre 02 :** Partie matérielle et logicielle d'un concentrateur cylindro-parabolique

Figure 2. 1 : Carte Arduino UNO. .....21
Figure 2. 2 : Carte ESP32. .....22
Figure 2. 3 : Photo résistance module LDR. .....24
Figure 2. 4 : Moteur pas-a-pas NEMA 34. .....24
Figure 2. 5 : Kit complet de moteur NEMA34. .....25
Figure 2. 6 : Driver DM860H. .....25
Figure 2. 7 : Capteur de température DS18B20. .....27
Figure 2. 8 : Capteur DHT11. .....27
Figure 2. 9 **:** Miroirs utilise comme réflecteur .....28
Figure 2. 10 : Tube de cuivre choisi comme un récepteur. .....28
Figure 2. 12 : Interface de Ray Optics simulation. .....29
Figure 2. 13 : Interface de MATLAB. .....30
Figure 2. 14 : Interface de l'Arduino IDE. .....30
Figure 2. 15 : Sélection de carte. .....31
Figure 2. 16 : Site web de température. .....33

**Chapitre 03 :** Expérimentation et résultat

Figure 3. 1 : Programme de la dimension de concentrateur. .....35
Figure 3. 2 : Résultat de programme. .....36
Figure 3. 3 : Étapes de mise en forme du réflecteur solaire. .....36
Figure 3. 4 : Installation des panneaux de miroirs. .....37
Figure 3. 5 : Fixation du tube absorbeur en cuivre sur l'axe focal. .....37
Figure 3. 6 : Modification du tube absorbeur .....38
Figure 3. 7 : Support structurel du concentrateur cylindro-parabolique. .....38
Figure 3. 8 : Système d'accouplement du moteurr. .....39
Figure 3. 9 : Fixation finale du moteur. .....39
Figure 3. 10 : Installation et test du capteurs LDR. .....40
Figure 3. 11 : Installation de DS18B20 .....40
Figure 3. 12 : Structure de support de réservoir. .....41
Figure 3. 13 : Programme de Test du moteur pas-à-pas avec Arduino. .....43
Figure 3. 14 : Programme Arduino pour le contrôle d'un moteur pas-à-pas basé sur des capteurs de lumière. .....43
Figure 3. 15 : Début de programme .....45
Figure 3. 16 : Suite de programme .....45
Figure 3. 17 : Test de l'effet de concentration à l'aide de papier aluminium. .....46
Figure 3. 18 : Test de l'effet de concentration à l'aide des plaques en verre. .....47
Figure 3. 19 : Temperature de test a vide. .....48
Figure 3. 20 : Graph et donné de teperature avec fluide. .....49

# Liste des tableaux

**Chapitre 02 :** Partie matérielle et logicielle d'un concentrateur cylindro-parabolique

Tableau 2. 1 : Caractéristique de l'Arduino UNO. .....21
Tableau 2. 2 : Caractéristiques de ESP32. .....23
Tableau 2. 3 : Connexion de bloc d'alimentation de driver avec le moteur. .....26

**Chapitre 02 :** Expérimentation et résultat

Tableau 3. 1 : Connexion des capteur LDR avec l4arduino UNO .....42
Tableau 3. 2 : Connexion de pilote DMS860H a l'arduino .....42
Tableau 3. 3 : Connexion de capture DS18B20 à l'ESP 32 .....44
Tableau 3. 4 : résultat de Test a vide .....47
Tableau 3. 5 : résultat de Test avec fluide .....48

# Liste des abréviations

**AC** : Courant alternatif

**CDTA** : Centre de Développement des Technologies Avancées

**°C** : Degré Celsius

**DC** : Courant continu

**DHT11** : Capteur numérique de température et d'humidité

**DS18B20** : Capteur de température numérique avec interface 1-Wire

**EEPROM** : Mémoire morte programmable et effaçable électriquement

**ESP32** : Carte de développement avec microcontrôleur Wi-Fi et Bluetooth intégrés

**GND** : Masse électrique (Ground)

**GPIO** : Broches d'entrée/sortie polyvalentes (General Purpose Input/Output)

**HTTP** : Protocole de transfert hypertexte

**HVAC** : Chauffage, ventilation et climatisation (Heating, Ventilation and Air Conditioning)

**ICSP** : Programmation série en circuit (In-Circuit Serial Programming)

**IDE** : Environnement de développement intégré (Integrated Development Environment)

**IEA** : Agence internationale de l’énergie (International Energy Agency)

**IOT** : Internet des objets (Internet of Things)

**KO** : Kilooctet

**KW** : Kilowatt

**KWh** : Kilowattheure

**LDR** : Photorésistance dépendante de la lumière (Light Dependent Resistor)

**LFR** : Réflecteur linéaire de Fresnel

**MATLAB** : Laboratoire de matrices (Matrix Laboratory)

**MHz** : Mégahertz

**MO** : Mégaoctet

**MQTT** : Protocole de télégestion avec file d’attente de messages (Message Queuing Telemetry Transport)

**mA** : Milliampère

**PTC** : Collecteur cylindro-parabolique

**PVC** : Polychlorure de vinyle

**PV** : Photovoltaïque

**PWM** : Modulation de largeur d’impulsion (Pulse Width Modulation)

**RAM** : Mémoire vive (Random Access Memory)

**ROM** : Mémoire morte (Read-Only Memory)

**SES** : Système d'énergie de Stirling

**TCP/IP** : Protocole de contrôle de transmission / Protocole Internet

**Te** : Température d'entrée

**TS** : Température de sortie

**UNO** : Carte Arduino UNO à microcontrôleur

**USB** : Bus série universel (Universal Serial Bus)

**V** : Volt

**VCC** : Tension d'alimentation (Voltage Common Collector)

# Introduction générale

# Introduction générale

La problématique énergétique mondiale actuelle est marquée par deux dynamiques majeures et opposées : d'une part, l'accroissement continu de la demande en énergie dû à la croissance démographique, à l'urbanisation et à l'industrialisation ; d'autre part, l'épuisement progressif des ressources énergétiques fossiles traditionnelles telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour cela la transition vers des sources d'énergie alternatives, renouvelables et respectueuses de l'environnement s'impose aujourd'hui comme une nécessité urgente[1].

Parmi les différentes formes d'énergie renouvelable, l'énergie solaire se distingue par son abondance, sa disponibilité universelle et son faible impact environnemental. Elle constitue une alternative prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques futurs tout en limitant les effets néfastes sur l'environnement. L'exploitation de l'énergie solaire peut se faire de diverses manières, parmi lesquelles la concentration solaire thermique, qui permet de convertir le rayonnement solaire en chaleur, figure comme une méthode efficace pour des applications de production d'eau chaude, de vapeur ou d'électricité[2].

Dans ce contexte, notre projet s'inscrit dans une démarche de valorisation de l'énergie solaire à travers la conception et la réalisation d'un concentrateur solaire de type cylindro-parabolique. Ce dispositif a pour but de concentrer les rayons du soleil sur un tube absorbeur contenant un fluide caloporteur, permettant ainsi de convertir l'énergie solaire en énergie thermique. Pour maximiser l'efficacité de ce système, nous avons intégré un mécanisme de poursuite solaire automatique. Ce dernier repose sur l'utilisation de capteurs de lumière de type LDR (Light Dependent Resistor), associés à un microcontrôleur Arduino, permettant d'orienter le concentrateur en temps réel en fonction de la position du soleil. Ce système permet au concentrateur de suivre la trajectoire du soleil tout au long de la journée, optimisant ainsi la captation du rayonnement et améliorant le rendement énergétique du dispositif[3].

Par ailleurs, afin d'évaluer et de surveiller en temps réel le comportement thermique du fluide caloporteur circulant dans le tube absorbeur, nous avons intégré un capteur de température numérique de type DS18B20. Ce capteur se distingue par sa précision de mesure, sa robustesse, ainsi que par sa capacité à transmettre les données sous forme numérique, réduisant ainsi les interférences et augmentant la fiabilité des relevés thermiques. La mesure continue de la température du fluide permet ainsi d'optimiser le contrôle du système et d'en évaluer les performances en conditions réelles[4].

Dans un souci de modernisation et d'accessibilité, nous avons également développé une interface web dédiée, permettant la consultation à distance des données relevées par les différents capteurs du système. Cette interface assure une visualisation claire et en temps réel de l'évolution de la température du fluide caloporteur. Elle représente un atout majeur pour le suivi à distance, l'analyse des performances, ainsi que pour d'éventuelles interventions de maintenance préventive[5].

En complément de l'interface web, nous avons également intégré une solution de suivi local via l'application mobile Serial Bluetooth Terminal**.** Cette application, permet d'afficher en temps réel la température mesurée par le capteur DS18B20**.** Les données s'affichent sous forme numérique claire sur l'écran du smart phone, offrant ainsi une alternative pratique et rapide pour consulter les valeurs thermiques sans nécessiter de connexion Internet. Cette fonctionnalité permettant à l'utilisateur de suivre les performances thermiques directement sur le terrain, même en l'absence d'accès au réseau Wi-Fi.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux, répartis comme suit :

- Le chapitre I présente des concepts fondamentaux liés à l'énergie solaire, aux concentrateurs cylindro-paraboliques et aux systèmes de poursuite solaire.

- Le chapitre II décrit le matériel utilisé, la conception mécanique du concentrateur, ainsi que de la partie électronique et logicielle, incluant la communication des données vers une interface web.

- Le chapitre III détaille la réalisation pratique du système, des phases de tests expérimentaux, des simulations effectuées, et présentation des résultats obtenus.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale mettant en évidence les performances du système réalisé et proposant des perspectives d'amélioration pour de futurs développements.

En somme, notre projet conjugue des technologies simples, accessibles et peu coûteuses pour aboutir à une solution innovante de captation et d'exploitation de l'énergie solaire Il s'inscrit pleinement dans la dynamique actuelle de recherche de systèmes énergétiques intelligents, durables et adaptés aux besoins croissants des sociétés contemporaines.

# CHAPITRE 01

Étude théorique sur l’énergie solaire

## 1.1 Introduction

L'énergie renouvelable est une énergie fiable qui l'on peut trouver en plusieurs forme comme l'énergie éolienne, solaire, biomasse, géothermique et hydraulique. Dans notre étude nous serions intéressés avec l'énergie solaire spécifiquement avec l'énergie thermique car on veut réaliser un concentrateur cylindro-parabolique, donc ce chapitre sera consacré sur les points essentiels suivants pour assurer le bon fonctionnement de concentrateur à savoir : l'énergie thermique, le concentrateur solaires ainsi que le système poursuite solaire.

## 1.2 Énergie renouvelable

Dans le monde d'aujourd'hui, l'énergie est nécessaire pour garantir un bon niveau de vie. Il est donc essentiel de disposer des sources d'énergie durable et abordables qui n'entraînent ni pollution ni changement climatique comme les énergies renouvelable car elle pourrait réduire la pollution atmosphérique qui sévit aujourd'hui dans des nombreuses villes, fournir une énergie moins chère et de nombreux nouveaux emplois, et assurer la sécurité énergétique de millions de personnes à un coût abordable[6].

### 1.2.1 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui transfert l'énergie cinétique de vent à une énergie mécanique de type éolienne (comme illustre dans la Figure 1.1). Sous l'effet de vent les pales des héliostats tournent avec une faible vitesse qui font elles même tourner le générateur de l'éolienne (l'arbre d'entrée) qui tourne le multiplicateur pour augmenter la vitesse de rotation. Cette rotation de la nacelle avec la fixation de la partie stable des héliostats générer une énergie électrique[7].

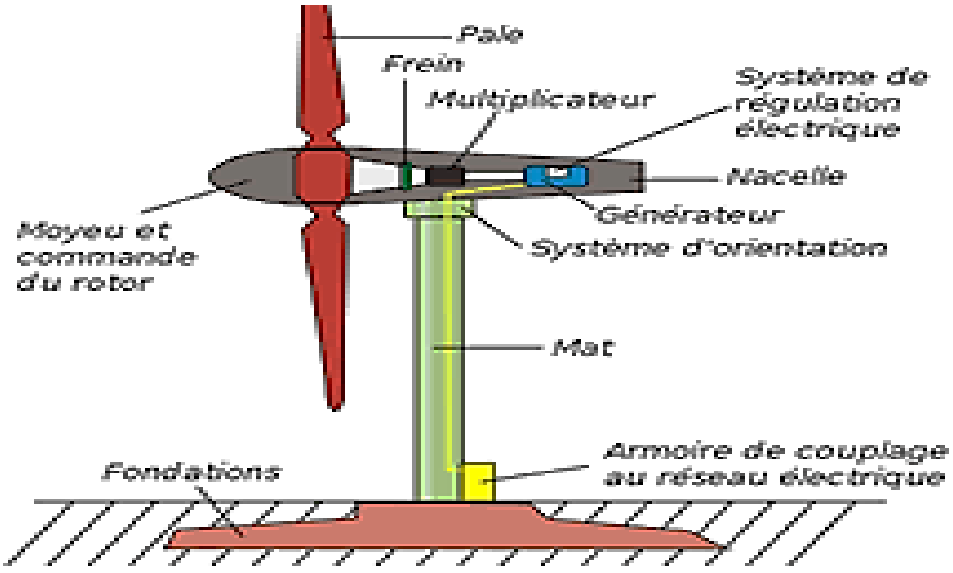



**Figure 1. 1 :** Energie éolienne.

### 1.2.2 Énergie biomasse

L'énergie biomasse est une énergie renouvelable chimique (comme illustre dans la Figure 1.2). Les déchets sont d'abord transformés en un biogaz par fermentation dans des tables de métallisations grâce à des micro-organismes (bactéries) sous l'effet de haute température et le manque d'oxygène. Le biogaz est ensuite brûlé pour produire l'énergie[7].

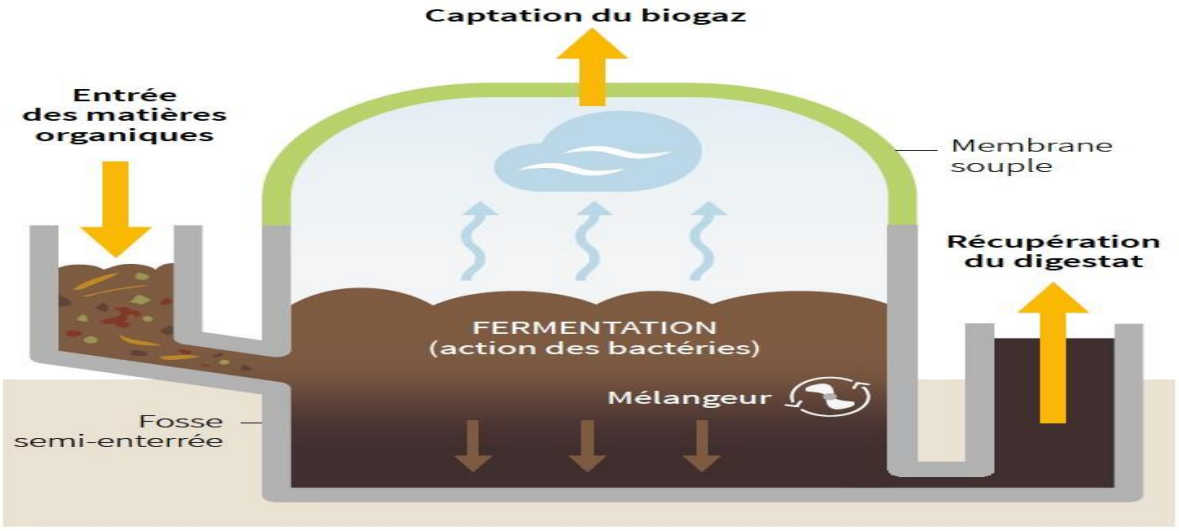



**Figure 1. 2 :** Energie biomasse.

### 1.2.3 Énergie géothermique

L'énergie géothermique est une énergie renouvelable générée en exploitant la chaleur naturelle de la terre afin d'assurer l'eau ou gaz chaud a travers deux puits une pour la sortie de l'eau chaud de la terre sous l'effet de pression l'aide d'une pompée en l'utilisant pour alimenter des turbines dans l'échangeur thermique ensuite il passe à la tour de refroidissement pour l'injectée l'eau froid au puits d'entrée placé à une distance de 1500 mètre minimum au puits de sortir (comme illustre dans la Figure 1.3)[7].

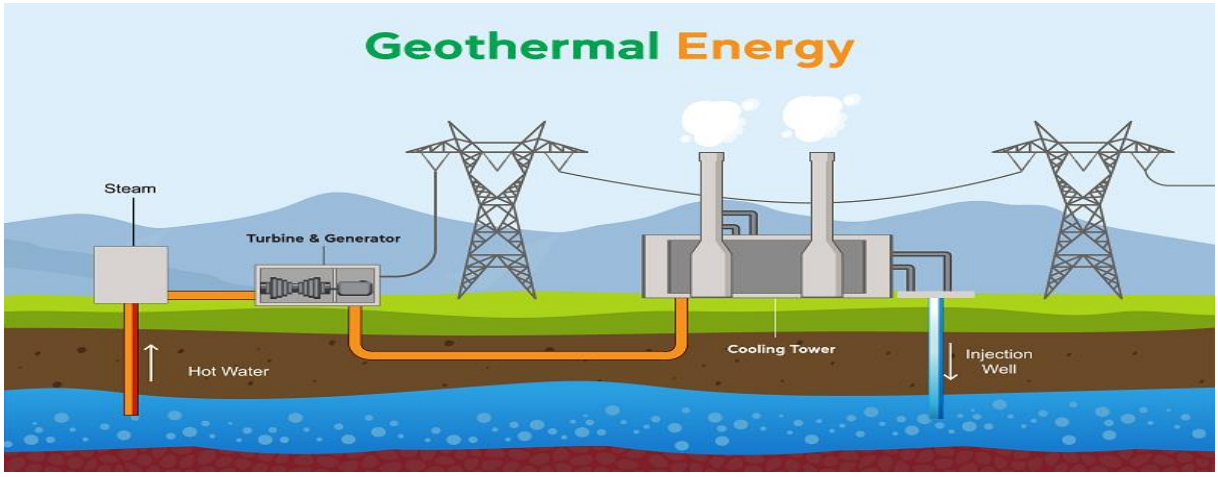



**Figure 1. 3 :** Energie géométrique.

### 1.2.4 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable qui utilisant la pression d'eau pour produire d'électricité (comme illustre dans la Figure 1.4). Il est consisté de transformer l'énergie cinétique du courant d'eau en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur[7].

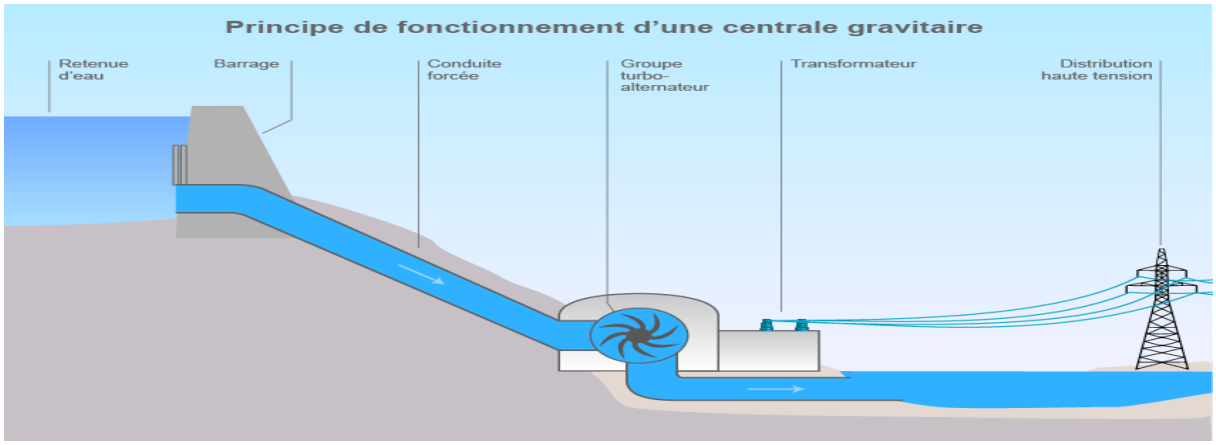



**Figure 1. 4 :** Energie hydraulique.

### 1.2.5 Énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable la plus utilise basée sur la transformation de l'énergie solaire en électricité ou en chaleur à partir des panneaux ou de capteurs solaires. Elle dépend directement de l'orientation et de la position du soleil pour récupérer un maximum d'énergie on peut l'utiliser pour chauffer l'eau sanitaire ou bien pour produire l'électricité[8].

## 1.3 Technologies d'énergie solaire

L'énergie solaire peut utiliser comme une énergie électrique (allumer une lampe) ou bien en énergie thermique (chauffer l'eau sanitaire) donc il existe deux technologies essentielles : l'énergie photovoltaïque qui transfert le rayon solaire a une énergie électrique et l'énergie thermique qui transfert le rayon solaire a une chaleur (Figure 1.5)[9].

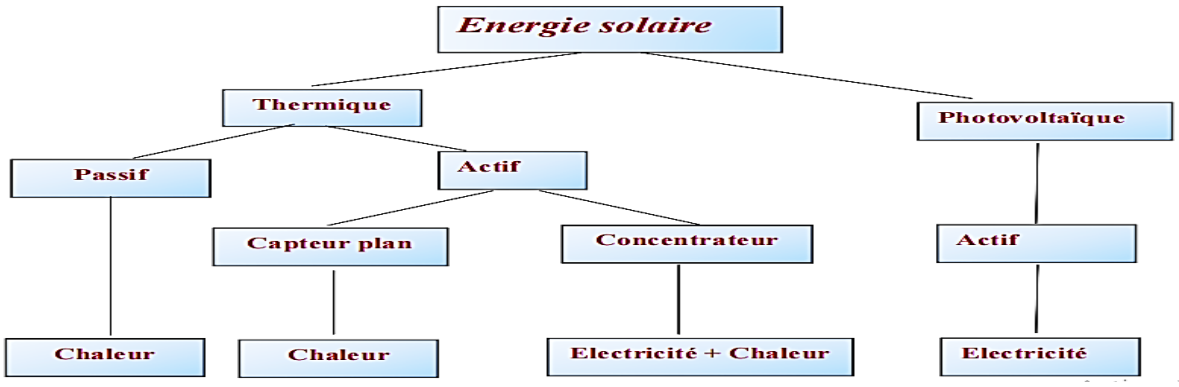



**Figure 1. 5 :** Technologies d'énergie solaire.

### 1.3.1 Énergie photovoltaïque

En 1839, le physicien français Alexandre Edmond-Becquerel remarque que les photons présents dans la lumière dégagent de l'énergie. Il constate également que ceux-ci peuvent être absorbés par des matériaux semi-conducteurs et générer ainsi une tension électrique. C'est ce qu'on appelle désormais l'effet photovoltaïque qu'il apparaît lorsqu'on un semi-conducteur de type N (dopé positivement avec des protons) au-dessus d'un autre semi-conducteur de type P (dopé négativement avec des électrons) et sous l'effet des rayons solaire il aura un passage entre les électrons et les protons cela produite l'électricité (comme illustre dans la Figure 1.6)[10].

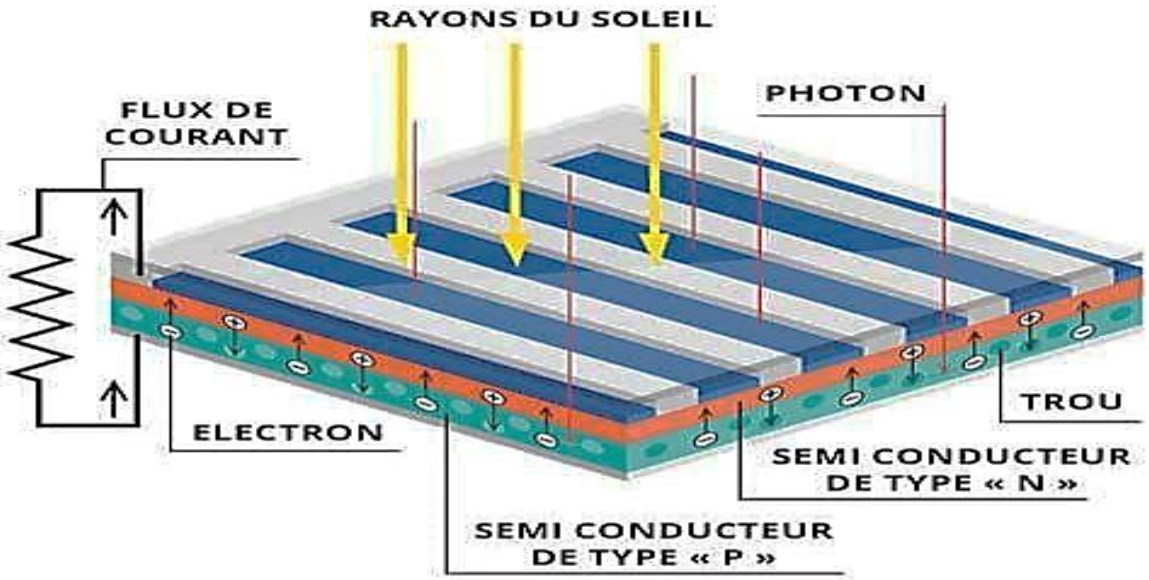



**Figure 1. 6 :** Effet photovoltaïque.

### 1.3.2 Énergie thermique

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) la filière du solaire thermique fournira 10 % de la production mondiale de l'énergie renouvelable à l'horizon de 2050 (environ 2000 TW/h sera produite annuellement par cette technologie à 2050) et il va continuer à se développer après l'année 2050 car il est adéquate pour la production de l'énergie en grande échelle donc il est la plus favorable parmi les différentes technologies de la génération d'énergie à partir du soleil. Cette adéquation est issue du coût qui diminue avec la capacité de production des centrales solaires thermiques. Il existe deux différentes méthodes pour utiliser cette énergie : passive et active[9].

**a. Energie passive**

L'énergie passive dépend de la conception et le matériel utilisé dans la concentration des bâtiments pour capter l'énergie. Cette conception existe depuis longtemps. Il y a un siècle, des familles peinturaient leurs réservoirs en noir et les exposaient au soleil pour chauffer

l'eau car la surface noire absorbait la chaleur, qui était ensuit transmise au métal du réservoir, puis à l'eau. Cette technique est toujours utilisée dans les régions chaudes[9].

### b. Énergie active

L'énergie active dépend sur des capteurs pour capter l'énergie de soleil et le transformera à l'électricité pour alimenter des pompes et des ventilateurs qui distribuent de l'eau et de l'air chaud, comme les systèmes qui utilisent des panneaux solaire (des capteurs plan et vitreux) pour chauffer l'eau ou les locaux[9].

## 1.4 Concentrateur solaire

Le concentrateur solaire est un système basé sur la concentration du rayonnement solaire sur une petite zone pour obtenir une chaleur a température élevée. Cette chaleur est ensuite utilisée pour produire de l'électricité à travers un système classique turbine-générateur. Il existe deux types de concentration : linéaire et punctuality)[9].

### a. Concentration linéaire

Le réflecteur focalise les rayons solaires dans une ligne appelée la ligne focale comme les concentrateurs solaire de Fresnel et les concentrateurs solaire cylindro parabolique[9].

### b. Concentration ponctuelle

Le réflecteur focalise les rayons solaires dans un point appelé point focal comme les concentrateurs solaire paraboliques et des concentrateurs solaires à tour (les héliostats)[9].

### 1.4.1 Types de concentrateurs

Ils sont répartis en concentrateurs cylindro-paraboliques, en réflecteurs linéaires de Fresnel (LFR), en concentrateurs paraboliques et les héliostats (Figure 1.7)[11].

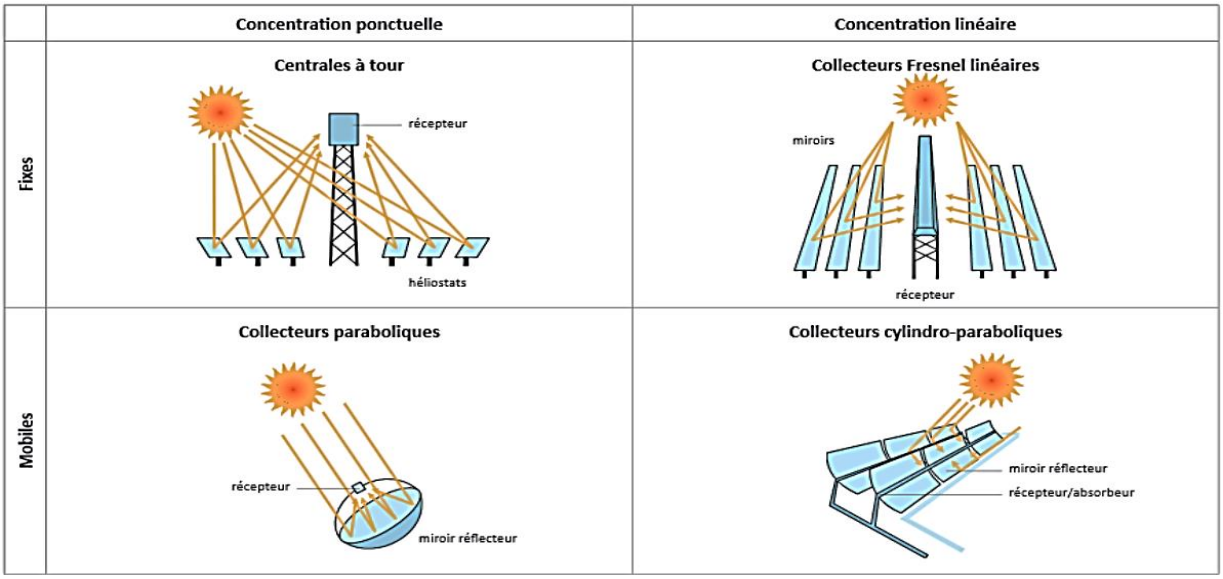



**Figure 1. 7 :** Types des concentrateurs solaires.

### 1.4.1.1 Capteurs paraboliques

Ils sont des concentrateurs ponctuels ayant une symétrie de révolution parabolique. Les rayons solaires réfléchis par la parabole convergent vers le foyer (Figure 1.8). Ils sont orientés grâce à des montures mobiles autour de deux axes (monture Alt azimutale et monture équatoriale). La nécessité de mobiliser la parabole suivant deux axes pour suivre la course du soleil est la limite principale de ce type de système. Le concentrateur parabolique couplé avec un moteur sterling (Dish-Stirling) est la technologie la plus utilisée pour la production d'électricité de faible puissance par conversion solaire thermodynamique. Les rendements des capteurs sont voisins de 75 %, les puissances des installations correspondent à la gamme 1-100 kWh, les taux de concentration de 6000 à 10000 permettent d'obtenir des températures de travail de 600°C à 1200°C. Le rendement instantané de conversion énergie solaire-électricité est supérieur à 22% (29 % pour le module de 25 kW du constructeur américain SES (Stirling Energy System) mais les coûts d'exploitation et de maintenance restent élevés[11].

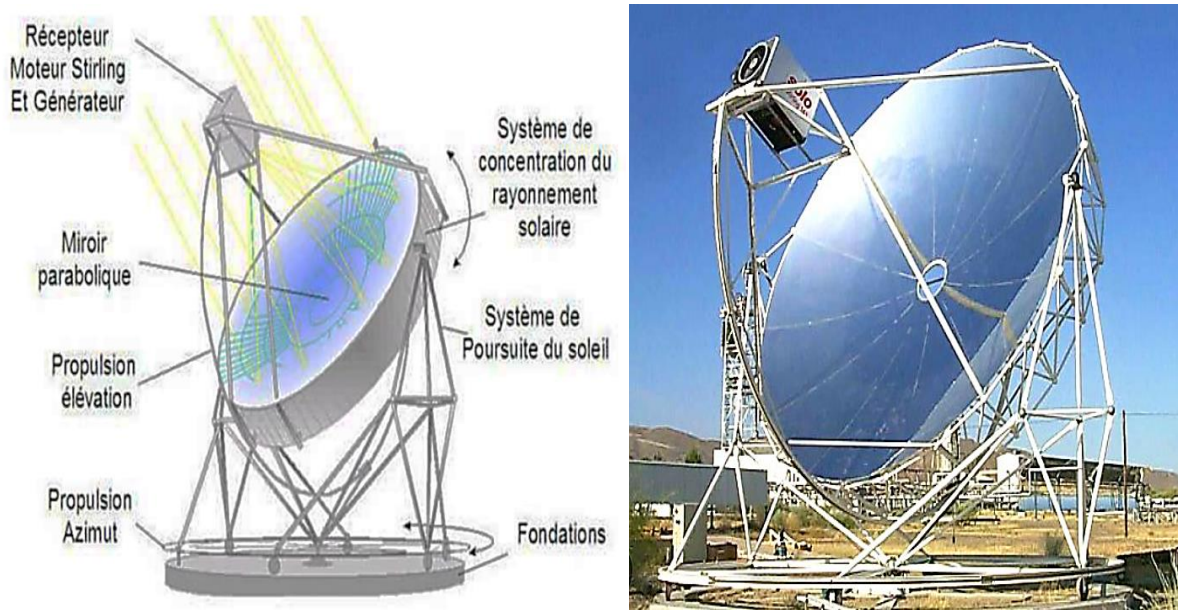



**Figure 1. 8 :** Concentrateur parabolique avec un moteur Stirling.

### 1.4.1.2 Capteurs à réflecteurs linéaires de Fresnel (LFR)

Ils est constitués des miroirs plans ou faiblement paraboliques disposées en lames parallèles qui sont susceptibles d'être inclinés sur un axe de manière à réfléchir et à concentrer les rayons lumineux vers une ligne ou se trouve le récepteur (Figure 1.9). Comparativement aux PTC, les LFR sont plus faciles à fabriquer, le système de suivi utilise des moteurs plus petits, la ligne focale est fixe, le montage du champ solaire est facilité et mieux utilisé (70% du sol peut être couvert de miroirs) . La performance optique des LFR est diminuée de 30 à 40% par rapport aux PTC[11].

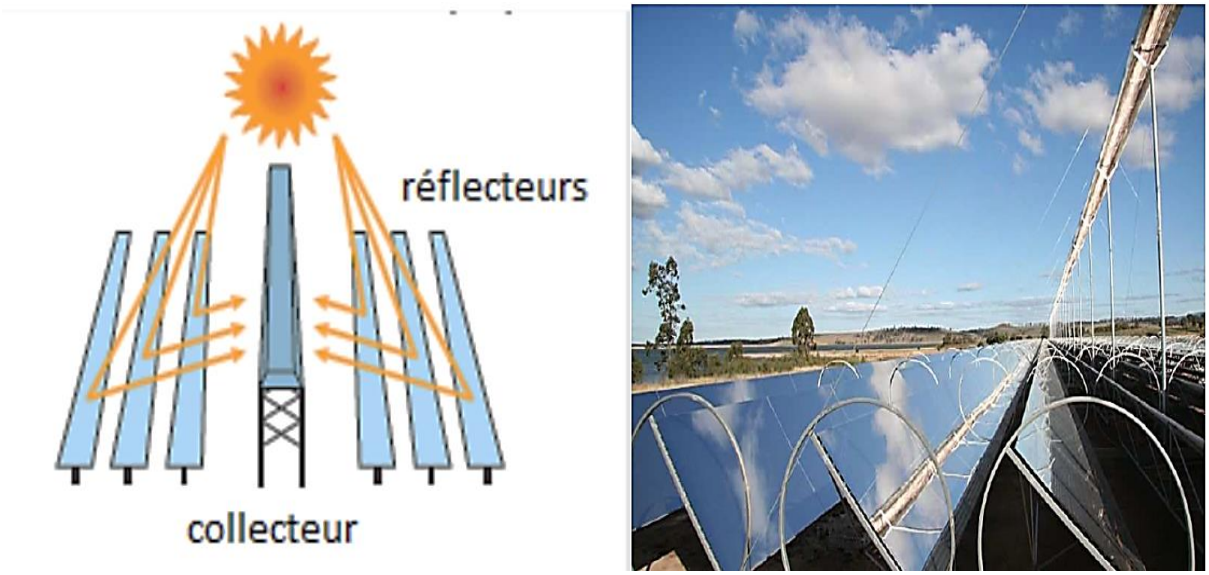



**Figure 1. 9 :** Concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel.

### 1.4.1.3 Héliostats

Les héliostats sont constitués d'un ou plusieurs miroirs réfléchissants plans ou légèrement concaves dont les surfaces sont comprises entre 50 $m^2$ et 150 $m^2$. Ils sont utilisés dans la technologie des tours solaires. Les miroirs sont montés sur une structure mécanique asservie à la trajectoire du soleil[11].



**Figure 1. 10 :** Héliostat de la centrale solaire de Thémis.

La monture la plus utilisée est la monture Alt azimutale mais il faut signaler aussi la monture rotation élévation (Non Focusing Imaging heliostat) développée par les malaisiens qui restent à l'état de prototype[11].

Les rayons réfléchis par un champ d'héliostats doivent être dirigés vers le récepteur (tour centrale). Les angles de suivi et d'incidence de l'héliostat peuvent être déterminés à partir de la méthode des vecteurs[11].

Le repère cartésien basé sur les directions Zénith, Est et Nord avec l'origine O à la base du récepteur (O, z, e, n) (voir Figure 1.11). La position de l'héliostat B est repérée par ses coordonnées $z_1$, $e_1$ et $n_1$. Le récepteurs site à une hauteur $z_0$ de l'origine[11].

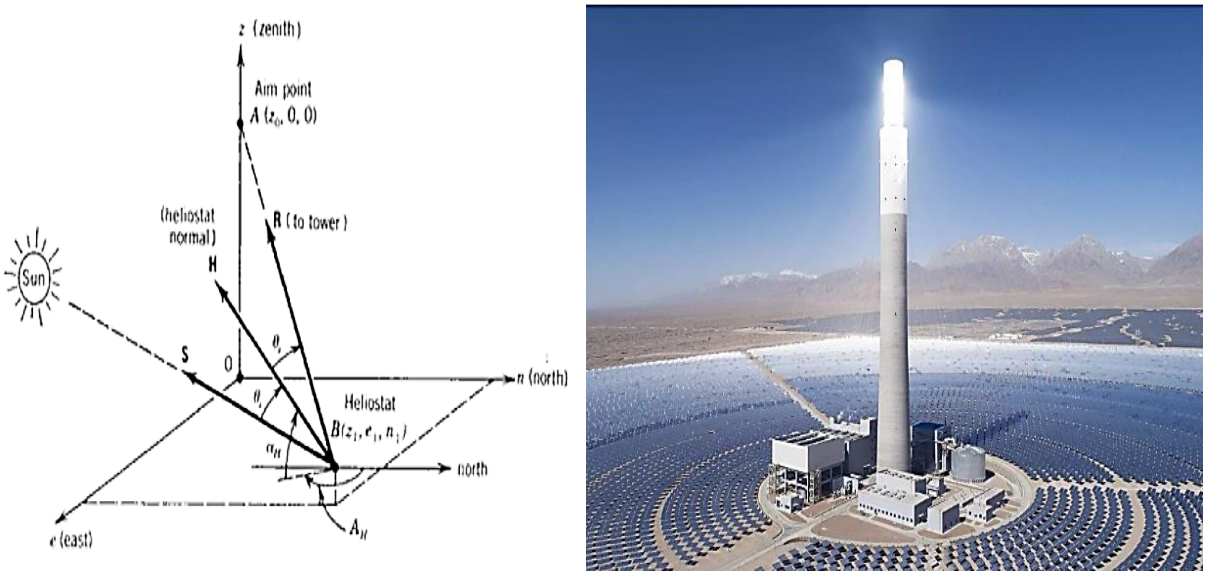



**Figure 1. 11 :** un Rayon solaire par un héliostat vers un point fixe.

### 1.4.1.4 Capteurs cylindro-paraboliques

La surface réfléchissante du concentrateur est un cylindre de section parabolique. Lorsqu'ils sont bien orientés vers le soleil, ils concentrent le rayonnement direct sur une ligne focale où se trouve le récepteur (Figure 1.12). Le mécanisme de poursuite du soleil se fait suivant un seul axe. Les concentrateurs cylindro-paraboliques peuvent être orientés suivant l'axe Est-Ouest ou l'axe Nord-Sud. Les concentrateurs orientés suivant l'axe Nord-Sud permettent de collecter plus d'énergie pendant l'été. L'orientation Est-Ouest permet une collecte d'énergie généralement supérieure. Les températures de travail varient de 270°C à 450°C et les rendements de conversion de ces capteurs sont voisins de 70% en régime nominal. Dans la pratique, les angles d'ouverture sont inférieurs à 20-30°. C'est la technologie la plus utilisée dans les centrales thermodynamiques[11].

## 1.5 Géométrie du Concentrateur cylindro-parabolique

Le collecteur (Concentrateur cylindro-parabolique) est une auge dont la section transversale a la forme d'une partie d'une parabole. Plus exactement, c'est une section symétrique d'une parabole autour de son bas[12].

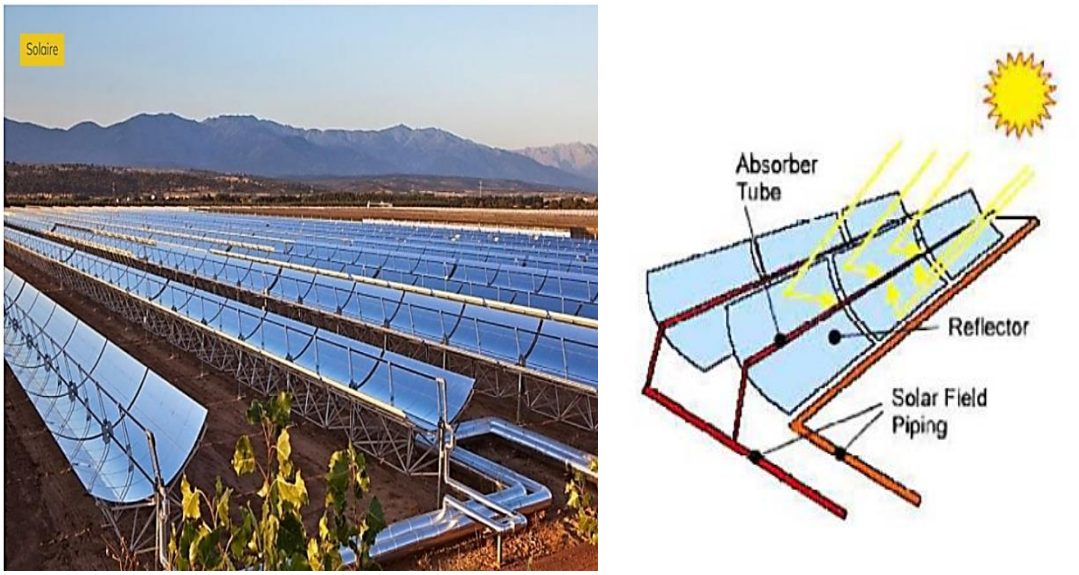



**Figure 1. 12 :** Concentrateur cylindro-paraboliques.

### 1.5.1 Concentration de rayonnement à un Concentrateur cylindro-parabolique

Les creux paraboliques ont une ligne focale, qui consiste en les points focaux des sections transversales paraboliques. Le rayonnement qui pénètre dans un plan parallèle au plan optique est réfléchi de manière à traverser la ligne focale (Figure 1.13)[12].

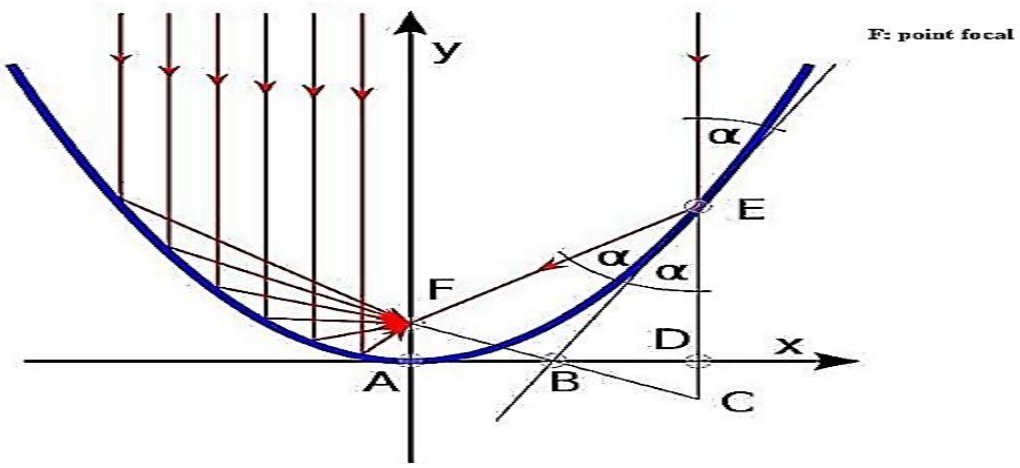



**Figure 1. 13 :** Chemin des rayons parallèles à un miroir parabolique.

Une preuve de l'existence d'un point focal est présentée sur la Figure 1.13 une représentation analytique appropriée d'une parabole (Eq 1.1)[12].

$$y = \frac{1}{4*\mathrm{f}}\mathrm{x}^2 \qquad (1.1)$$

Où : f est la distance focale, c'est-à-dire la distance entre le sommet de la parabole et le point focal.

### 1.5.2 Paramètres pour la description géométrique d'un Concentrateur cylindro parabolique

Pour décrire géométriquement un creux parabolique, il faut déterminer la parabole, la section de la parabole couverte par les miroirs et la longueur de l'auge. Les quatre paramètres suivants (Figure 1.14) sont couramment utilisés pour caractériser la forme et la taille d'un creux parabolique : longueur de creux, distance focale, largeur d'ouverture, distance entre une jante et l'autre, angle de la jante, c.-à-d la ligne entre le point focal et le bord du miroir[12].

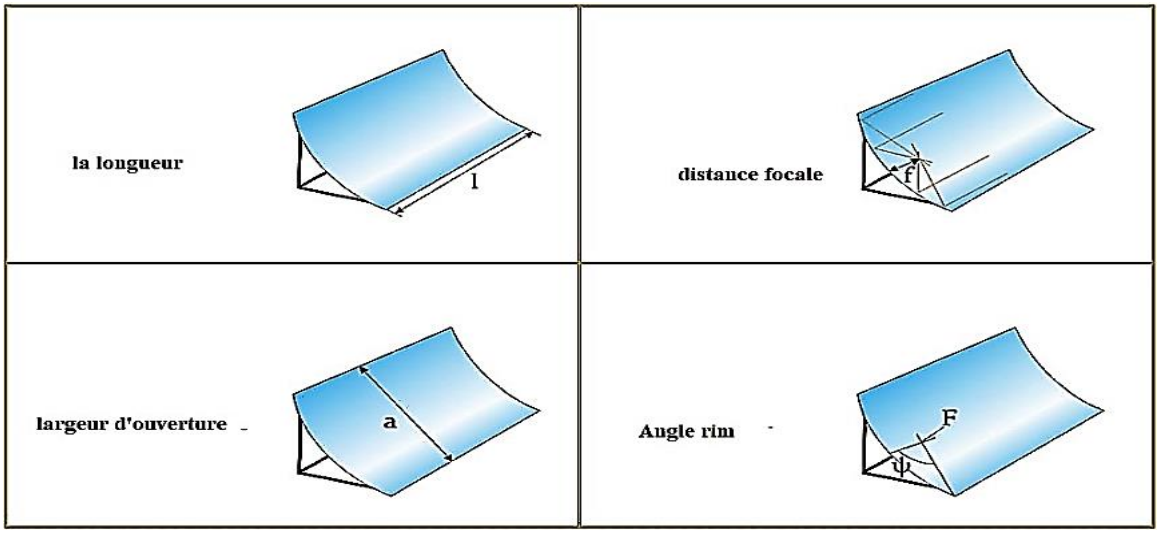



**Figure 1. 14 :** Paramètres géométriques Concentrateur cylindro-parabolique.

La longueur du creux est une mesure sans problème et n'a pas besoin d'explication. La distance focale (Figure 1.15), c'est-à-dire la distance entre le point focal et le sommet d'une parabole, est le paramètre qui détermine complètement la parabole (dans l'expression 1.1)[12].

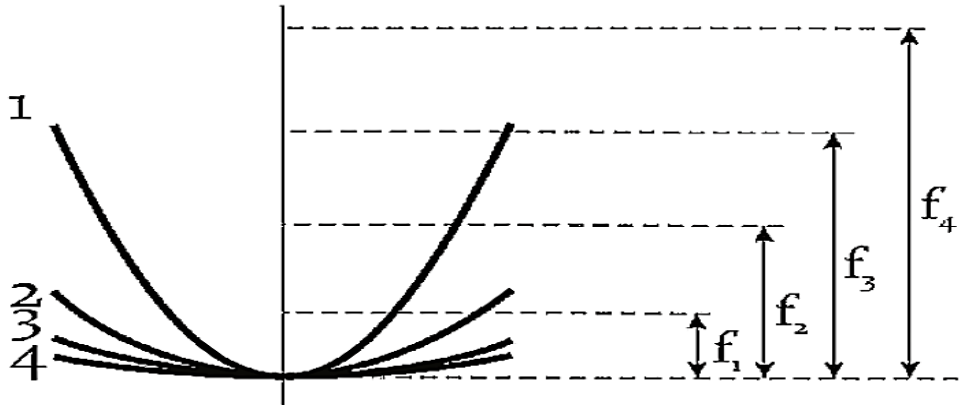



**Figure 1. 15 :** Longueur focale comme paramètre de forme.

L'angle de la jante (Rim angle), c'est-à-dire l'angle entre l'axe optique et la ligne entre le point focal et le bord du miroir, présente les caractéristiques intéressantes qui déterminent à lui seul la forme de la section transversale d'un creux parabolique. Cela signifie que les

sections transversales des auges paraboliques avec le même angle de jante sont géométriquement similaires. Les sections transversales d'une cuvette parabolique avec un angle de jante donné peuvent être rendues congruentes à la section transversale d'une autre cuvette parabolique avec le même angle de jante par une mise à l'échelle uniforme (agrandissement ou rétrécissement). Si seulement la forme d'une section transversale de collecteur est intéressante, mais pas la taille absolue, alors il suffit d'indiquer l'angle de la jante. Une preuve que les sections transversales des auges paraboliques ayant le même angle de jante sont géométriquement similaires est présentée sur la Figure 1.15[12].

Deux parmi les trois paramètres de l'angle de la jante, la largeur de l'ouverture et la distance focale sont suffisants pour déterminer complètement la section transversale d'un creux parabolique[12].

$\varphi r$ : peut-être exprimé en fonction du rapport entre la largeur de l'ouverture et la distance focale (Eq 1.2).

$$\tan \varphi r = \frac{\frac{\alpha}{f}}{2-\frac{1}{8}\left(\frac{\alpha}{f}\right)^2} \tag{1.2}$$

Où le rapport de la largeur d'ouvert ure à la distance focale peut être exprimé en fonction de l'angle de la jante (Eq 1.3).

$$\frac{\alpha}{f} = -\frac{4}{\tan \varphi r} + \sqrt{\frac{16}{\tan^2 \varphi r} + 16} \tag{1.3}$$

Le diagramme suivant (Figure 1.16) représente le rapport (a/f) en fonction de l'angle de lavante :

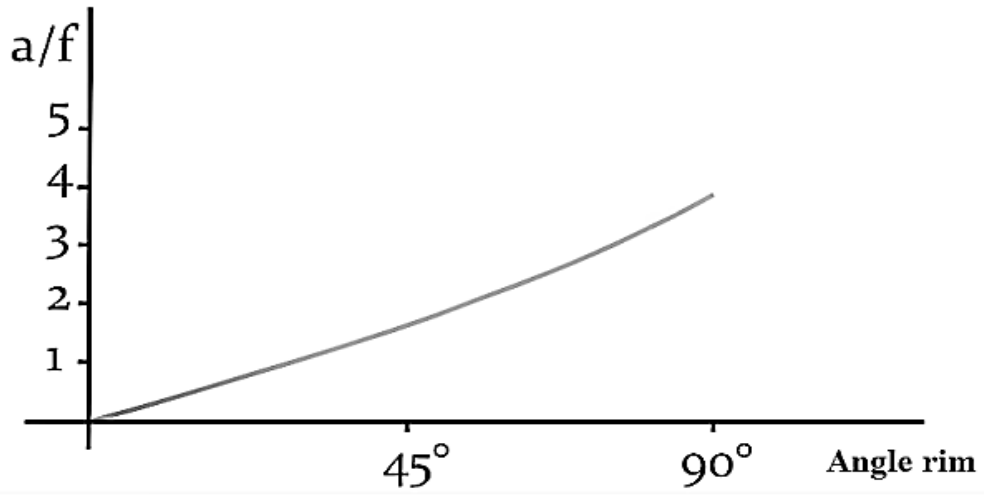



**Figure 1. 16 :** Relation entre l'angle de la jante et la valeur a / f.

## 1.6 Composent d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique

### 1.6.1 Réflecteur

Le réflecteur est le composent qui est utilisé pour refléter et diriger les rayonnements solaires vers le récepteur (Figure 1.17) afin d'atteindre des températures très élève. Il peut être en verre, en aluminium ou en polymère[13].

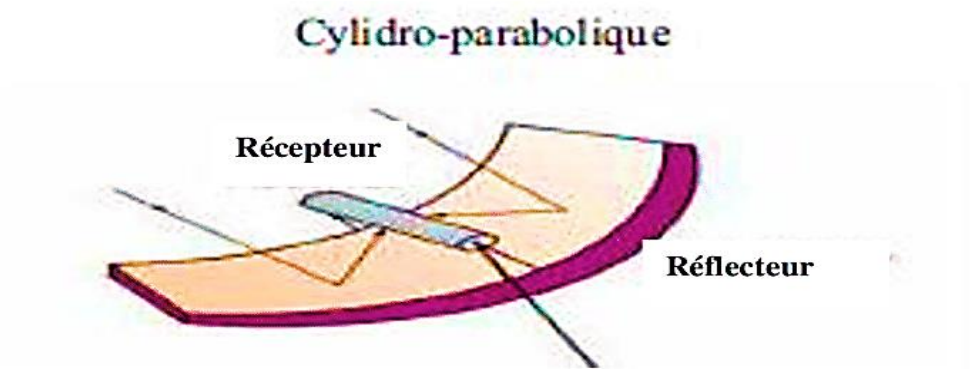



**Figure 1. 17 :**Principe de travail d'un réflecteur.

### 1.6.2 Absorbeur

L'absorbeur est le composent le plus important dans un concentrateur car il convertit les rayonnements solaires en chaleur. Il est situé le long de la ligne focale du concentrateur avec des dimensions spécifique pour diminue les pertes thermique (Figure 1.18)[13]).

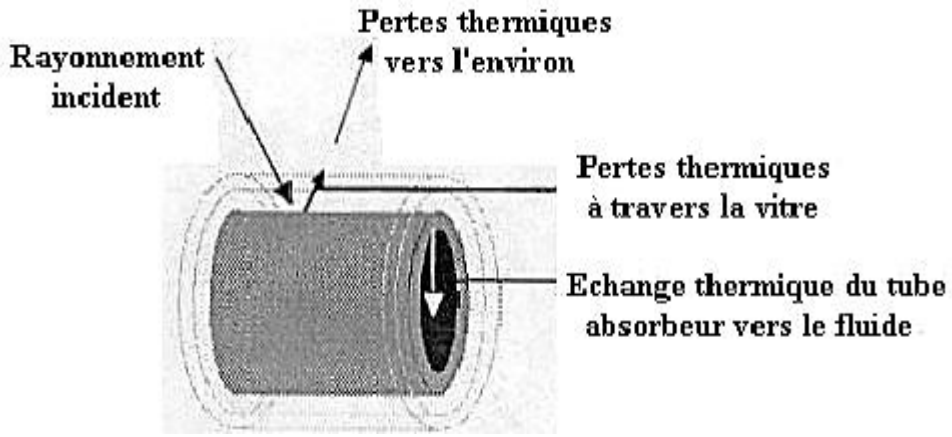



**Figure 1. 18 :** Absorbeur.

### 1.6.3 Fluide caloporteur

Le fluide caloporteur est le composent qui transport la chaleur dans l'absorbeur et de la transmettre vers là où elle doit être consommée ou stockée. Il peut être des huiles, l'eau, ou bien des gazes[13].

## 1.7 Systèmes de poursuite solaire

Le Systèmes de poursuite solaire permet d'orienter les panneaux photovoltaïques tout au long de la journée pour les gardes perpendiculaires aux radiations solaires afin de maximiser l'ensoleillement[12].

### 1.7.1 Types des suiveurs solaires

Il existe deux types de suiveurs solaires : passifs et actifs qui comportent les suiveurs mono-axe et double axe (Figure 1.19)[14].

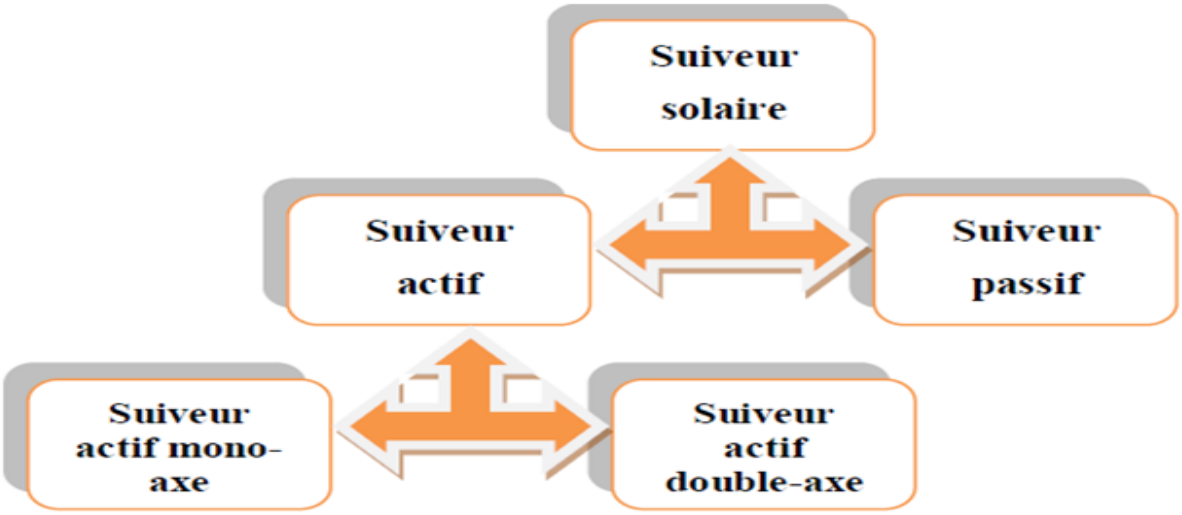



**Figure 1. 19 :** Types des suiveurs solaires.

#### 1.7.1.1 Suivi solaire passive

Les suiveurs passifs sont constitués de deux tubes en cuivre montés sur les côtés Est et Ouest du panneau PV (Figure 1.20). Le tube de matière cuivre (Figure 1.18) est rempli de fluides chimiques capable de se vaporiser à basse température. Donc, lorsque la température d'un côté du panneau augmente, le fluide dans le tube se vaporise. Cette opération de transfert de masse ajuste l'équilibre du panneau PV en le faisant tourner vers la source des rayons solaires. Ce type de suiveur ne consume aucune énergie pour le repositionnement du panneau[14].

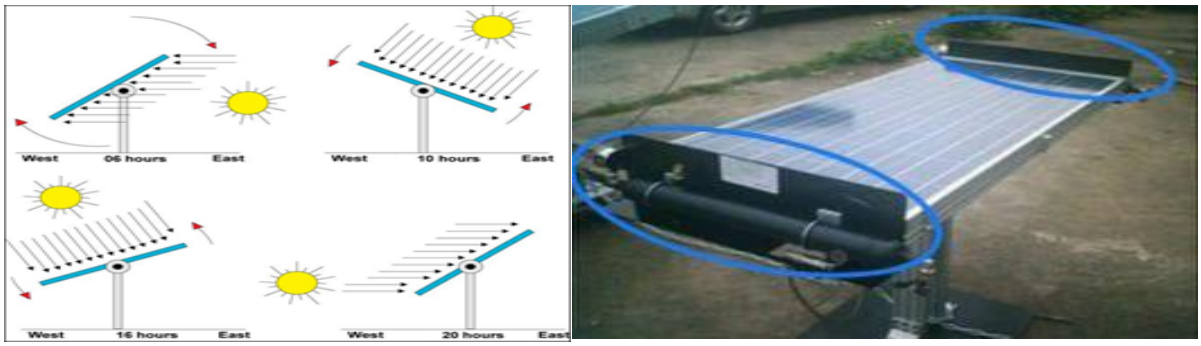



**Figure 1.20 :** Suiveur solaire passive.

#### 1.7.1.2 Suivi solaire actif

Les suiveurs solaires actifs suivi la trajectoire solaire afin d'optimiser au maximum l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface en utilisent le principe de la détection de lumière. L'avantage de ces derniers par rapports aux suiveurs passifs c'est qu'ils représentent une meilleure précision de suivi et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les ajuster. Il existe deux types : mono-axe et double-axe[14].

**a. Suivi actif a mono-axe**

Suivi actif a mono axe tourne dans un seul axe. Il est placé selon l'angle le plus abordable à recevoir un maximum de rayons de soleil, il est le plus souvent utilisé en raison de sa simplicité[15].

**b. Suivi actif double-axe**

Suivi actif a double-axe utilise deux moteurs pour avoir une rotation à deux axes, le premier assure la rotation en azimut (d'Est en Ouest) et l'autre l'inclinaison des capteurs (selon la saison et l'avancée du jour)[15].

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différents points que on doit savoir avant de réalise un concentrateur cylindro-parabolique. Nous avons commencé par les types des énergies renouvelable ensuite nous avons concentrés sur l'énergie solaire, les concentrateurs solaires ainsi que ces composent principale. On a clôturé le chapitre par le système de poursuite solaire.

Dans le chapitre suivant, nous basons sur l'étude expérimentale d'un concentrateur cylindro-parabolique

# CHAPITRE 02

## Partie matérielle et logicielle d’un concentrateur cylindro-parabolique

## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble du matériel mécanique utilisés pour la réalisation du concentrateur. Nous détaillerons également les équipements électroniques ainsi que leurs câblages au sein de notre système. Enfin, nous expliquerons les fonctionnalités des logiciels employés dans le cadre de cette réalisation.

## 2.2 Description du système

Le concentrateur cylindro-parabolique est un système permettant de valoriser l'énergie thermique en concentrant les rayons solaires sur sa ligne focale, afin de maximiser la température du liquide qui y circule, grâce à l'utilisation d'un bon réflecteur.

Pour assurer l'orientation optimale du concentrateur, nous avons utilisé des photorésistances de type LDR , disposées de manière à ce que leur éclairement soit identique uniquement lorsque le système est perpendiculaire au soleil.

Le signal de ces capteurs est transmis à un microcontrôleur (Arduino UNO) que le système est perpendiculaire au i compare les valeurs de tension afin de commander un moteur pas à pas Nema 34, permettant ainsi de faire tourner le concentrateur dans la direction du Soleil.

L'ESP32 permet également de contrôler à distance la température du fluide, à l'aide d'un capteur de température DS18B20.

## 2.3 Partie électrique

### 2.3.1 Arduino UNO

L'Arduino UNO est une carte microcontrôleur fondée sur le chipset ATmega328P. Elle comprend 14 broches numériques d'entrée/sortie (dont 6 capables de générer des signaux PWM), 6 entrées analogiques, ainsi qu'un résonateur céramique de 16 MHz. Elle dispose aussi d'une connexion USB, d'un port d'alimentation, d'un en-tête ICSP pour la programmation et d'un bouton de réinitialisation (Figure 2.1). Ce modèle est conçu pour être facile à utiliser, avec la possibilité de le connecter à un ordinateur via USB ou de l'alimenter par un adaptateur AC-DC. Le nom "UNO" signifiant "un" en italien, marque la sortie de la version 1.0 du logiciel Arduino (IDE) et cette carte devient ainsi le modèle de référence pour la plate-forme Arduino[16].

#### 2.3.1.1 Avantage de l'Arduino UNO

- La carte Arduino UNO est la plus répandue et permet déjà un large éventail de possibilités**[17]**;
- Elle dispose de caractéristiques techniques suffisantes pour bien débuter en programmation[17];
- La carte est facile à utiliser, ce qui la rend accessible à tous[17] ;

- Elle se connecte très facilement à un ordinateur via un câble USB fourni[17] ;
- La carte est facile d'accès, étant disponible un peu partout sur Internet à un prix abordable[17].

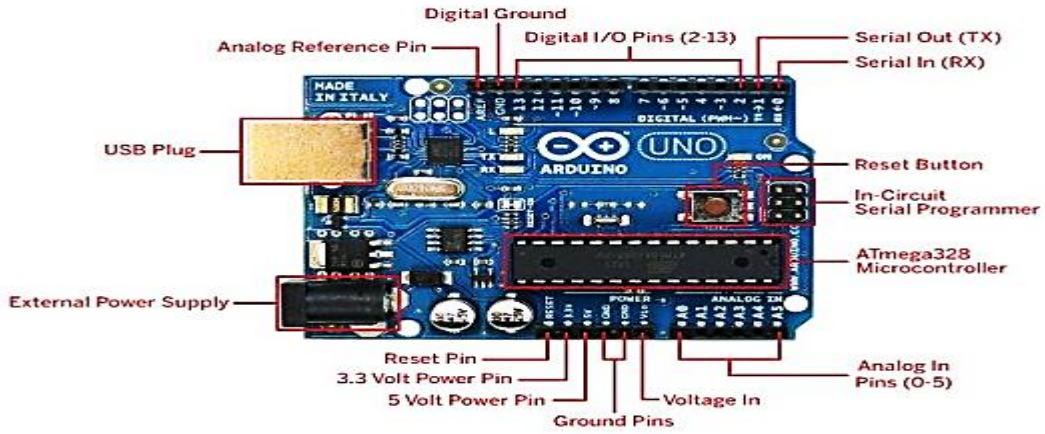



**Figure 2. 1 :** Carte Arduino UNO.

### 2.3.1.2 Caractéristiques d'Arduino UNO

Le tableau suivant exprime les caractéristiques de la carte Arduino UNO[18].

**Tableau 2. 1 :** Caractéristique de l'Arduino UNO.

| | |
|---|---|
| Microcontrôleur | ATmege328 |
| Tension de fonctionnement | 5 V |
| Tension d'alimentation | 7-12 V |
| Tension d'alimentation (recommandées) | 6-20 V |
| Broches numérique entrée/sortie | 14 |
| Broches d'entrée analogique | 6 |
| Intensité maximale | 40 mA |
| Mémoire flash | 32 KO |
| Mémoire SRAM | 2 KO |

| | |
|---|---|
| Mémoire EEPROM | 1 KO |
| Fréquence d'horloge | 16 MHz |

### 2.3.2 Carte ESP32

La carte ESP32 est une carte de développement électronique open-source basée sur une puce microcontrôleur (Figure 2.2) double mode Wi-Fi et Bluetooth à faible coût et à faible consommation d'énergie, hautement intégrée, développée par Expressif System qui est un autre leader mondial dans le domaine du développement de microcontrôleurs, basée à Shanghai, en Chine, elle commercialise ses puces, modules et cartes de développement des séries Esp8266 et Esp32 dans le monde entier depuis 2008[19]

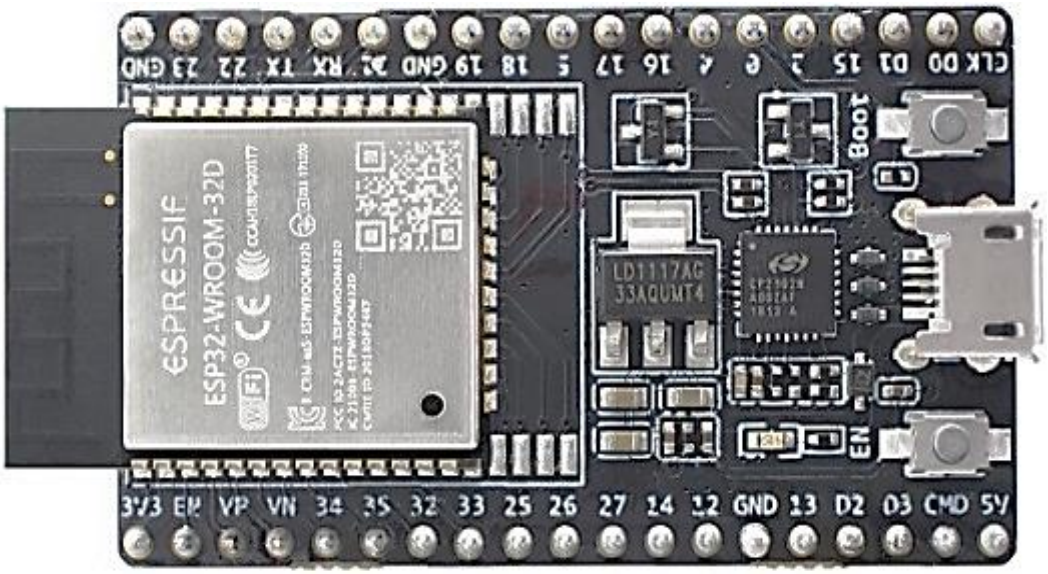



**Figure 2. 2 :** Carte ESP32.

#### 2.3.2.1 Avantage de l'ESP 32

- **Wifi et Bluetooth intégrés :** l'ESP32 intègre des modules Wifi 2,4 GHz et Bluetooth4.2, éliminant le besoin d'une puce externe, simplifiant le processus de développement et réduisant les coûts matériels[20].
- **Performances sans fil puissantes :** l'ESP32 prend en charge une variété de protocoles sans fil, notamment TCP/IP, MQTT, HTTP, etc., et possède une bonne force et stabilité du signal, ce qui le rend capable de divers scénarios d'application sans fil[20].
- **Conception à faible consommation :** l'ESP32 adopte une conception à faible consommation et prend en charge plusieurs modes de veille, ce qui peut prolonger efficacement la durée de vie de la batterie, idéal pour les appareils IOT alimentés par batterie[20].

- **Prend en charge plusieurs langages de programmation :** ESP32 prend en charge une variété de langages de programmation, notamment C/C++, Python etc., ce qui offre aux développeurs des choix flexibles[20].
- **Prix bas :** l'ESP32 est très abordable, ce qui en fait le meilleur choix pour les développeurs IOT[20].

#### 2.3.2.2 Caractéristique technique

Le tableau suivant représente les caractéristiques de la carte ESP32[21].

**Tableau 2. 2 :** Caractéristiques de ESP32.

| | |
|---|---|
| Micro-contrôleur | Double cœur |
| Processeur principale | 160 MHz |
| Coprocesseur | 240 MHz |
| Wifi | 802.11 b/g/n |
| Bluetooth | V4.2 |
| Mémoire flash | 32 MO |
| Mémoire RAM | 520 KO |
| Broche d'entrée/sortie | 34 |
| Alimentation | 3.3V |

### 2.3.3 Photo résistance LDR

La photo résistance ou LDR est un composant électronique qui change sa résistance en fonction de la lumière qu'il reçoit (Figure 2.3). Chaque fois que la lumière tombe sur le capteur LDR, sa résistance commence à diminuer et quand il fait sombre, sa résistance commence a augmenter. En utilisant la valeur de la résistance, on peut facilement détecter s'il y a de la lumière ou non[22]. La photorésistance est constituée d'un matériau semi-conducteur sensible à la lumière, comme le sulfure de cadmium ou le sélénium. Lorsque la lumière frappe le matériau, il libre des électrons qui réduisent la résistance du composant. Elle a deux pattes qui peuvent être connectées a un circuit électrique. Ce module permet de détecter la direction de la source lumineuse (le soleil) et d'orienter les panneaux photovoltaïques afin de maximiser leur exposition au soleil[23].

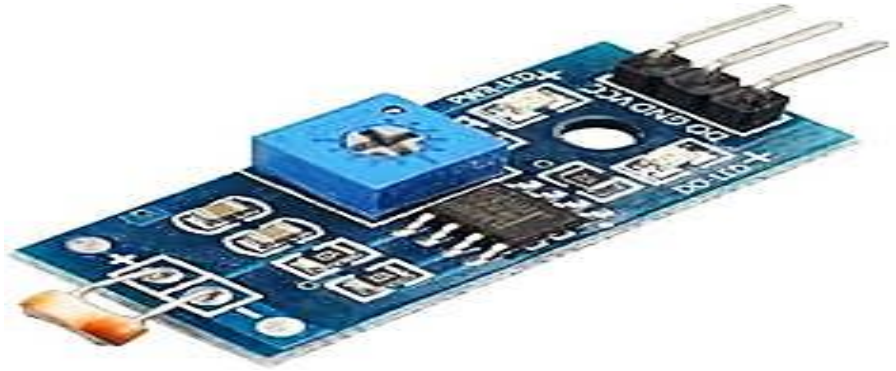


**Figure 2. 3 :** Photo résistance module LDR.

### 2.3.4 Moteur pas-a-pas Nema-34-86HSE8N-BC38

Le moteur pas à pas est un moteur à courant continu (Figure 2.4) dont la rotation est divisée en un certain nombre de pas, en fonction de sa structure interne. En général, une rotation complète de 360 degrés est divisée en 200 pas, ce qui signifie qu'un pas correspond à une rotation de 1.8 degré. Il existe également des moteurs dont les pas sont de 2, 2.5, 5, 15 ou 30 degrés[24].



**Figure 2. 4 :** Moteur pas-a-pas NEMA 34.

#### 2.3.4.1 Principe de fonctionnement

Le moteur pas à pas est un convertisseur électromécanique qui transforme des signaux électriques (impulsions ou trains d'impulsions) en déplacements mécaniques (angulaires ou linéaires). Lorsqu'un courant circule dans les enroulements du stator, il génère un champ magnétique vectoriel. Ce champ force le rotor à s'aligner avec sa direction, provoquant ainsi une rotation par pas. À chaque impulsion électrique reçue, le moteur effectue un pas, c'est-à-dire une rotation d'un angle déterminé. Le déplacement angulaire est donc proportionnel au nombre d'impulsions, et la vitesse de rotation dépend de la fréquence de ces impulsions. En modifiant l'ordre d'alimentation des enroulements, on peut inverser le sens de rotation du moteur[25].

Le moteur pas à pas à couple élevé fonctionne généralementavec le pilote HSS86 présente sur la Figure 2.5[26].




**Figure 2. 5 :** Kit complet de moteur NEMA34.

### 2.3.5 Driver DM860H

Le pilote DM860H est similaire au HSS86,est principalement utilisé pour contrôler le fonctionnement du moteur Nema 34[27]. Il est composé de deux sous-blocs intégrés (Figure 2.6), chacun ayant un rôle spécifique :

- Bloc d'alimentation.
- Bloc de connexion avec le contrôleur.




**Figure 2. 6 :** Driver DM860H.

### 2.3.5.1 Bloc d'alimentation

Le bloc d'alimentation est le bloc qui gère l'alimentation électrique du système (Tableau 2.3)[28] :

**Tableau 2. 3 :** Connexion de bloc d'alimentation de driver avec le moteur.

| N° de port | Désignation | Description | Couleur du fil du moteur |
|---|---|---|---|
| 1 | A+ | Enroulement phase A+ | Rouge |
| 2 | A- | Enroulement phase A- | Vert |
| 3 | B+ | Enroulement phase B+ | Jaune |
| 4 | B- | Enroulement phase B- | Bleu |
| 5 | AC1 | Tension d'entrée | AC 20-80V |
| 6 | AC2 | Tension d'entrée | DC 30-110V |

### 2.3.5.2 Bloc de connexion avec le contrôleur

C'est le bloc qui permet la communication entre le pilote et l'Arduino (Tableau 2.4)[28].

**Tableau 2. 4 :** Connexion de driver a l'Arduino.

| Signal du pilote HSS86 | Fonction | Broche numérique d'Arduino |
|---|---|---|
| PULL+ | Signal d'activation du pilote | Pin 9 |
| DIR+ | Activation de direction de moteur | Pin 10 |
| ENA+ | Signal de déconnexion se moteur | Pin 11 |
| PULL- | Masse (GND) | GND |
| DIR- | Masse (GND) | GND |
| ENA- | Masse (GND) | GND |

### 2.3.6 Capteur de température DS18B20

Le DS18B20 étanche est un capteur de température numérique idéal pour les mesures à distance ou dans des environnements humides (Figure 2.7). Il offre une plage de température allant de -55°C jusqu'à 125 °C (recommandé sous 100 °C en raison du câble en PVC) et fonctionne avec une interface 1-Wire, permettant de connecter plusieurs capteurs sur un même bus. Il offre une résolution configurable de 9 à 12 bits et est compatible avec des systèmes de 3,0V à 5,5 V. Ce capteur est utile pour des applications comme le contrôle HVAC, la surveillance de température dans les bâtiments et les équipements, et le contrôle des processus industriels[29][ 30].



**Figure 2. 7 :** Capteur de température DS18B20.

### 2.3.7 Capteur DHT11

Le capture DHT11 permet de mesurer une grandeur physique accessible à tous (a température et l'humidité) a 3 broches (Figure 2.8). Il communique avec l'Arduino très simplement au travers d'une de ses entrées numériques. Les 2 autres broches sont pour son alimentation 5 V et la masse (GND)[31].

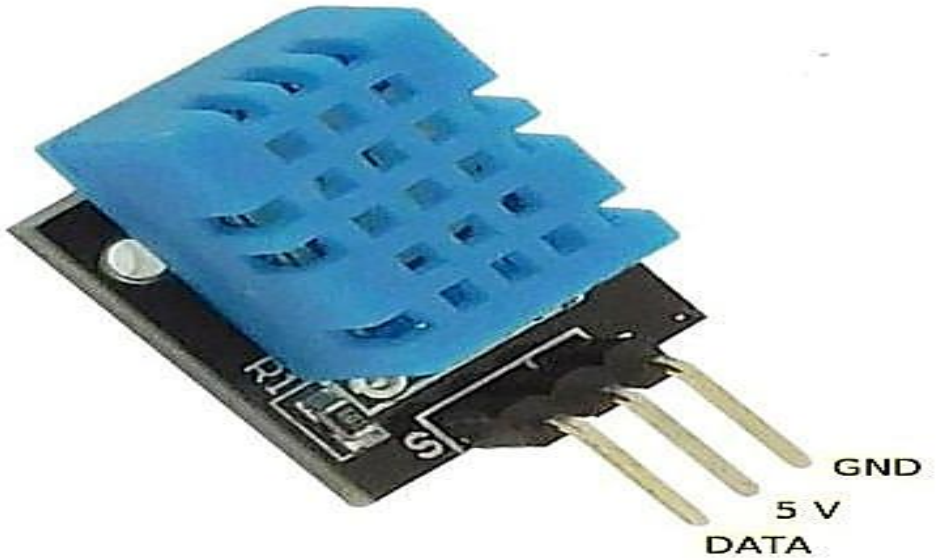



**Figure 2. 8 :** Capteur DHT11.

## 2.4 Partie mécanique

### 2.4.1 Réflecteur

D'après notre recherche théorique, nous avons choisi comme un réflecteur une tôle galvanisée traitable de 3 mm d'épaisseur et à faible inclinaison. Notre réflecteur soutenu sur un support rigide fixé au sol. Pour une meilleure réflexion nous avons pensé à un matériau réfléchissant performant et avons utilisé des plaques de verre miroir (Figure 2.9). La largeur de la plaque est de 5 cm et sa longueur de 50 cm[32].



**Figure 2. 9 :**Miroirs utilise comme réflecteur

### 2.4.2 Absorbeur

Pour le récepteur onchoisi le cuivre (360 W/°k.m²) comme dispositif absorbant pour sa bonne conductivité. Il s'agit d'un tube de 20 mm de diamètre extérieur et de 70 cm de longueur, percé d'un trou pour le remplissage d'eau (Figure 2.10). L'absorbeur est situé a la ligne focal de concentrateur[33].



**Figure 2. 10 :** Tube de cuivre choisi comme un récepteur**.**

## 2.5 Partie logicielle

### 2.5.1 Ray Optics simulation

Ray Optics simulation est un logiciel open source qui décrit la propagation de la lumière a l'aide des rayons lumineux selon les principes de l'optique géométrique. Il s'intéresse plus généralement à la manière dont la lumière se propage, se réfléchit et se réfracte, ainsi qu'à la formation d'images. En optique géométrique, le rayon lumineux est une abstraction permettant de représenter approximativement le trajet de la lumière. Grâce à cette représentation, le logiciel nous permet de simuler et d'analyser la trajectoire des rayons solaires sur notre concentrateur, ce qui peut être utile pour en estimer les dimensions de manière approximative[34].

Le logiciel propose différents types de sources lumineuses, des interfaces de réflexion, ainsi que divers obstacles que les rayons peuvent traverser ou rencontrer (Figure 2.11)[34].

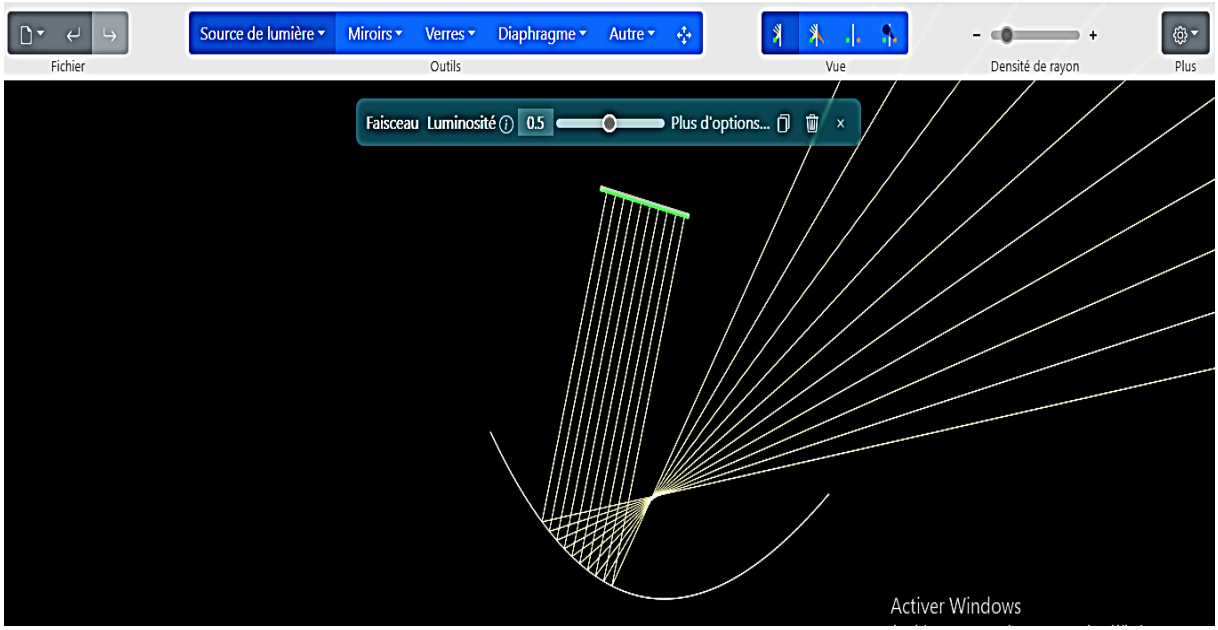



**Figure 2. 11 :** Interface de Ray Optics simulation.

### 2.5.2 Matlab

MATLAB (Matrix Laboratory) est une plateforme de calcul numérique et de programmation utilisée par des millions d'ingénieurs et de scientifiques pour analyser des données, développer des algorithmes et créer des modèles. Il est basé sur le calcul matriciel numérique grâce à son langage de programmation qui permet d'exprimer directement les fonctions mathématiques sous forme de tableaux et de matrices. L'environnement MATLAB se présente comme un espace de travail dans lequel un interpréteur de commandes exécute les opérations demandées (Figure 2.12)[35].

Avec MATLAB, il est possible de créer des scripts, des fonctions et des classes, ainsi que d'explorer, modéliser et visualiser des données sous forme de graphiques[35].

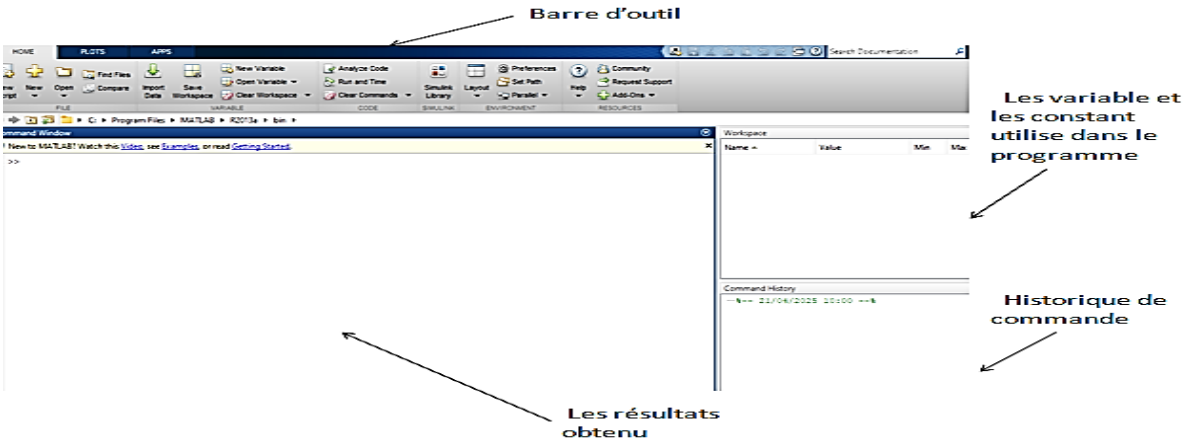



**Figure 2. 12 :** Interface de MATLAB.

### 2.5.3 Arduino IDE

Le logiciel Arduino IDE (Environnement de Développement Intégré) est un open source et gratuit, téléchargeable sur le site officiel d'Arduino. Il utilise l'un des langages de programmation les plus facile grâce à sa simplicité d'utilisation et à ses bibliothèques complètes et prêtes à l'emploi (Figure 2.12). Ce langage autorise aux débutants de se lancer dans la programmation et le développement de projets sans nécessiter de formation avancée[36].

L'Arduino IDE permet de :

- Ecrire et éditer un programme (en langage C);
- Compiler le programme (du langage C vers le langage du microcontrôleur);
- Envoyer le programme a la mémoire de l'Arduino (via le port USB de l'ordinateur);
- Communiquer avec la carte Arduino grâce au terminal (ou moniteur série).

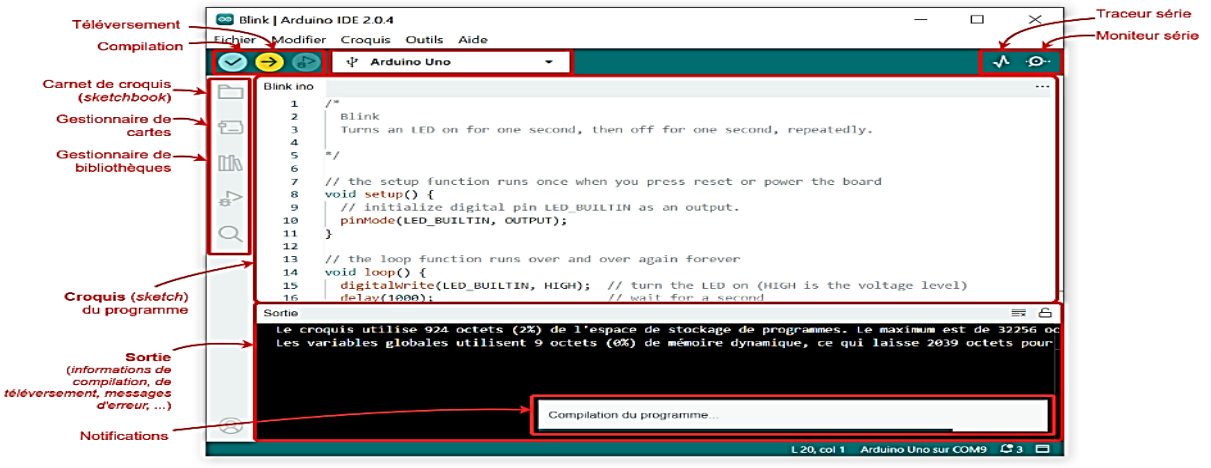



**Figure 2. 13 :** Interface de l'Arduino IDE.

### 2.5.3.1 Injection d'un programme dans l'Arduino IDE

Dans l'Arduino IDE on peut injecte un programme avec les étapes suivantes :

- Télécharger et ouvrir logicielle Arduino IDE ;
- Choisir la carte correspond dans Tool ensuite board (dans notre travail on a choisi ESP32 Dev Module (Figure 2.14)) ;

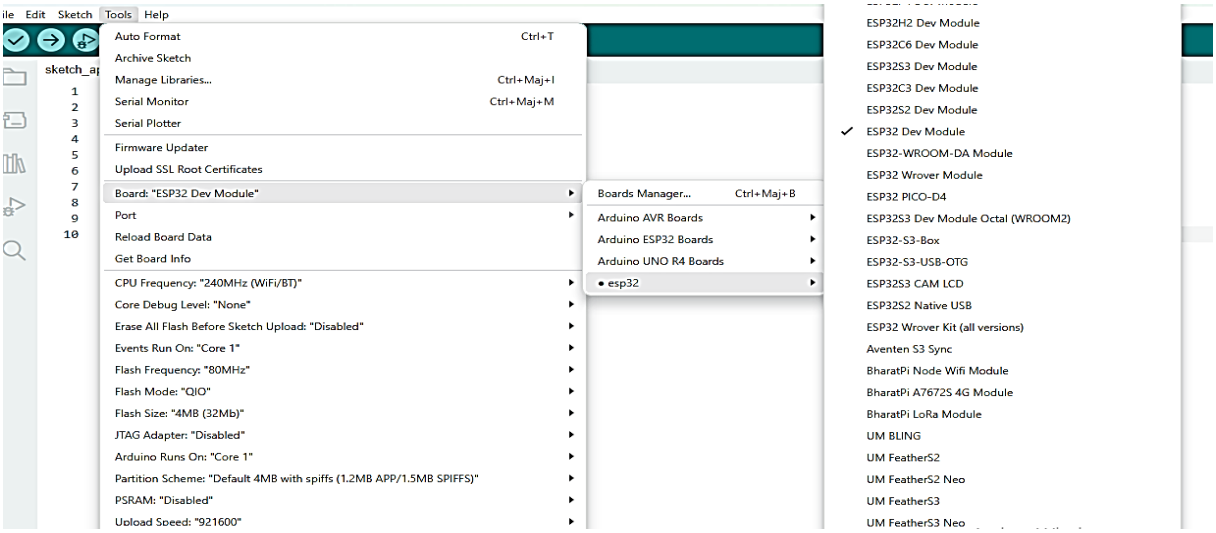



**Figure 2. 14 :** Sélection de carte.

- Écrire le programme dans le croquis ;
- Vérifier le programme avec l'icône de compilation ;
- Envoyer le programme a la carte avec l'icône de téléversement ;
- Tester si le programme marche dans Tools ensuit serial monitor.

### 2.5.3.2 Langage de programmation

Un programme Arduino est un ensemble d'instructions de base écrites sous forme de texte, ligne par ligne. La carte lit ces instructions, puis les exécute les unes après les autres, dans l'ordre défini par les lignes de code.

#### 2.5.3.2.1 Commentaire

Les commentaires en programmation sont des lignes de code qui ne sont pas exécutées pendant l'exécution du programme. Ils sont seulement servis à documenter et à expliquer le code aux personnes qui le lisent, que ce soit pour le comprendre, le modifier ou le maintenir. Il y a deux type de commentaire :

- Commentaire dans une seule ligne : //…… ;
- Commentaire dans plusieurs ligne : /*……*/.

#### 2.5.3.2.2 Variables

En programmation Arduino, on utilise différents types de variables pour stocker les données. Voici les types les plus courants :

- **int** : un entier (nombre sans virgule);
  Exemple : intmonEntier = 12;
- **float** : un nombre à virgule flottante (avec une précision limitée) ;
  Exemple :floatmonFlottant = 3.14;
- **double** : un nombre à virgule flottante en double précision ;
  Exemple : double monDouble = 3.141592653589793238;
- **char** : un caractère unique;
  Exemple :charmonCaractere = 'A';
- **bool** : une valeur booléenne soittrue (vrai) soit false (faux);
  Exemple :boolmonBooleen = true;
- **String** : une chaîne de caractères (plusieurs lettres ou mots);
  Exemple :StringmaChaine = " Télécommunication ".

#### 2.5.3.2.3 Configuration des entrée/sortie

Les broches numériques de la carte Arduino peuvent être configurées soit en entrée (INPUT), soit en sortie (OUTPUT). Pour cela, on utilise la fonction **pinMode(Nom, Etat)**, où :

- **Nom :** est le nom ou le numéro de la broche (ou une variable qui y est associée) ;
- **Etat** : est soit INPUT pour une entrée, soit OUTPUT pour une sortie.

Par exemple, pour déclarer une broche utilisée pour un moteur pas à pas en sortie, on écrira dans la fonction setup() :

```
void setup() { pinMode(stepPin, OUTPUT);}
```

#### 2.5.3.2.4 Configuration de boucle loop()

La fonction **loop()** est le cœur du programme Arduino. Elle s'exécute en boucle, c'est-à-dire qu'une fois arrivée à la fin, elle recommence automatiquement depuis le début indéfiniment.

Voici quelques éléments essentiels utilisés dans cette boucle :

- **digitalWrite(Nom, Etat)** : cette fonction permet d'envoyer un signal numérique à une broche configurée en sortie (OUTPUT).
  - **Nom :** est la broche concernée.
  - **Etat :** est soit HIGH (5V) soit LOW (0V).

- **delay(temps)** : permet de mettre en pause l'exécution du programme pendant un certain temps, exprimé en millisecondes (1 seconde = 1000 millisecondes).

- **if (condition)** : une structure conditionnelle qui permet d'exécuter un bloc d'instructions uniquement si une condition est vraie.

### 2.5.4 Site web de température

Le site web de température (Figure 2.15) a été développé afin d'afficher la courbe de température du fluide en temps réel.




**Figure 2. 15 :** Site web de température.

### 2.5.5 Serial Bluetooth Terminal

Serial Bluetooth Terminal est l'application que nous avons utilisée afin d'afficher en temps réel la valeur numérique de la température du fluide.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents éléments électroniques et logicielles utilisés dans notre projet, accompagnés d'une description générale a leur fonctionnement avec des schémas explicatifs pour chaque composant, ainsi que des instructions détaillées sur leur connexion à la carte ESP32. Nous avons également décrit les matériaux intégrés dans la partie mécanique du concentrateur cylindro-parabolique.

Nous abordons, dans le chapitre suivant, la réalisation du système, suivis d'une évaluation des résultats obtenus.

# Chapitre 03

Expérimentation et résultats

## 3.1 Introduction

Ce chapitre décrit la fabrication d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique basé sur un modèle théorique simulé. L'expérimentation, réalisée au sein du Centre de Développement des Technologies Avancées CDTA, inclut des essais en extérieur pour mesurer la température. Les résultats ont été collectés, organisés dans un tableau, puis représentés graphiquement pour analyse..

## 3.2 Elément constitutifs du prototype

L'étude d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique est composé d'un cinq éléments principaux :

- Le réflecteur ;
- Le point focal ;
- Le système de suivi solaire ;
- Le support de fixation au sol ;
- Le système de Télécommunication ;

## 3.3 Simulation

Avant d'entamer la fabrication du concentrateur solaire, une simulation préalable de ses dimensions a été réalisée afin de garantir une précision optimale. Cette étape a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB, à travers le développement d'un programme permettant de calculer et de tracer le point focal ainsi que l'angle d'ouverture en fonction des dimensions géométriques du concentrateur,(Figure 3.1).

dimension_simulation.m

```
clear all;
close all;
clc;
x=-0.5:0.01:0.5;    %%% width = 1 metre     c'est pour assurer l'alure de la courbe cylindro-parabolique
                                            %%% toujour fait x=-w/2:0.01:+w/2

d=0.25;             %%% depth = 0.25 metre
w=1;                %%% c'est exactement le width
y=(d./((0.5*w).^2)).*x.^2;

f=(w^2)/(16*d);    %%% point focale
rim_angle=acosd(((2*f)/sqrt((0.5*w)^2+(d-f)^2)-1))   %%% l'angle d'ouverture
plot(x,y)
hold on
plot(x(51),f,'*r')  %%% tracée du point focale (le foyé)
```

**Figure 3. 1 :** Programme de la dimension de concentrateur.

D'après les résultats générés par le programme (Figure 3.2), il apparaît que, pour un concentrateur d'une longueur de 1 mètre et d'une profondeur de 0,25 mètre, le point focal est positionné de manière optimale, avec un angle d'ouverture de 90°.

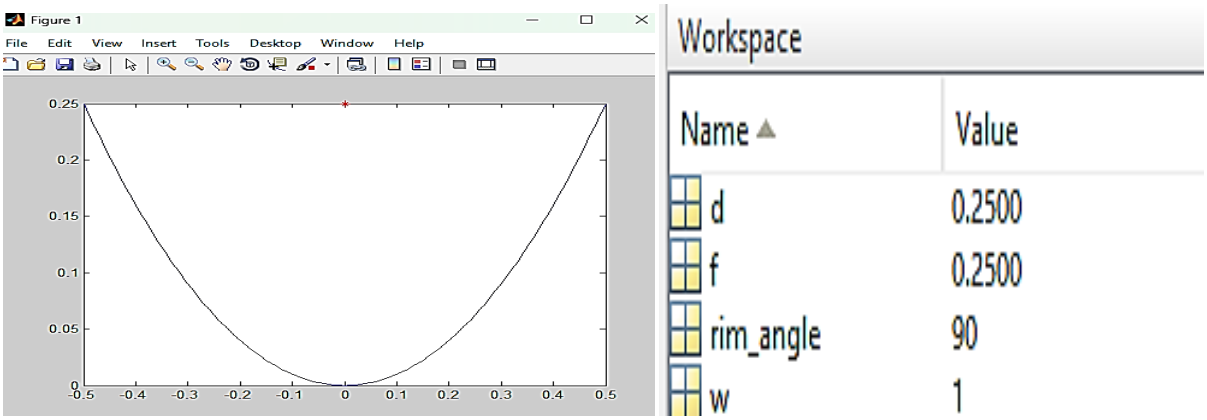



**Figure 3. 2 :** Résultat de programme**.**

## 3.4 Réalisation

Cette étape est dédiée à la mise en œuvre expérimentale de notre étude. Elle décrit en détail le matériel et les équipements spécifiques employés, ainsi que les étapes méthodologiques rigoureuses suivies pour garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus, dans le but de valider nos hypothèses de travail et de répondre aux objectifs de recherche définis

### 3.4.1 Réflecteur cylindro-parabolique

Afin d'obtenir la géométrie cylindro-parabolique du réflecteur, une plaque galvanisée d'une épaisseur de 3 mm, d'une longueur de 1 mètre et d'une largeur de 50 cm a été sélectionnée, comme illustré sur la photo n°1.Cette plaque a été mise en forme à l'aide d'une machine spécifique (photo n°2), ce qui a permis d'obtenir une courbure conforme aux exigences, avec une profondeur de 25 cm (photo n°3).Des supports ont ensuite été ajoutés pour garantir la stabilité et la conservation de la forme obtenue, comme le montre la photo n°4.Cela se reflète dans la forme finale illustrée par la Figure n°3.3.




**Figure 3. 3 :** Étapes de mise en forme du réflecteur solaire.

Dans le but d'optimiser la réflexion des rayons solaires, 24 panneaux de miroirs en verre ont été soigneusement installés, formant une surface réfléchissante homogène. Cette configuration vise à concentrer l'ensemble du rayonnement incident provenant de la source vers le tube collecteur placé le long de la ligne focale, comme le montre la Figure 3.4.

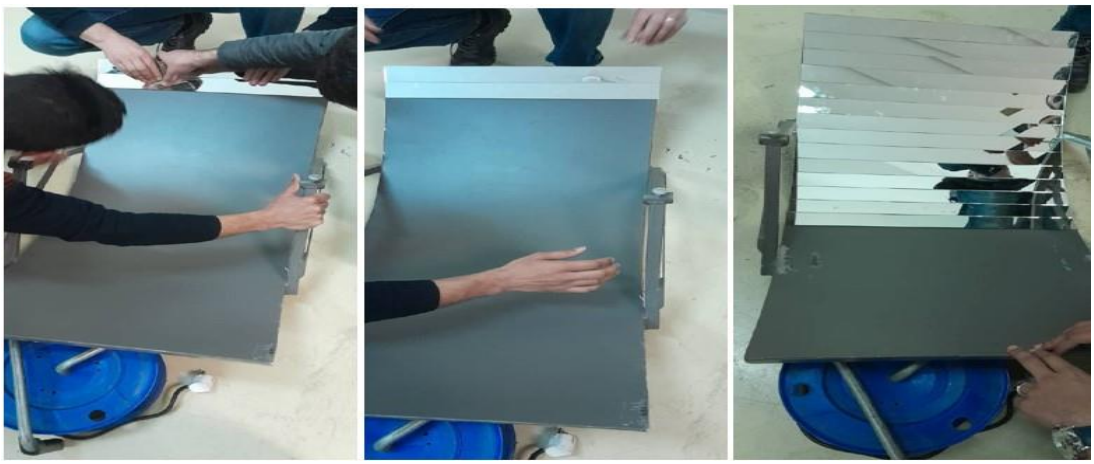


**Figure 3. 4 :** Installation des panneaux de miroirs.

### 3.4.2 L'absorbeur thermique

L'absorbeur utilisé est un tube en cuivre scellé sous vide, de 20 mm de diamètre, choisi pour sa conductivité thermique élevée.

Le système comprend deux orifices pour l'entrée et la sortie de l'eau, avec des vannes de régulation du débit, et une fixation assurée par un bouchon en téflon. L'absorbeur est positionné au foyer du concentrateur solaire pour capter un maximum d'énergie (Figure 3.5).



**Figure 3. 5 :** Fixation du tube absorbeur en cuivre sur l'axe focal.

Dans le but d'améliorer les performances thermiques, des modifications mécaniques ont été apportées au tube absorbeur, notamment un léger rétrécissement à son extrémité de sortie afin d'augmenter la pression interne (Figure 3.6). Cette configuration permet de mesurer des paramètres thermiques tels que le débit et la pression de l'eau jusqu'à 120 °C, grâce à l'intégration d'un manomètre pour le suivi de la pression générée, ainsi qu'un capteur thermique intégré pour surveiller l'évolution de la température au sein de l'absorbeur.



**Figure 3. 6 :** Modification du tube absorbeur

### 3.4.3 Structure de support

Selon notre approche, nous avons opté pour une structure de support à la fois légère et rigide, en adoptant un tube en fer carré scellé sous vide, considéré comme une solution idéale pour la forme cylindro-parabolique.

Les dimensions de cette structure sont les suivantes :

- Une ouverture de 54 cm ;
- Une hauteur de 60 cm pour le tube carré, identique des deux côtés ;
- Deux tiges de support maintenant le tube absorbeur, fixées précisément au niveau de la ligne focale.



**Figure 3. 7 :** Support structurel du concentrateur cylindro-parabolique.

### 3.4.4 Système de fixation du moteur

Afin d'assurer l'entraînement mécanique du concentrateur solaire, un moteur a été installé sur la structure porteuse du système. Le choix de l'emplacement de fixation a été réalisé avec précision pour garantir un bon équilibre statique et une stabilité dynamique optimale lors de la rotation. Cette phase d'installation a nécessité l'utilisation d'outils mécaniques appropriés ainsi que de machines de découpe et de formage spécialisées, assurant ainsi une fixation robuste et sécurisée du moteur.

En complément, un accouplement sur mesure a été conçu et usiné pour assurer la liaison entre l'arbre du moteur et le mécanisme de rotation. Cette solution technique permet une transmission fluide du mouvement avec un rendement mécanique élevé, tout en réduisant les pertes dues au désalignement ou aux jeux mécaniques.

La Figure 3.8 illustre le système d'accouplement réalisé, tandis que la Figure 3.9présente l'intégration finale du moteur au sein de la structure du concentrateur



**Figure 3. 8 :** Système d'accouplement du moteurr.



**Figure 3. 9 :** Fixation finale du moteur**.**

### 3.4.5 Système de suivi solaire et capteurs LDR

Le projet met en œuvre un système de suivi solaire automatisé basé sur des capteurs LDR, permettant d'orienter le concentrateur solaire selon l'intensité lumineuse. Les capteurs, installés au centre du concentrateur et isolés pour éviter les interférences, ont été testés à différentes positions afin d'évaluer leur influence sur la précision du suivi .

Dans l'étape finale, les capteurs et le module de commande ont été connectés à une carte Arduino pour détecter la lumière et contrôler un moteur pas à pas, assurant un mouvement

précis. Cette configuration a donné des résultats fonctionnels satisfaisants, validant ainsi l'efficacité du système développé (Figure 3.10).



**Figure 3. 10 :** Installation et test du capteurs LDR.

### 3.4.6 Capteur de température et acquisition des données

Le système utilise un capteur de température immergé dans le tube d'absorption pour mesurer instantanément la température du fluide caloporteur. Connecté à une carte ESP32, il envoie les données via une interface série à une application mobile, permettant un suivi en temps réel. Les valeurs sont affichées numériquement et sous forme de graphique sur un ordinateur, facilitant l'analyse. L'installation, réalisée avec des soudures précises, assure des mesures fiables, comme le montre la Figure 3.11.

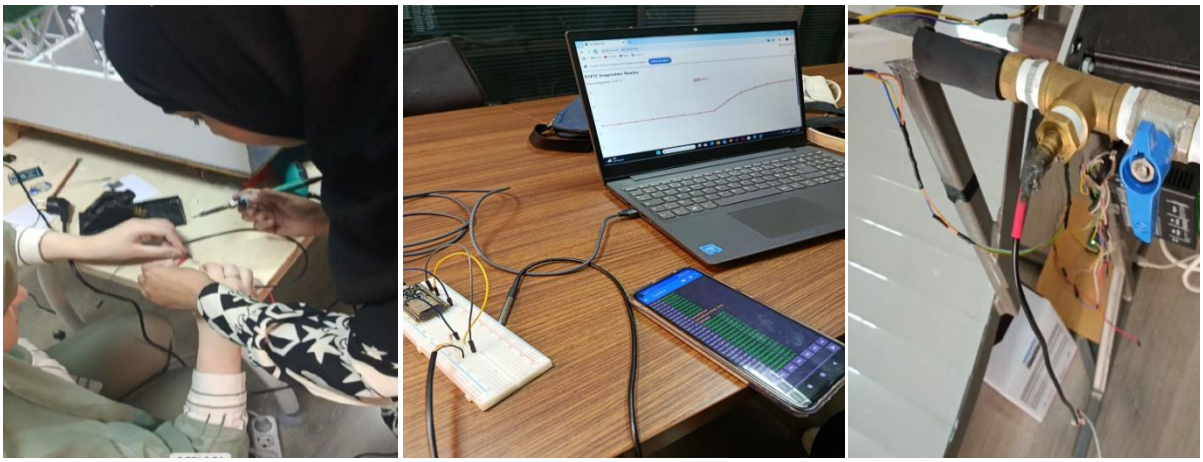


**Figure 3. 11 :** Installation de DS18B20

### 3.4.7 Fluide caloporteur

Dans le cadre du système expérimental adopté, l'eau a été choisie comme fluide caloporteur circulant dans un circuit ouvert. Ce choix a été motivé par sa large disponibilité, son absence de toxicité, ainsi que ses bonnes propriétés thermiques, bien que sa température d'ébullition soit relativement basse (100 °C à pression atmosphérique).

Pour garantir un écoulement continu et stable de l'eau à l'intérieur du tube de transfert de chaleur, un réservoir d'une capacité de 5 litres a été intégré au système. Ce réservoir joue un rôle essentiel dans la régulation du débit et facilite la collecte des données thermiques lors des essais.

Au cours des expérimentations, deux températures principales ont été surveillées :

Te : Température du fluide à l'entrée du tube absorbeur, avant exposition au rayonnement solaire concentré.

Ts : Température du fluide à la sortie, après exposition au rayonnement solaire concentré.

Cette configuration a permis d'analyser avec précision l'évolution de la température du fluide et d'évaluer l'efficacité du transfert thermique global du concentrateur cylindro-parabolique.

### 3.4.8 Structure de support du réservoir

Pour finaliser l'installation et réaliser les expériences, une structure de support légère et résistante a été conçue. Cette structure (Figure 3.12) a été fabriquée en acier en raison de sa solidité et de sa durabilité. Elle sert à supporter un réservoir d'eau d'une capacité de 5 litres. La hauteur de cette structure est d'environ un mètre.



**Figure 3. 12 :** Structure de support de réservoir.

## 3.5 Programmation

### 3.5.1 Test des capteurs de lumière (LDR)

Une méthode simple a été adoptée pour tester le module LDR afin d'évaluer sa capacité à détecter l'intensité lumineuse.

#### 3.5.1.1 Matériel requis

- Module LDR ;
- Carte Arduino UNO ;
- Fils de connexion ;
- Source lumineuse (lampe torche ou LED).

### 3.5.1.2 Étapes de connexion

Le montage par rapport le Tableau 3.1 permet de lire les variations de lumière à travers le signal numérique du capteur

**Tableau 3. 1 :** Connexion des capteur LDR avec l4arduino UNO

| Broche de module LDR | Broche d'Arduino |
|---|---|
| VCC | 5V |
| GND | GND |
| D | D1 |

### 3.5.2 Test du moteur

Cette étape vise à tester un moteur pas a pas de type NEMA 34 à l'aide du pilote DM860H.

### 3.5.2.1 Matériel requis

- Moteur NEMA 34 ;
- Carte Arduino UNO ;
- Pilote DM860H ;
- Fils de connexion.

### 3.5.2.2 Étapes de connexion

Le Tableau 3.2 montre le montage de le pilote DM860H avec l'arduino UNO

**Tableau 3. 2 :** Connexion de pilote DMS860H a l'arduino

| Broche de pilote DM860H | Broche d'Arduino |
|---|---|
| PUL+ | 9 |
| DIR+ | 10 |
| ENA+ | 11 |
| PUL-,DIR-,ENA- | GND |

La Figure 3.13 représenté le programme de test du moteur d'uns seule direction (l'autre direction avec la même méthode) et la Figure 3.14 représenté le programme finale de l'orientation de moteur

sketch_mar25atourne.ino

```
const int stepPin = 9;
const int dirPin = 10;
const int enPin = 11;
void setup() {
  pinMode(stepPin, OUTPUT);
  pinMode(dirPin, OUTPUT);
  pinMode(enPin, OUTPUT);
  digitalWrite(enPin, LOW);
}
void loop() {
  digitalWrite(dirPin, LOW);
  delay(4000);
  for (int x = 0; x < 8000; x++) {
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    delayMicroseconds(40000);
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delayMicroseconds(40000);
  }
  delay (100)
}
```

**Figure 3. 13 :** Programme de Test du moteur pas-à-pas avec Arduino.

sketch_may18b.ino

```
// --- Définition des broches du moteur ---
const int stepPin = 9;   // Broche STEP du moteur pas-à-pas
const int dirPin = 10;   // Broche DIR (direction)
const int enPin = 11;    // Broche ENABLE (activer/désactiver le moteur)

// --- Définition des broches des capteurs ---
int iphotoValue1 = 0;    // Valeur lue du capteur 1 (branché sur pin 2)
int myPin1 = 2;
int iphotoValue2 = 0;    // Valeur lue du capteur 2 (branché sur pin 7)
int myPin2 = 7;

void setup() {
  Serial.begin(9600);               // Initialisation de la communication série
  pinMode(stepPin, OUTPUT);         // Broche de pas en sortie
  pinMode(dirPin, OUTPUT);          // Broche de direction en sortie
  pinMode(enPin, OUTPUT);           // Broche enable en sortie
  pinMode(myPin1, INPUT);           // Capteur 1 en entrée
  pinMode(myPin2, INPUT);           // Capteur 2 en entrée
  digitalWrite(enPin, LOW);         // Activation du moteur (souvent LOW = activé)
}

void loop() {
  // Lecture des capteurs numériques
  iphotoValue1 = digitalRead(myPin1);
  Serial.println("Valeur 1 : ");
  Serial.println(iphotoValue1);
  iphotoValue2 = digitalRead(myPin2);
  Serial.println("Valeur 2 : ");
  Serial.println(iphotoValue2);
  // Si capteur 1 détecte plus de lumière que capteur 2
  if (iphotoValue1 > iphotoValue2) {
    digitalWrite(dirPin, HIGH);  // Choix du sens de rotation
    while (digitalRead(myPin1) > digitalRead(myPin2)) {
      digitalWrite(stepPin, HIGH);
      delayMicroseconds(20000);
      digitalWrite(stepPin, LOW);
      delayMicroseconds(1000);
    }
  }
  // Si capteur 2 détecte plus de lumière que capteur 1
  if (iphotoValue1 < iphotoValue2) {
    digitalWrite(dirPin, LOW);
    while (digitalRead(myPin1) < digitalRead(myPin2)) {
      digitalWrite(stepPin, HIGH);
      delayMicroseconds(20000);
      digitalWrite(stepPin, LOW);
      delayMicroseconds(1000);
    }
  }
  // Si les deux capteurs détectent la même chose, on ne bouge pas
  if (iphotoValue1 == iphotoValue2) {
    digitalWrite(stepPin, LOW);  // Pas de mouvement
  }
  delay(100);  // Petite pause entre chaque mesure
}
```

**Figure 3. 14 :** Programme Arduino pour le contrôle d'un moteur pas-à-pas basé sur des capteurs de lumière.

### 3.5.3 Test du capteur de température DS18B20 avec ESP32

Initialement, le capteur DHT11 a été utilisé pour des tests simples de température ambiante. En raison de sa faible précision, il a été remplacé par le DS18B20, plus adapté pour mesurer la température dans les liquides, notamment dans le fluide du L'absorbeur, avant et après exposition à une source de chaleur.

La carte ESP32 a été utilisée pour lire les données du capteur et les transmettre de deux manières :

- En numérique via Bluetooth : à l'aide de l'application Serial Bluetooth Terminal.
- Sous forme graphique via Wi-Fi : affichage sur une page web locale d'un graphe en temps réel.

#### 3.5.3.1 Matériel nécessaire

- Capteur DS18B20
- Résistance 4.7 kΩ
- Carte ESP32
- Fils de connexion
- Application Serial Bluetooth Terminal (sur smartphone)
- Navigateur web (Chrome, Firefox, etc.)

#### 3.5.3.2 Branchement du capteur DS18B20 à l'ESP32

Le Tableau 3.3 représenter la connexion entre le capteur DS18B20 et la carte ESP32

**Tableau 3. 3 :** Connexion de capture DS18B20 à l'ESP 32

| Broche du DS18B20 | Connexion ESP32 |
|---|---|
| VCC | 3.3 V |
| GND | GND |
| DATA | GPIO 26 |

**Remarque** : Une résistance de 4.7 kΩ doit être placée entre la broche DATA et la broche VCC.

La Figure 3.15 représenter le début programme d affichage de température et figure 3.16 représenter la suite de programme

sketch_may26a.ino

```
#include <WiFi.h> // Bibliothèque pour gérer la connexion WiFi
#include <BluetoothSerial.h> // Bibliothèque pour la communication Bluetooth (ESP32 uniquement)
#include <OneWire.h> // Pour la communication OneWire avec le capteur de température
#include <DallasTemperature.h> // Pour utiliser les capteurs de température Dallas (ex: DS18B20)
// Initialisation de l'objet Bluetooth
BluetoothSerial SerialBT;
// Définition du pin où le capteur de température est connecté
#define ONE_WIRE_BUS 26
// Création des objets pour le bus OneWire et le capteur Dallas
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
// Informations du réseau WiFi
const char* ssid = "Redmi Note 14";
const char* password = "1501200101";
// Création d'un serveur Web sur le port 80
WiFiServer server(80);
// Variable pour stocker la température
float currentTemp = 0;
void setup() {
  Serial.begin(115200); // Initialisation de la communication série
  sensors.begin(); // Démarrage du capteur de température
  SerialBT.begin("ESP32_Temp"); // Démarrage du Bluetooth avec le nom "ESP32_Temp"
  Serial.println("Bluetooth ready");
  // Connexion au réseau WiFi
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.print("Connecting to WiFi");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nWiFi connected");
  Serial.println(WiFi.localIP()); // Affiche l'adresse IP de l'ESP32
  server.begin(); // Démarre le serveur Web
}
void loop() {
  // Lecture de la température
  sensors.requestTemperatures(); // Demande la lecture de la température
  currentTemp = sensors.getTempCByIndex(0); // Lecture de la température du premier capteur
  // Si la lecture est valide, l'envoyer via Bluetooth
  if (!isnan(currentTemp) && currentTemp != DEVICE_DISCONNECTED_C) {
    SerialBT.print("Temperature: ");
    SerialBT.print(currentTemp);
    SerialBT.println(" °C");
```

**Figure 3. 15 :** Début de programme

```
  }
  else {
    SerialBT.println("Sensor error!"); // Affiche une erreur si le capteur ne répond pas
  }
  // Gestion d'un client Web
  WiFiClient client = server.available(); // Vérifie si un client essaie de se connecter
  if (client) {
    String request = client.readStringUntil('\r'); // Lire la requête HTTP
    client.read(); // Lire le caractère '\n'
    // Si la requête est pour /temp, renvoyer la température brute
    if (request.indexOf("GET /temp") >= 0) {
      client.println("HTTP/1.1 200 OK");
      client.println("Content-Type: text/plain");
      client.println();
      client.print(currentTemp, 2); // Envoie la température avec 2 décimales
      client.stop(); // Ferme la connexion
      return;
    }
    // Sinon, envoyer la page Web complète
    String html = "HTTP/1.1 200 OK\r\nContent-Type: text/html\r\n\r\n";
    html += "<!DOCTYPE html><html><head><meta charset='utf-8'>";
    html += "<script src='https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js'></script></head><body>";
    html += "<h2>ESP32 Real-Time Temp Monitor</h2>";
    html += "<canvas id='chart' width='400' height='200'></canvas>";
    html += "<script>";
    html += "let ctx = document.getElementById('chart').getContext('2d');";
    html += "let data = { labels: [], datasets: [{ label: 'Temp °C', data: [], borderColor: 'red', fill: false }] };";
    html += "let chart = new Chart(ctx, { type: 'line', data: data });";
    html += "setInterval(() => { fetch('/temp').then(r => r.text()).then(t => {";
    html += "let time = new Date().toLocaleTimeString();";
    html += "data.labels.push(time); data.datasets[0].data.push(parseFloat(t));";
    html += "if(data.labels.length > 20) { data.labels.shift(); data.datasets[0].data.shift(); }";
    html += "chart.update(); }); }, 5000);"; // Mettre à jour toutes les 5 secondes
    html += "</script></body></html>";
    client.print(html); // Envoie la page HTML
    client.stop(); // Ferme la connexion avec le client
  }
  delay(5000); // Pause de 5 secondes entre chaque boucle (lecture & envoi)
}
```

**Figure 3. 16 :** Suite de programme

## 3.6 Expériences expérimentales

Une série d'expériences a été réalisée en plein air, à l'arrière de la salle de contrôle du CDTA, durant la fin du mois de mai. Les températures ambiantes enregistrées durant ces journées variaient entre 24°C et 34°C, sous un ciel dégagé. Ces essais avaient pour but d'évaluer la performance thermique du concentrateur solaire dans des conditions réelles, tout en testant l'influence de certains éléments sur l'efficacité du chauffage.

### 3.6.1 Première expérience : Effet de concentration avec du papier aluminium

Lors de cette expérience initiale, du papier aluminium a été utilisé comme réflecteur afin d'améliorer la concentration du rayonnement solaire sur le tube absorbeur (Figure 3.17).

- Le concentrateur solaire a été orienté manuellement vers le soleil.
- Une sonde thermique a été utilisée pour mesurer la température du fluide caloporteur à l'intérieur du tube.
- Les résultats ont montré une augmentation notable de la température, ce qui confirme l'efficacité de la concentration simple par réflexion.



**Figure 3. 17 :** Test de l'effet de concentration à l'aide de papier aluminium.

### 3.6.2 Deuxième expérience : Test de l'effet à l'aide des plaques en verre

Dans cette deuxième expérience, le concentrateur solaire a été équipé d'un système de suivi solaire automatique, programmé sur une carte Arduino, permettant une orientation continue et autonome du dispositif en direction du soleil tout au long de la journée (Figure 3.18).

- Une sonde thermique a été insérée dans le tube absorbeur pour mesurer la température de l'eau avant et après l'exposition au rayonnement solaire.
- Des plaques de verre transparent ont été utilisées pour couvrir le capteur, augmentant ainsi l'effet de serre à l'intérieur.
- Les températures ont été enregistrées à l'entrée et à la sortie du tube, permettant de calculer le différentiel thermique dû à l'absorption du rayonnement.



**Figure 3. 18 :** Test de l'effet de concentration à l'aide des plaques en verre.

## 3.7 Résultats et interprétation

### 3.7.1 Test à vide

Une première expérimentation a été menée à vide, c'est-à-dire sans fluide dans le tube absorbeur, afin d'évaluer la concentration du rayonnement solaire. Le test a eu lieu lors d'une journée ensoleillée, avec une température ambiante d'environ 30 °C. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 3.4 : la température atteint 100 °C en environ 5 minutes, puis se stabilise autour de 105 °C (Figure 3.19).

**Tableau 3. 4** : résultat de Test a vide

| Temps | Températures |
|---|---|
| 13 : 00 | 38.92 |
| 13 : 01 | 45.52 |
| 13 : 02 | 68.31 |
| 13 : 03 | 76.31 |
| 13 : 04 | 87.31 |
| 13 : 05 | 92.69 |
| 13 : 06 | 105.12 |
| 13 : 07 | 106.62 |
| 13 : 08 | 105.15 |




**Figure 3. 19 :** Temperature de test a vide.

### 3.7.2 Test avec fluide

Le test expérimental a été réalisé le 2 juin 2025, dans des conditions météorologiques venteuses. Malgré ces conditions peu favorables, le système a atteint une température maximale de **66 °C** pendant environ 35 minutes, comme l'illustrent le Tableau 3.4 et la Figure 3.20.

**Tableau 3. 5 :** résultat de Test avec fluide

| Le temps | La température |
|---|---|
| 13 : 25 | 42.10°C |
| 13 : 30 | 49 ,19°C |
| 13 : 35 | 58,13°C |
| 13 : 40 | 64,12°C |
| 13 : 45 | 64,31°C |
| 13 : 50 | 65,62°C |
| 13 : 55 | 66 ,33°C |
| 14 : 00 | 65,56°C |

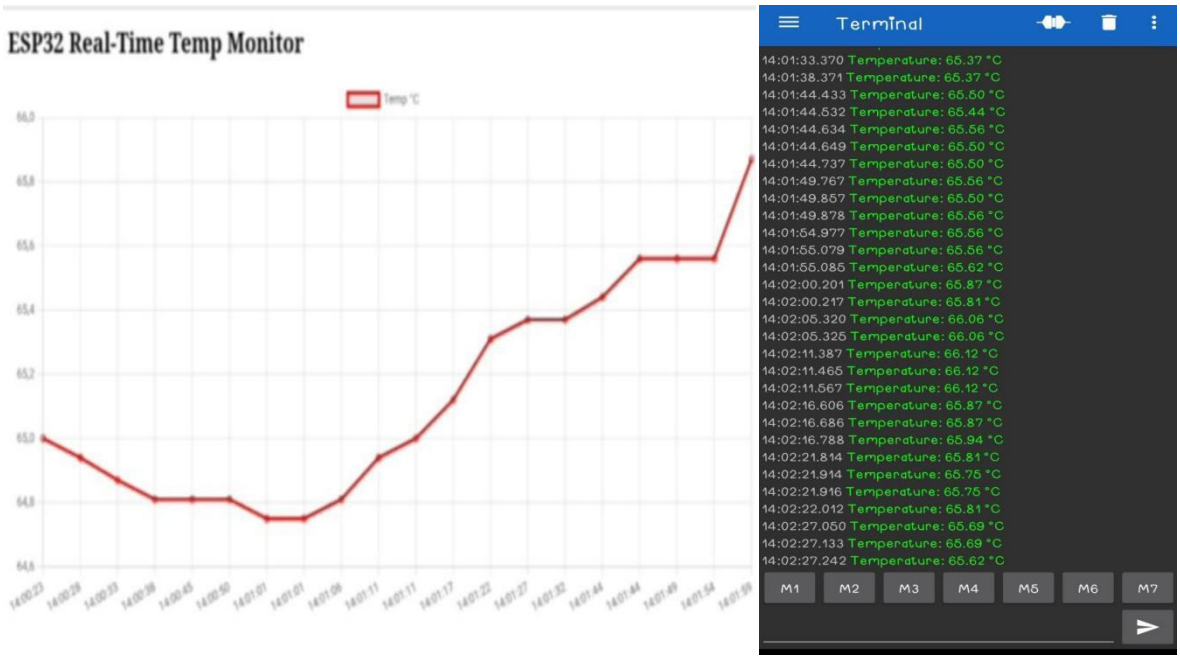



**Figure 3. 20 :** Graph et donné de teperature avec fluide.

## 3.8 Conclusion

Dans ce projet, nous avons débuté par une simulation numérique visant à déterminer les dimensions optimales du concentrateur solaire.

Le système est un concentrateur cylindro parabolique équipé d'un dispositif de suivi solaire utilisant deux capteurs LDR, permettant le contrôle du mouvement vertical via un moteur pas-à-pas de type Nema-34, piloté par une carte Arduino UNO.

L'effet de concentration thermique au niveau du tube absorbeur a été évalué à l'aide du capteur DS18B20, connecté à une carte ESP32.

Ce dispositif a permis d'afficher les résultats sous forme numérique sur un téléphone, ainsi que sous forme graphique sur un ordinateur.

Ce travail nous a permis d'identifier l'ensemble des facteurs influençant l'efficacité du système et d'en optimiser la performance thermique

# Conclusion générale

## Conclusion générale

L'objectif principal de ce projet était de concevoir et de réaliser un concentrateur solaire parabolique cylindrique capable de suivre la trajectoire du soleil afin de maximiser la captation de l'énergie solaire. Pour répondre à cette exigence, une stratégie de suivi automatique a été mise en œuvre à l'aide de capteurs de lumière (LDR) et d'une carte Arduino, permettant au système de s'orienter en temps réel vers la source lumineuse.

La réalisation de ce prototype nous a permis d'acquérir une compréhension approfondie du fonctionnement de ce type de système énergétique, et d'évaluer ses performances dans différentes conditions de fonctionnement. Les résultats expérimentaux, obtenus en laboratoire et en plein air, ont montré que l'efficacité du système dépend de plusieurs facteurs clés, notamment : l'intensité du rayonnement solaire, la qualité de la surface réflectrice, les caractéristiques de l'absorbeur, le débit du fluide caloporteur, ainsi que la précision du système de suivi solaire.

Ce système représente l'une des technologies les plus prometteuses dans le domaine de l'énergie solaire thermique, grâce à ses nombreux avantages, dont les plus importants sont :

- Une haute efficacité de conversion de l'énergie solaire en chaleur, grâce à la concentration précise du rayonnement.
- Une fabrication facile avec des matériaux locaux à faible coût, et un entretien réduit.
- Une grande flexibilité d'installation et d'extension, avec possibilité d'utilisation dans des zones isolées sans besoin de raccordement au réseau électrique.
- Une polyvalence d'utilisation : chauffage de l'eau, alimentation d'appareils électroniques, ou production d'électricité à petite échelle.
- Un fonctionnement écologique, sans émission polluante ni nuisance sonore.

Le système a été renforcé par un mécanisme de suivi solaire automatique garantissant une orientation précise du réflecteur vers le soleil tout au long de la journée, et améliorant ainsi l'efficacité de captation de l'énergie solaire.

De plus, le projet a été doté de la lecture des données et résultats à distance grâce aux technologies Bluetooth et Wi-Fi. Les données en temps réel sont transmises à un smartphone ou à un ordinateur, et affichées respectivement sous forme de valeurs numériques et de graphiques interactifs. Cette fonctionnalité facilite grandement la surveillance et l'analyse du système, tout en permettant l'archivage et l'exploitation des performances à des fins pédagogiques ou scientifiques.

Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation optimale de ce type de concentrateur solaire nécessite une localisation dans des régions à fort rayonnement solaire. Par ailleurs, l'intégration de systèmes de suivi, de contrôle et de communication sans fil représente une avancée majeure, ouvrant la voie à des améliorations futures telles que le renforcement du stockage thermique, l'augmentation de l'efficacité de conversion électrique, ou encore l'intégration dans des systèmes hybrides.

En conclusion, ce projet constitue une première étape réussie dans l'exploration du potentiel des énergies renouvelables, et représente une base solide pour des recherches futures visant à développer des solutions technologiques durables et performantes, contribuant à la réduction de la dépendance aux énergies fossiles et à l'autonomie énergétique, dans le respect de l'environnement

# Références


1. **International Energy Agency.***World Energy Outlook.* Paris : IEA, 2023.

2. **S.A.Kalogirou.***Solar Energy Engineering : Process and Systeme.* s.l. : Acadmic Press, 2013.

3. **Instructables.** Arduino and LDR. *AUTODESK Instructables.* [En ligne]

4. **Maxime integrated.** DS18B20. *Digital Thermometer Data Sheet.* [En ligne] 2020.

5. **M.Rasheed, A.Khan, S.Ahmed et R.Ali.***Web Based Data Using ESP Module.* s.l. : International Journal of Innovative Science and Research Technology, 2021.

6. **Nick Jelly.***Les Energie renouvlables.* France : edp sciences, 2022.

7. **H.Saidi.** Energie Renouvelable. *polycope de cours.* Universite algeriennne : s.n., 2016-2017.

8. **E.Riolet.***L'énergie solaire et photovoltaïque pour le particulier.* Paris : Eyroless, 2010.

9. **S.Abbane et S.Regragui.** Etude, dimensionnement et réalisation d'un consentrateur Cylindro-parabolique dans la région d' Adrar. *Universite Ahmed Draia.* Adrar : s.n., 2019-2020.

10. **A.Ghomes et N.Gherara.** Etude du Stockage de l'Energie Solaire photovoltaïque sous forme d'air comprimé. *Universite Kacedi Merhab.* ouregla : s.n., 2021-2022.

11. **UVED.** La circulation generale de l''atmosphere. *Universite virtuelle environment et devlopment durable.*

12. **FOAD.** Capteur solaire a concentration. *Universite virtuelle.* Sengal : s.n., 2015.

13. **Departement des énergie renouvelable.** La concentration solaire. *Solaire thermique et application.* Universite algerienne : s.n., 2016.

14. **R.Bouziane et A.Dokkar.** Conception et realisation d'un suiveur solaire bi-axial a base de capteur de lumiere. *Universite Kacedi Merbah.* Ouargla : s.n., 2015-2016.

15. **EcoFlow.** Quelle est la différence entre un tracker solaire 1 et 2 axes ? . *EcoFlow Blog.* [En ligne] 2023.

16. **M.Nouioua, I.Chikh et A.Delhoum.** Systeme de parking automatique. *Universite Badji Mokhtar.* Annaba : s.n., 2019.

17. **Arduino France.** Arduino Uno : test,avis,caracteristique et projet. *Arduion-France.com.* [En ligne]

18. **Arduino.** Arduino Uno Rev 3. *Arduino Official Store.* [En ligne]

19. **APC Pédagogie.** Presentation de la carte ESP 32. *apcpedagogie.com.* [En ligne]

20. **Open Elab.** ESP 32 vs STM 32 : quelle est la meilleur option. *Open Elab.io.* [En ligne]

21. **Robotique Tech.** Qu' est ce que la carte ESP 32. *roubootique.tech.* [En ligne]

22. **I.Toucherift et H.Taibi.** Controlr des parametres climatique d'une serre agricole. *Universite Mouloud Mammeri.* Tizi-Ouzou : s.n., 2017-2018.

23. **YouipiLab.** Photoresistance (LDR). *youbilab.com.* [En ligne]

24. **J.L.Pallas.***Guide pratique d'entretien et de réparation des moteurs diesel.* s.l. : Loisir Nautique, 2001.

25. **Youssef, M.El.** Impact du procédé de fabrication des stators slinky sur les propriétés des matériaux. *Ecole nationale supérieur d'art et metiers (ENSAM).* LIlle : s.n., 2017.

26. **DEC Motor.** Kit moteur en boucle fermée Nema 34 8,5 Nm 86HSE118-BC38 . *dec-motor.com.* [En ligne]

27. **Vallder.** Pilote pas a pas DM860H. *Vallder.com.* [En ligne]

28. HSS86, 2-Phase Hybrid Stepper Servo Driver . *Technical Manuel.* Shenhzen : HSS86.pdf.

29. **Maxime Integrated.** DS18B20 – Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. *Tehnical Manuel.* s.l. : ds18b20.pdf, 2019.

30. **DF Robot.** Waterproof DS18B20 Digital Temperature Sensor. *DF Robot.Wiki.* [En ligne]

31. **Tutoduino.** Capteur de température et d'humidité DHT11 DHT22. *Tutoduino.fr.* [En ligne]

32. **J.Guebault.***L'utilisation de la tôle d'acier galvanisée dans la fabrication des véhicules automobiles.* Paris : EDP Sciences, 1975.

33. **I.Zeghib.** Etude et realisation d'une concentrateur solaire peabolique. *Universite Fréres Mrntouri.* Constantine : s.n., 2005.

34. **R.Tu.** Ray Optics Simulation. *phydemo.app.* [En ligne] 2024.

35. **The MathWorks.** MATLAB – The Language of Technical Computing,. *mathworks.com.* [En ligne] 2013.

36. Logicielle : IDE-Arduino. *Arduino ; l'essential.* [En ligne]