



جامعة بجاية  
Tasdawit n'Bgayet  
Université de Béjaïa

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira -Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département Génie Electrique

# Memoire de fin d'étude

*En vue de l'obtention du diplôme Master recherches-en  
Électromécanique.*

*Option : électromécanique*

## Thème

*« Finalisation de la réalisation d'un système  
de poursuite solaire automatique d'un  
concentrateur parabolique et réalisation de  
son absorbeur »*

*Présenté par :*

- 1- Mr. BELKACEMI LOUCIF*
- 2- Mr. HAMROUNE MAHIEDDINE*

*Encadré par :*

*Promoteur : Mr. Y.MEBARKI*  
*Co-promoteur: Mr. M.KACIMI*

2018/2019

## *Remerciement*

AVANT TOUT, ON REMERCIE LE BON DIEU, LE TOUT PUISSANT DE NOUS AVOIR DONNÉ LA FORCE NÉCESSAIRE POUR MENER À TERME CE TRAVAIL.

ENSUITE, NOUS VOULONS EXPRIMER NOTRE RECONNAISSANCE À NOS PROMOTEURS

MR .Y.MEBARKI ET MR M.KACIMI POUR LEUR ENCADREMENT EFFICACE, LEUR SOUTIEN ET LEUR DISPONIBILITÉ. QU'ILS TROUVENT ICI L'EXPRESSION DE NOTRE PROFONDE GRATITUDE.

SANS OUBLIER LES JURYS QUI NOUS FERONT L'HONNEUR DE JUGER CE MODESTE TRAVAIL.

NOUS TENONS À REMERCIER L'ASSOCIATION SCIENTIFIQUE « LEFNAR » D'EL KSEUR POUR LEUR SOUTIEN ET LEUR ENCOURAGEMENT.

NOTRE REMERCIEMENT VONT VERS TOUS CEUX QUI ON CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À L'ÉLABORATION DE CE MÉMOIRE, DE MÊME QUE CEUX QUI ONT PARTICIPÉ À NOTRE FORMATION, QU'ILS TROUVENT ICI L'EXPRESSION DE NOTRE PROFONDE GRATITUDE.

HAMROUNE ET BELKACEMI

## DÉDICACES

*Je dédie ce travail :*

À MES PARENTS, MA CHÈRE MÈRE ET  
MON NOBLE PÈRE  
QUI M'ONT TOUJOURS CONSEILLÉ,  
ENCOURAGÉ SANS OUBLIER MES  
GRAND PERS.

À MES DEUX FRÈRES (AZZEDINE,  
TAHAR), ET À TOUTE MA FAMILLE.

À TOUS MES AMIS (CHOUNNITA,  
MEHAMED, MOH, LOUNIS...)

SANS OUBLIER MON BINÔME LOUCIF.

## DÉDICACES

**Je remercie le dieu de m'avoir donnée la  
force et le courage de travailler avec un  
binôme tell que hamrone**

**A mes parents et à toute ma famille**

**Je remercie tous ceux qui ont contribué  
de prêt ou de loin à la réussite de ce travail**

**A tous mes amis (Sofiane fougou ,bilal  
biloucha, lakhedarius , riad , syfax la  
france. ..)**

**Sans oublier mon binôme mahyidine**

**A tous les électromécaniciens pièce**

**loucif**

# SOMMAIRE

|  |    |
|--|----|
| Introduction générale.....   | 14 |
| I. Chapitre I : généralité sur la géométrie et la trajectoire solaire..... | 15 |
| I.1 Le mouvement du soleil autour de la terre .....                        | 16 |
| I.1.1 Le soleil.....   | 16 |
| I.1.2 Le mouvement de la terre.....  | 17 |
| I.2 La sphère céleste.....   | 18 |
| I.2.1 Grandeur géographique et astronomique .....                          | 19 |
| I.2.1.1 Repérage d'un site la surface terrestre .....                      | 19 |
| I.2.1.1.1 Les coordonnées géographiques.....                               | 19 |
| I.2.2 Comment déterminer la direction du soleil.....                       | 20 |
| I.2.2.1 Les coordonnées équatoriales .....                                 | 20 |
| I.2.2.1.1 La déclinaison ( $\delta$ ) :.....                               | 20 |
| I.2.2.1.2 L'angle horaire ( $\omega$ ) .....                               | 21 |
| I.2.2.2 Les coordonnées horizontales .....                                 | 21 |
| I.2.2.2.1 La hauteur du soleil (h) :.....                                  | 22 |
| I.2.2.2.1.1 Angle du zénith.....   | 22 |
| I.2.2.2.1.2 L'azimut .....   | 23 |
| I.2.3 Mouvement apparent du soleil.....                                    | 23 |
| I.3 Le temps soleil.....   | 24 |
| I.3.1 Le Temps Solaire Vrai (T.S.V) :(2) .....                             | 25 |
| I.3.2 Le Temps Solaire Moyen (T.S.M).....                                  | 25 |
| I.3.3 Équation du temps (Et) :.....  | 25 |
| I.3.4 Temps légal TL : .....   | 25 |
| I.3.5 Temps universel TU .....   | 26 |
| I.3.6 Lever et coucher du soleil : .....                                   | 26 |
| I.3.7 La hauteur du plan $\gamma$ :.....                                   | 27 |
| I.3.8 Azimut du plan $\alpha$ (ou angle d'orientation du plan) :.....      | 27 |
| I.3.9 Angle d'incidence sur un plan quelconque : .....                     | 28 |
| I.3.9.1 Coordonnées horizontales .....                                     | 28 |
| I.3.9.2 En coordonnées horaires .....                                      | 28 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| I.3.9.3  | Surface horizontale: .....   | 29 |
| I.3.9.4  | Surface vertical :.....  | 29 |
| I.3.9.5  | Surface orientée vers le sud et inclinée d'un angle $\beta$ par rapport à l'horizontale :..... | 29 |
| I.3.10   | L'inclinaison $\beta$ :.....   | 29 |
| I.4      | Transfert des rayons solaire a travers l'atmosphère .....                                      | 30 |
| I.4.1    | Les types des rayonnements solaires :.....   | 30 |
| I.4.1.1  | Le rayonnement direct :.....   | 30 |
| I.4.1.2  | Le rayonnement diffus :.....   | 30 |
| I.4.1.3  | Le rayonnement global : .....  | 31 |
| I.4.2    | Gisement solaire en Algérie .....  | 31 |
| I.5      | Conclusion .....   | 33 |
| II.      | Chapitre II : Etude d'un concentrateur parabolique .....                                       | 34 |
| II.1     | C'est quoi un Concentrateurs parabolique .....   | 35 |
| II.2     | La géométrie du concentrateur parabolique .....  | 35 |
| II.2.1   | Définition.....  | 35 |
| II.2.2   | Angle d'ouverture d'une parabole .....   | 36 |
| II.2.3   | Taille d'une parabole.....   | 37 |
| II.2.4   | Surface d'une parabole .....   | 37 |
| II.2.5   | Longueur d'arc d'une parabole.....   | 38 |
| II.3     | Système optique d'une surface parabolique .....  | 38 |
| II.4     | Les composants d'un concentrateur solaire parabolique :.....                                   | 38 |
| II.4.1   | Réflecteur (paraboloïde) .....   | 38 |
| II.4.2   | Récepteur (absorbeur) .....  | 40 |
| II.4.2.1 | Surface externe : .....  | 40 |
| II.4.2.2 | Surface interne ou cavité : .....  | 40 |
| II.5     | Dimensions du récepteur .....  | 41 |
| II.6     | La Concentration .....   | 43 |
| II.6.1   | Concentration géométrique.....   | 43 |
| II.6.2   | Concentration optique .....  | 43 |
| II.7     | Température de l'ouverture du récepteur.....   | 44 |
| II.7.1   | L'énergie reçue à l'ouverture d'un paraboloïde .....   | 45 |
| II.7.2   | Puissance solaire absorbée par l'ouverture du récepteur.....                                   | 46 |
| II.7.3   | Puissance correspondant aux pertes thermiques.....   | 46 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| II.7.3.1  | Pertes par convection .....                             | 47 |
| II.7.3.2  | Pertes par rayonnement .....                            | 47 |
| II.7.3.3  | Pertes par conduction .....                             | 48 |
| II.8      | Conclusion .....  | 49 |
| III.      | Chapitre III : dispositifs expérimentaux .....          | 50 |
| III.1     | Schéma synoptique .....                                 | 51 |
| III.2     | Etude des différents blocs .....                        | 51 |
| III.2.1   | Les capteurs de lumière .....                           | 51 |
| III.2.1.1 | Suiveur double axe .....                                | 52 |
| III.2.2   | Le circuit de commande .....                            | 53 |
| III.2.2.1 | Définition de la carte Arduino .....                    | 53 |
| III.2.2.2 | Arduino MEGA 2560 R3 .....                              | 53 |
| III.2.3   | Circuit de puissance L298n .....                        | 55 |
| III.2.3.1 | Caractéristiques .....                                  | 56 |
| III.3     | Le moteurs cc .....                                     | 56 |
| III.4     | Le vérin électrique .....                               | 57 |
| III.5     | Conclusion .....  | 58 |
| IV.       | Chapitre IV : réalisation du systéme de poursuite ..... | 59 |
| IV.1      | Partie programmation : .....                            | 61 |
| IV.1.1    | L'organigramme .....                                    | 61 |
| IV.1.2    | Programmation .....                                     | 61 |
| IV.2      | Partie électrique ; .....                               | 63 |
| IV.3      | Partie mécanique .....                                  | 66 |
| IV.3.1    | Principe de fonctionnement du mécanisme réalisé. ....   | 66 |
| IV.4      | Absorbeur .....   | 67 |
| IV.5      | Thermocouple : .....                                    | 69 |
|           | Conclusion générale .....                               | 72 |

Liste des figures ;

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1.1-1/ image du soleil.....  | 16 |
| Figure I.1.2-1 /plan de l'écliptique .....  | 17 |
| Figure I.1.2-2/mouvements de la terre autour du soleil.....   | 18 |
| Figure I.1.2-1/ LA SFERE CELESTRE .....   | 18 |
| Figure I.2.1-1/ la longitude(L).....  | 19 |
| Figure I.2.1-2 / la latitude .....  | 19 |
| Figure I.2.2-1 la déclinaison.....  | 20 |
| Figure I.2.2-2 l'angle horaire .....  | 21 |
| Figure I.2.2-3 la hauteur de soleil.....  | 22 |
| Figure I.2.2-4 l'angle du zénith.....   | 22 |
| Figure I.2.2-5 les coordonnées horizontale.....   | 23 |
| Figure I.2.3-1/course particulière du soleil .....  | 24 |
| Figure I.3.6-1/ représente les paramètres de position d'un plan incliné.....  | 27 |
| Figure I.3.7-1/ la hauteur.....   | 27 |
| Figure I.3.9-1 /Angle d'incidence sur un plan quelconque .....  | 28 |
| Figure I.4.1-1/ rayonnement solaire en Algérie .....  | 30 |
| Figure I.4.1-2 les types des rayonnements .....   | 30 |
| Figure I.4.2-1 Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....   | 31 |
| Figure I.4.2-2/ Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné la latitude du lieu ..... | 32 |
| Figure I.4.2-3/ Répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie .....                                | 33 |
| Figure I.4.2-1/ réflecteur parabolique.....   | 35 |
| Figure II.2.1-1/ propriété de la géométrie de la parabole .....   | 35 |
| Figure II.2.2-1 l'angle d'ouverture d'une parabole .....  | 37 |
| Figure II.2.5-1/ Système optique d'une surface parabolique .....  | 38 |
| Figure II.4.1-1 Paraboloïde de révolution.....  | 39 |
| Figure II.4.1-2.....  | 39 |
| Figure II.4.2-1 Catégories des récepteurs .....   | 41 |
| Figure II.4.2-2 Concentrateur solaire parabolique.....  | 41 |
| Figure II.4.2-1 L'image ellipse .....   | 42 |
| Figure II.4.2-2 Distance axiale arrière du point focal .....  | 43 |
| Figure II.6.2-1. Concentration géométrique à différentes valeurs du récepteur (d2).....                               | 44 |
| Figure II.6.2-1 Bilan énergétique .....   | 45 |
| Figure II.7.3-1 .schéma synoptique .....  | 51 |
| Figure III.2.1-1Photo – Photorésistance LDR.....  | 52 |
| Figure III.2.1-2Circuit équivalent du capteur LDR .....   | 52 |
| Figure III.2.1-3Schéma du prototype des quatre capteurs LDR.....  | 52 |
| Figure III.2.2-1 Carte Arduino mega 2650 .....  | 53 |
| Figure III.2.2-2 câble USB.....   | 54 |
| Figure III.2.2-3 fils de pin d'Arduino .....  | 54 |
| Figure III.2.2-4 plaque d'essai .....   | 55 |
| Figure III.2.3-1 /Détails techniques .....  | 55 |
| Figure III.2.3-1 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu .....   | 56 |



|  |    |
|--|----|
| Figure III.2.3-2moteur d'essuies- glace .....                                      | 57 |
| Figure III.2.3-1 vérin électrique .....  | 57 |
| Figure III.2.3-1 la vue réal de notre système.....                                 | 60 |
| Figure IV.1.1-1 Organigramme Principal .....                                       | 61 |
| Figure IV.1.2-1 / Réalisation en utilisant les LEDs .....                          | 64 |
| Figure IV.1.2-2 schéma s'amplifier sur les capteurs et les leds .....              | 64 |
| Figure IV.1.2-3/Réalisation avec des petits moteurs à courant continue.....        | 65 |
| Figure IV.1.2-4 Réalisation avec des petits moteurs à courant continue .....       | 65 |
| Figure IV.3.1-1 Le mécanisme réalisé après l'assemblage de toutes les pièces ..... | 66 |
| Figure IV.3.1-1 notre prototype .....  | 67 |
| Figure IV.3.1-2 notre absorbeur .....  | 68 |
| Figure IV.3.1-1 LES TESTS DE MESURE .....  | 70 |
| Figure IV.3.1-2 les tests de mesure de tableau .....                               | 71 |

List des tableaux :

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 <i>caractéristique</i> du soleil.....                        | 16 |
| Tableau 2/ Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques..... | 31 |
| Tableau 3 mcc.....   | 57 |

## List des équations

|   |    |
|---|----|
| Équation I.2.2-1 équation de la déclinaison.....                        | 20 |
| Équation I.2.2-2 équation de l'angle horaire .....                      | 21 |
| Équation I.2.2-3 de la hauteur du soleil .....                          | 22 |
| Équation I.2.2-4 équation du l'azimut.....                              | 23 |
| Équation I.3.1-1 équation de TSV.....                                   | 25 |
| Équation I.3.2-1 équation TSM.....                                      | 25 |
| Équation I.3.3-1 équation de ET.....                                    | 25 |
| Équation I.3.3-2 équation de ET.....                                    | 25 |
| Équation I.3.4-1 l'équation TL .....                                    | 25 |
| Équation I.3.5-1/ équation de TU.....                                   | 26 |
| Équation I.3.6-1/ équation du lever de soleil.....                      | 26 |
| Équation I.3.6-2 .....  | 26 |
| Équation I.3.6-3//équation couché soleil.....                           | 26 |
| Équation I.3.6-4/équation levé soleil .....                             | 26 |
| Équation I.3.9-1/ l'angle d'incidence.....                              | 28 |
| Équation I.3.9-2 angle d'incidence .....                                | 28 |
| Équation I.3.9-3 angle d'incidence crd horaire .....                    | 29 |
| Équation I.3.9-4/ surface horizontale .....                             | 29 |
| Équation I.3.9-5 surface verticale orientée vers le sud.....            | 29 |
| Équation I.3.9-6/ surface verticale orientée vers l'ouest.....          | 29 |
| Équation I.3.9-7/ surface verticale orientée vers l'est .....           | 29 |
| Équation I.3.9-8 surface verticale orientée vers le sud.....            | 29 |
| Équation I.3.10-1 l'expression de l'inclinaison $\beta$ .....           | 30 |
| Équation II.2.1-1 l'équation de la parabole.....                        | 36 |
| Équation II.2.1-2 l'équation de rayon parabolique .....                 | 36 |
| Équation II.2.2-1 l'équation de l'angle d'ouverture d'une parabole..... | 36 |
| Équation II.2.3-1 l'équation de la taille d'une parabole.....           | 37 |
| Équation II.2.3-2 l'équation de la taille .....                         | 37 |
| Équation II.2.4-1 l'équation de la surface d'une parabole.....          | 38 |
| Équation II.2.5-1 l'équation de la longueur d'arc.....                  | 38 |
| Équation II.4.1-1 l'équation du réflecteur .....                        | 38 |
| Équation II.4.1-2 la surface d'une parabole .....                       | 39 |
| Équation II.4.1-3 la surface du parabole .....                          | 39 |
| Équation II.4.1-5 la surafce du parabole .....                          | 40 |
| Équation II.4.1-6 la surface d'ouverture .....                          | 40 |
| Équation II.4.1-7 la surface d'ouverture .....                          | 40 |
| Équation II.4.1-8 la surface d'ouverture .....                          | 40 |
| Équation II.4.2-1 le petit rayon Sf.....                                | 42 |
| Équation II.4.2-2 le rayou rf.....                                      | 42 |
| Équation II.4.2-3 Le diamètre d'ouverture du récepteur.....             | 42 |
| Équation II.6.1-1 Concentration géométrique .....                       | 43 |
| Équation II.6.2-1 concentrateur optique.....                            | 43 |

|   |    |
|---|----|
| Équation II.6.2-2 la concentration d'un concentrateur.....  | 44 |
| Équation II.6.2-1 le bilan énergétique de la surface .....  | 44 |
| Équation II.7.1-1 la surface différentiel .....             | 45 |
| Équation II.7.1-2 L'énergie reçue à l'ouverture.....        | 46 |
| Équation III.2.1-1 La tension délivrée par le capteur ..... | 52 |
| <br>  |    |
| Table 1 caractéristique vérin.....                          | 58 |

## Nomenclature-Abréviation

|  |                      |
|--|----------------------|
| k : Constante de Boltzmann                         |                      |
| c : h : Constante de Planck                        |                      |
| Célérité de la lumière                             |                      |
| T : Température en Kelvin                          |                      |
| I : Constante solaire                              |                      |
| H : Longitude                                      | [°]                  |
| A : Latitude                                       | [°]                  |
| $\delta$ : Déclinaison solaire                     | [°]                  |
| $\theta$ : Angle horaire                           | [°]                  |
| h : Hauteur angulaire du soleil                    | [°]                  |
| $\alpha$ : Azimut                                  | [°]                  |
| TSV : Temps solaire vrai                           | [h]                  |
| ET : Equation du temps                             | [minutes]            |
| TSM : Temps solaire moyen                          | [h]                  |
| TU : Temps universel                               | [h]                  |
| d : Diamètre                                       | [m]                  |
| f : distance focale                                | [m]                  |
| $\Psi$ : angle d'ouverture de la parabole          | [°]                  |
| A0 : Surface d'ouverture                           | [m <sup>2</sup> ]    |
| Ar : Surface de l'absorbeur                        | [m <sup>2</sup> ]    |
| d2 : diamètre d'ouverture du récepteur             | [m]                  |
| $\tau$ : Coefficient de transmission du récepteur. |                      |
| $\alpha$ : Coefficient d'absorption du récepteur.  |                      |
| $\rho$ : Coefficient de réflexion de la parabole.  |                      |
| $\eta_{op}$ : rendement optique du concentrateur.  |                      |
| Pc : Poids du concentrateur                        | [Kg]                 |
| Pa : Poids de l'absorbeur remplis                  | [Kg]                 |
| $\mu$ : Coefficient de frottement                  |                      |
| Rp : résistance pratique du matériau.              | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| FBD : Fonction Block Diagramme                     |                      |
| H : capture de haut                                |                      |
| B : capture de bas                                 |                      |
| G : capture de gauche                              |                      |
| D : capture de droit                               |                      |
| MV : mouvement verticale                           |                      |
| MH : mouvement horizontale                         |                      |
| LD : Ladder Diagramme (langage à contact)          |                      |

la consommation en énergie des pays en voie de développement va connaître une augmentation très importante, surtout après la mondialisation du commerce et des échanges entre les états, Selon des études faites par certains instituts de recherche, Le dernier choc pétrolier et la catastrophe de la centrale nucléaire de Tchernobyl, ont beaucoup stimulé la recherche et le développement de nouvelles sources d'énergies renouvelables et particulièrement solaires.

Cette énergie peut être transformé en chaleur à basse température, par des capteurs plans, utilisant conjointement l'absorption par une surface sélective et l'effet de serre crée par le vitrage, ces capteurs ne permettent pas en général de dépasser la température de 100°C (1).

Pour travailler à température élevée, il faut accroître le flux optique incident qui pourrait être réalisé par concentration de rayonnement solaire. Cette opération est réalisée à l'aide de capteurs appelés concentrateurs solaires. Parmi ce type de concentrateurs, il y a les concentrateurs solaires paraboliques (paraboloïde de révolution) (2).

Ces systèmes comportent en général une surface réfléchissante sous forme parabolique destinée à concentrer l'énergie solaire sur une surface absorbante, ce qui permet d'avoir une forte augmentation de chaleur. L'avantage d'une telle méthode est de pouvoir atteindre des températures élevées bien adaptées pour le chauffage d'eau (production d'eau stérilisée (3) et de vapeur d'eau), pour les cuisines solaires (4) et production d'électricité par les moteurs Stirling (5).

Notre travail est consacré à la finalisation de la réalisation d'un concentrateur parabolique qui est déjà faite et l'améliorer notre but réside dans la mise en œuvre d'une solution technique permettant de transformer un suiveur solaire manuel en un suiveur automatique afin de rendre le système de poursuite autonome d'une part et d'améliore le rendement d'autre part et réaliser son absorbeur.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré uniquement sur la géométrie et la trajectoire solaire.

Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse à l'étude d'un concentrateur parabolique.

Le troisième chapitre est consacré aux dispositifs expérimentaux quand on a utilisé pour la réalisation de notre système de poursuite solaire parabolique.

Dans le dernier chapitre on a entamé la réalisation de notre concentrateur parabolique, Un organigramme du programme développé L'étude expérimentale sur le prototype est présentée au chapitre quatre. La surface absorbante du concentrateur parabolique est soumise à un flux solaire variable. Les résultats expérimentaux sont dans ce chapitre.

Enfin, le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Introduction :

Dans cette partie, on va décrire la position du soleil, source de l'énergie solaire, par rapport à la terre et les différents paramètres qui peuvent influencer sur l'énergie incidente sur terre comme le mouvement terre-soleil, le mouvement de la terre autour de l'axe des pôles, la situation géographique du lieu et la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée et les heures du lever et du coucher

Dans cette partie nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir :

- Les grandeurs astronomiques.
- Les grandeurs géographiques.

## I.1 Le mouvement du soleil autour de la terre

### I.1.1 Le soleil

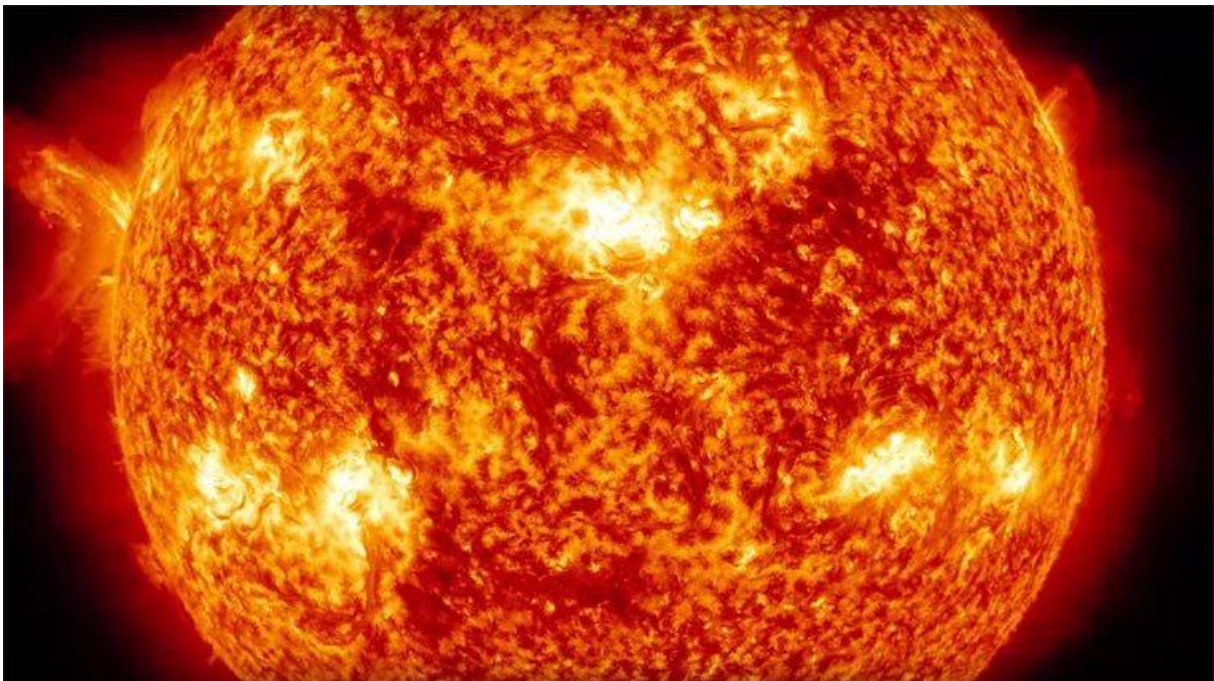


Figure I.1.1-1/ image du soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de  $14 \times 10^5$  km de diamètre, sa masse est de l'ordre de  $2 \times 10^{30}$  kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments Il est situé à une distance moyenne de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à  $4 \times 10^{26}$  W. (6)

Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de  $1,7 \times 10^{17}$  W. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques; 30% de cette puissance est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère.

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci-dessous

Tableau 1 caractéristique du soleil

|   |         |
|---|---------|
| Diamètre (Km)                                 | 14*10   |
| Masse (kg)                                    | 2*10    |
| Surface (km <sup>2</sup> )                    | 6.09*10 |
| Volume (km <sup>3</sup> )                     | 1.14*10 |
| Masse volumique moyenne (Kg /m <sup>3</sup> ) | 1408    |
| Vitesse (km/s)                                | 217     |
| Distance du centre de la voie lactée (Km)     | 2.5*10  |

### I.1.2 Le mouvement de la terre

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique

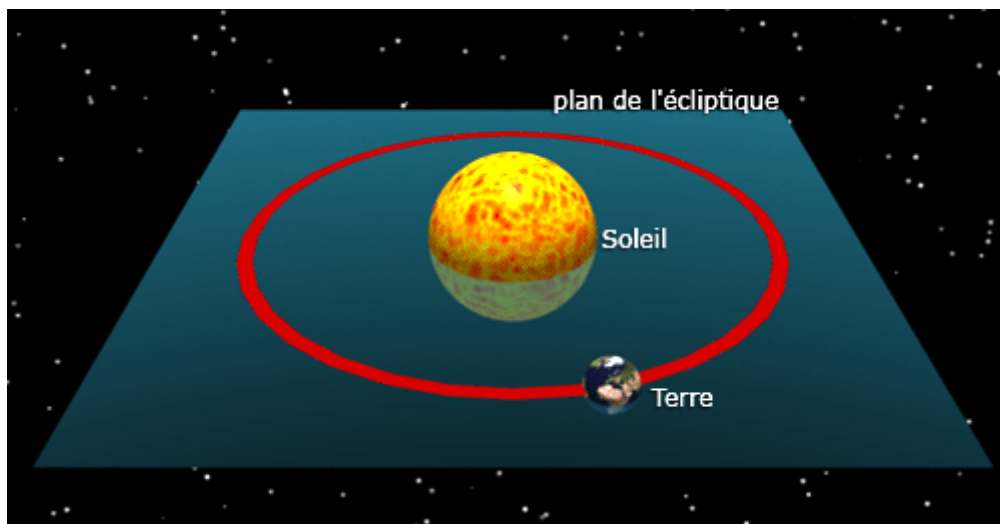


Figure I.1.2-1 /plan de l'écliptique

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux.

L'orbite de la Terre atteint une distance maximale du soleil est appelé l'aphélie, de  $1,52 \times 10^{11}$  m vers le troisième jour du mois de Juillet. La distance Terre-Soleil minimum, le périhélie, se produit aux environs du 2 Janvier quand la terre est à  $1,47 \times 10^{11}$  m du soleil [3]. En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour de l'axe des pôles.



Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à  $23^{\circ}45'$  (7)

Mouvement de la Terre autour du soleil

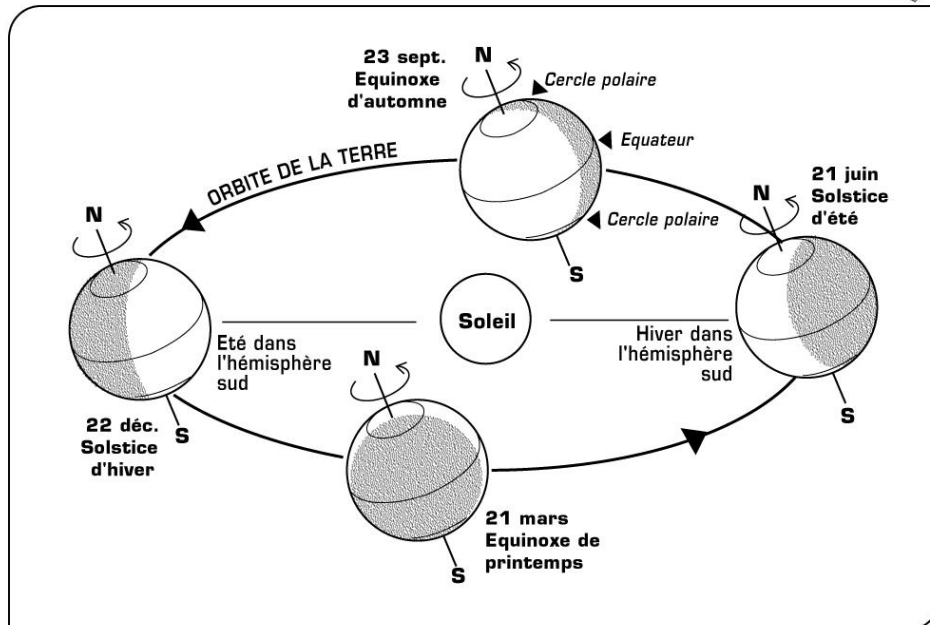


Figure I.1.2-2/mouvements de la terre autour du soleil

I.2 La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la Figure I.1.2-1

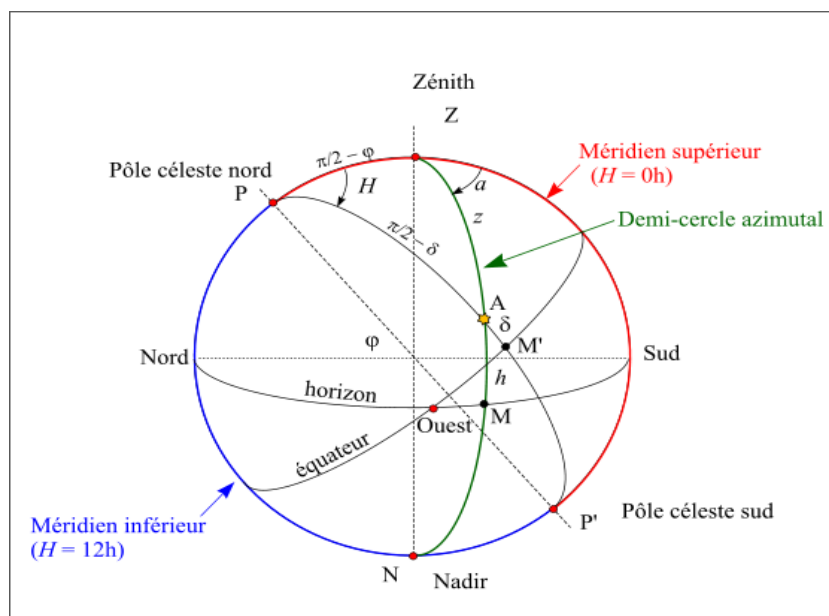


Figure I.1.2-2/ LA SFERE CELESTRE

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

**I.2.1 Grandeur géographique et astronomique**

**I.2.1.1 Repérage d'un site la surface terrestre**

**I.2.1.1.1 Les coordonnées géographiques**

La Terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord, et le pôle Sud.

Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point, ainsi que par son altitude

La **longitude** (L) :

C'est l'angle formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre  $-180^\circ$  (vers l'ouest) et  $+180^\circ$  (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même ( $360^\circ$ ), chaque heure représente  $15^\circ$  d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes (8) (9).

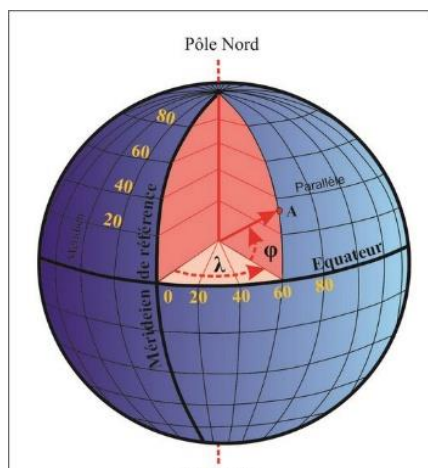


Figure I.2.1-1/ la longitude(L)

La **latitude** ( $\varphi$ ) :

La latitude d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. Elle est comptée positivement de 0 à  $+90^\circ$  vers le nord et négativement de 0 à  $-90^\circ$  vers le sud (1) (11)

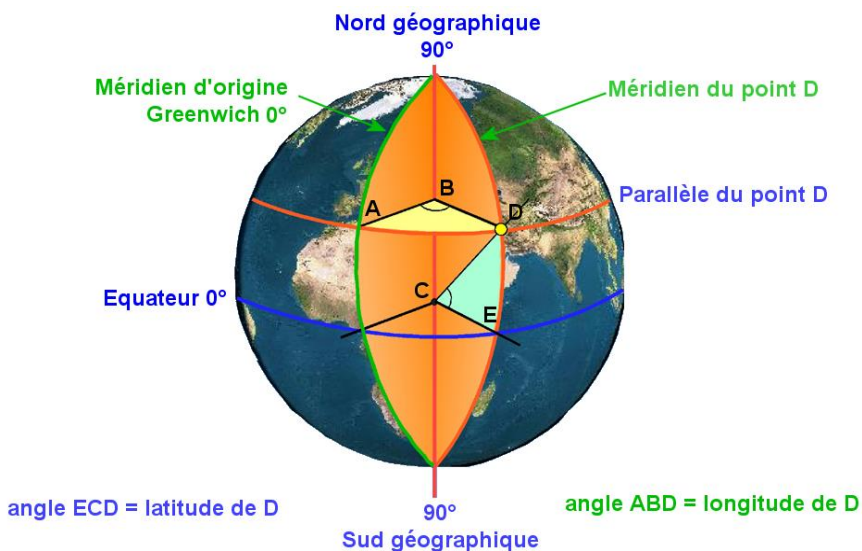


Figure I.2.1-2 / la latitude

### I.2.2 Comment déterminer la direction du soleil

Pour un lieu donné on repère la direction du soleil de deux manières :

- par rapport au plan horizontal du lieu désigné par les coordonnées horizontales liées à un point donné de la Terre.
- par rapport au plan équatorial de la terre désigné par les coordonnées équatoriales.

#### I.2.2.1 Les coordonnées équatoriales

Les coordonnées horaires dont le repère sont données par l'axe des pôles et le plan de l'équateur, le méridien du lieu étant pris comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa déclinaison et son angle horaire

##### I.2.2.1.1 La déclinaison ( $\delta$ ) :

C'est l'angle que forme le vecteur reliant le centre de la terre au soleil et le plan équatorial de la terre. Elle varie de  $+23,45^\circ$  au solstice d'été (21 juin) à  $-23,45^\circ$  au solstice d'hiver (21 décembre) en passant par la valeur  $0^\circ$  aux équinoxes (21 mars et 23 septembre). Cette déclinaison est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestres par rapport au plan écliptique ce qui nous donne les différentes saisons.  $\delta$  est donnée par la

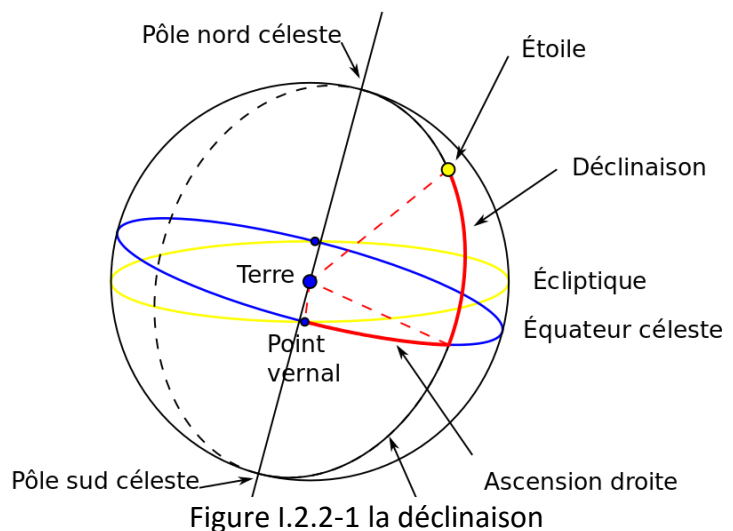


Figure I.2.2-1 la déclinaison

méthode suivante, cette méthode est tirée du livre de Campbell & Norman<sup>3</sup>, formule 11.2, page 168 .cette formule tient compte de l'ellipticité de la trajectoire terrestre (1) (12)

$$\delta = 180/\pi \arcsin\left(\sin\pi \frac{23,45}{180} \sin\left(278.97 + \frac{360}{365.25}J + 1.9165 \sin\left(366.6 + \frac{360}{365.25}J\right)\right)\right)$$

Équation I.2.2-1 équation de la déclinaison

J: Le numéro du jour dans l'année compté à partir du premier janvier.

##### I.2.2.1.2 L'angle horaire ( $\omega$ )

C'est l'angle compris entre la méridien origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante (2)

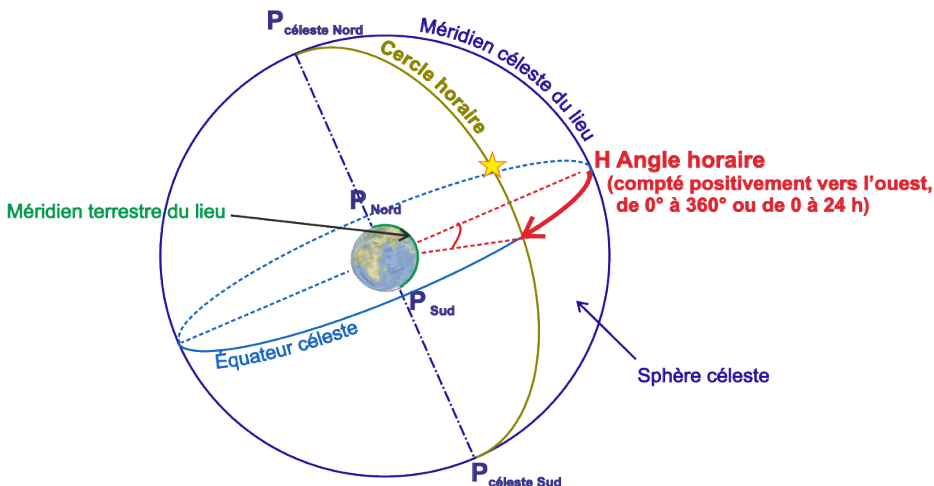


Figure I.2.2-2 l'angle horaire

$$\omega = \frac{180}{12} \times (TSV - 12) = 15 \times$$

(TSV - 12) En degré

Équation I.2.2-2 équation de l'angle horaire

Tsv : temps solaire vrai

Il vaut 0° à midi solaire (quand le soleil atteint son point le plus haut dans le ciel), ensuite chaque heure correspond à une variation de 15°, car la période de la terre dans sa rotation sur elle-même est égale à 24h, et varie entre 180° et -180°, compté négativement le matin lorsque le soleil vers l'Est et positivement le soir.

**I.2.2.2 Les coordonnées horizontales**

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Dans ce repère les coordonnées du soleil sont :

**I.2.2.2.1 La hauteur du soleil (h) :**

La hauteur du soleil est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à 0° au lever et au coucher astronomiques du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et au cours de l'année selon la relation suivante

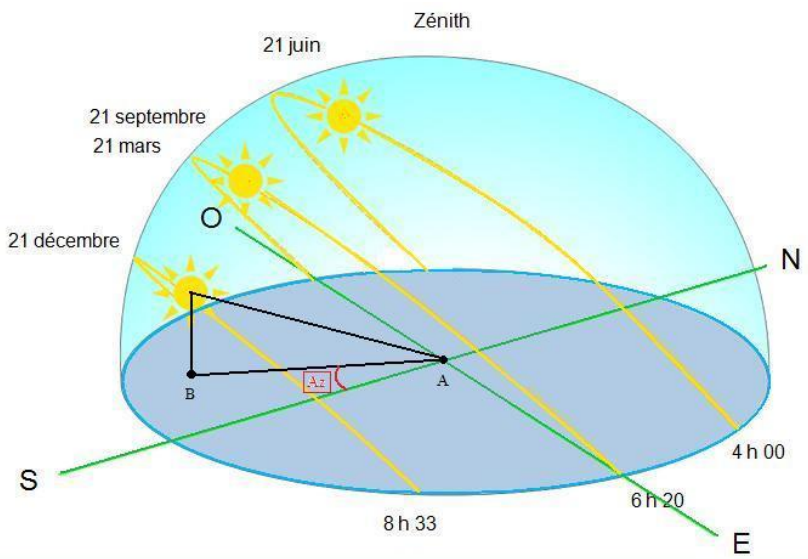


Figure I.2.2-3 la hauteur de soleil

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\varpi)$$

Équation I.2.2-3 de la hauteur du soleil

$\varpi$  : Latitude du lieu

$\delta$  : La déclinaison du soleil

$\varphi$  : L'angle horaire

$h > 0$  correspond au jour

$h < 0$  correspond à la nuit

$h = 0$  correspond au lever et au coucher du soleil

### I.2.2.1.1 Angle du zénith

Le zénith est le point situé à la verticale de l'observateur.

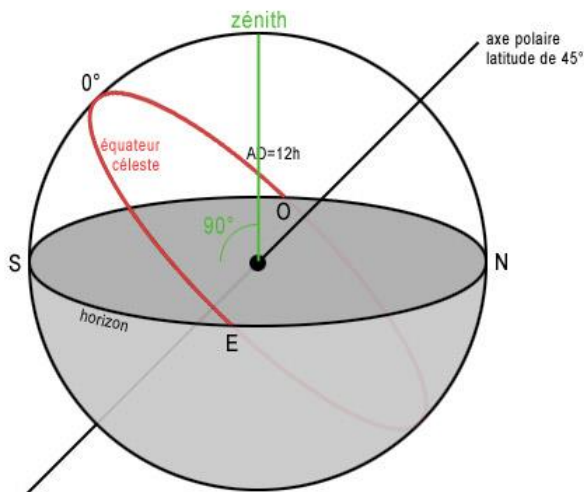


Figure I.2.2-4 l'angle du zénith

Point le plus haut du ciel, à la verticale de la tête de l'observateur. Le zénith est à 90° de hauteur par rapport à l'horizon. (8)

### I.2.2.1.2 L'azimut

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest. Il est donné par la relation suivante

$$A = \arccos\left[-\frac{(\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) - \cos(\delta) \cdot \cos(\varpi) \cdot \sin(\varphi))}{\cos(h)}\right]$$

Équation I.2.2-4 équation du l'azimut

Lorsque  $(\varpi) > 0$   $a = -A$

Lorsque  $(\varpi) < 0$   $a = A$

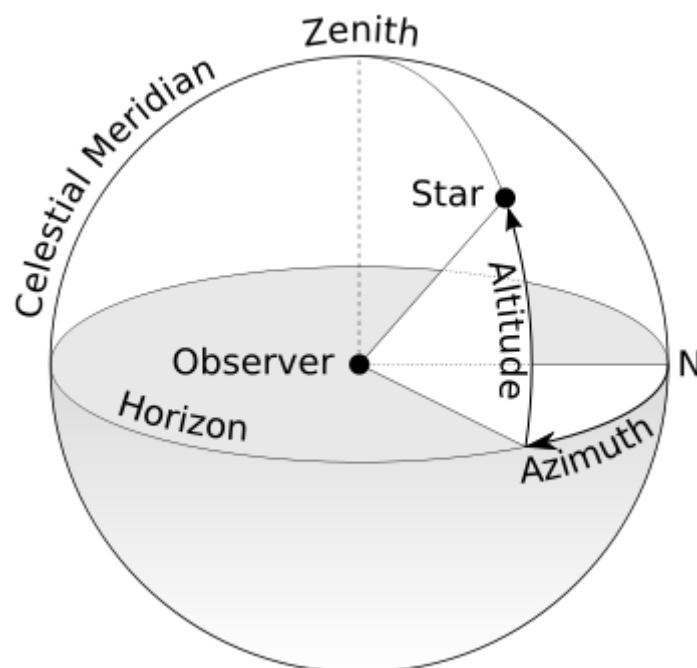


Figure I.2.2-5 les coordonnées horizontale

### I.2.3 Mouvement apparent du soleil

Au cours de la journée, on voit le Soleil décrire une trajectoire circulaire, plus ou moins haute suivant la date (l'axe de rotation étant toujours le même). La direction du lever et du coucher du Soleil, sa hauteur à midi ainsi que la durée de la journée varient au cours de l'année.

Le mouvement apparent du soleil dans le ciel au cours d'une journée provient de la rotation de la Terre (sur elle-même). Cependant, l'étude de ce même mouvement apparent au cours de l'année fait apparaître un décalage qui provient de la révolution de la trajectoire de la Terre (autour du soleil). L'étude de ce mouvement apparent peut donc aboutir à un modèle « Jour-Nuit » ou un modèle « Saisons ».

La trajectoire apparente du Soleil dans le ciel se modifie donc au cours des saisons. Elle est la plus courte au solstice d'hiver (21 décembre); le Soleil se lève pratiquement au Sud-Est et se couche pratiquement au Sud-Ouest et la plus longue au solstice d'été (21 juin); le Soleil se lève pratiquement au Nord-Est et se couche pratiquement au Nord-Ouest. Pour aux équinoxes de printemps et d'automne que le Soleil se lève exactement à l'Est et se couche exactement à l'Ouest.

La durée de la journée évolue au fil de l'année. Dans les régions tempérées, elle est la plus courte à la date du solstice d'hiver et la plus longue à la date du solstice d'été.

Quand le Soleil reste longtemps levé et culmine haut dans le ciel, il chauffe davantage le sol : c'est la saison chaude. À l'inverse, quand les journées sont courtes et que le Soleil reste assez bas, c'est la saison froide. Ce résultat est bien la combinaison de deux éléments : l'inclinaison des rayons du Soleil qui frappent la Terre à un endroit donné et la durée de cette exposition.

À la date des équinoxes, la durée de la journée mesurée entre le coucher et le lever du Soleil est pratiquement égale à 12 heures. Il y a alors égalité entre la durée du jour et celle de la nuit.

Les dates des solstices et des équinoxes changent légèrement d'une année à l'autre. Dans l'hémisphère Nord, elles se situent autour des dates suivantes : 21 septembre (équinoxe d'automne) ; 21 décembre (solstice d'hiver) ; 21 mars (équinoxe de printemps) ; 21 juin (solstice d'été).

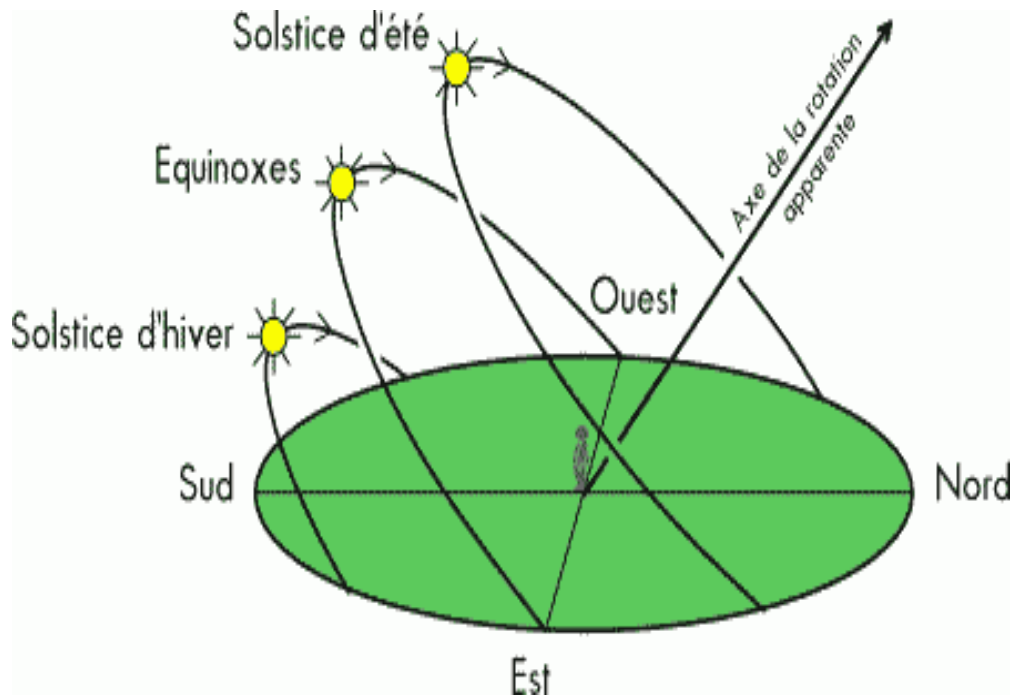


Figure I.2.3-1/course particulière du soleil

### I.3 Le temps soleil

La période de rotation sidérale de la Terre vaut environ 23h56mn04s (=23,9344h), mais pour que le Soleil revienne dans le plan méridien local il faut en moyenne 24h. En effet pendant que la Terre tournait sur elle-même, elle s'est aussi déplacée sur son orbite d'environ  $(360/365,25 = 0,986^\circ)$ .

#### I.3.1 Le Temps Solaire Vrai (T.S.V) :(2)

Le temps solaire vrai TSV, en un lieu, est l'angle horaire en ce lieu et à cet instant. Il est donné par la relation.

$$TSV = 12 + \left(\frac{\varpi}{15}\right)$$

Équation I.3.1-1 équation de TSV

Avec

TSV en heure et  $\varpi$  en degré

TSV= 12H pour la valeur nulle de l'angle horaire (c'est-à-dire midi)

L'écart entre TSV et TSM varie selon la date.

L'expression de cet écart porte le nom de "Equation du temps"

**I.3.2 Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)**

C'est le temps qui correspond à une rotation uniforme de la terre autour du soleil. Il diffère peu du *TSV* (écart maximal  $E_t = 16$  minutes)

Le temps solaire moyen est donné par la relation suivante

$$TSM = TSV - ET$$

Équation I.3.2-1 équation TSM

$E_t$  : est l'équation du temps exprimée en minutes.

**I.3.3 Équation du temps ( $E_t$ ) :**

La différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire apparent est appelé équation du temps. Sur Terre, elle varie entre 17 minutes en moins et 14 minutes en plus:

$$ET = TSV - TSM$$

Équation I.3.3-1 équation de  $E_t$

L'équation du temps peut être approchée par la formule suivante

$$ET = 9.87 \sin[2N] - 7.53 \cos[N] - 1.5 \sin[N]$$

Équation I.3.3-2 équation de  $E_t$

$E_t$  : est l'équation du temps exprimée en minutes.

$N = (2\pi/365) \cdot (j - 81)$  exprimée en radians

**I.3.4 Temps légal  $TL$  :**

C'est l'heure officielle d'un Etat; c'est l'heure du fuseau horaire. La terre est divisée en 24 fuseaux de  $15^\circ$  de large centré sur les méridiens dont la longitude est multiple de 15.

$$TL = TU + DE$$

Équation I.3.4-1 l'équation  $TL$

Avec :  $DE$  : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

**I.3.5 Temps universel  $TU$** 

C'est le temps solaire moyen du méridien fondamental (méridien de Greenwich).

Pour un lieu de longitude  $L$  donnée, on a :

$$TMS = TU + \left(\frac{L}{15}\right)$$

Équation I.3.5-1/ équation de  $TU$

Avec :  $L$  en degré

**I.3.6 Lever et coucher du soleil :**



Pour un jour donné, l'azimut ( $a$ ) et la hauteur ( $h$ ) du soleil sont parfaitement déterminés par l'angle horaire. La hauteur ( $h$ ) est nulle pour deux instants de la journée: le "lever" et le "coucher" du soleil. (2) (12)

La durée du jour  $d$  en heures est par définition

$$d = \frac{2 \times H}{15}$$

Équation I.3.6-1/ équation du lever de soleil

Avec :  $\cos(H) = -\tan(\delta) \times \tan(\varphi)$

Équation I.3.6-2

Le coucher du Soleil (HC) est donné par la relation suivante :

$$HC = \left(\frac{H}{15}\right) + 12$$

Équation I.3.6-3//équation couché soleil

Le lever du Soleil(HL) est

$$HL = HC - d$$

Équation I.3.6-4/équation levé soleil

Détermination de la position du soleil par rapport à un plan incliné :

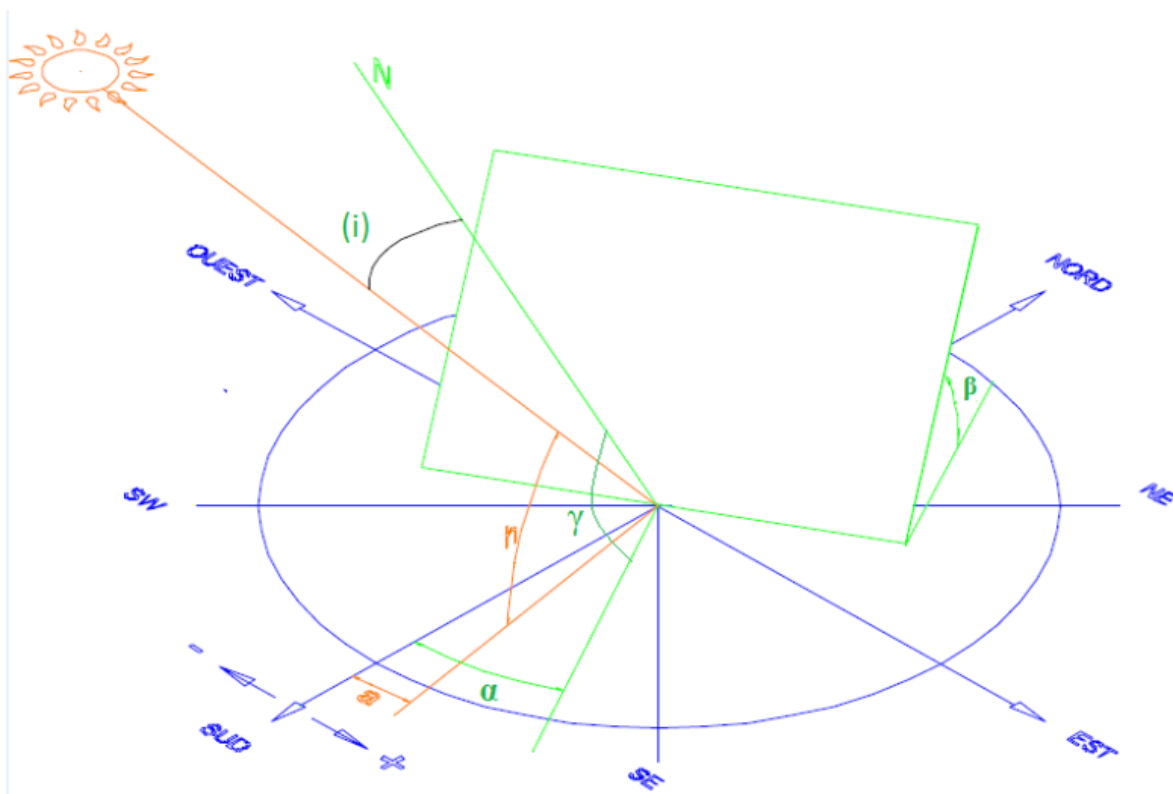


Figure I.3.6-1/ représente les paramètres de position d'un plan incliné

La position d'un plan incliné par rapport au plan horizontal est définie par deux angles ( $\gamma$ ,  $\alpha$ )

### I.3.7 La hauteur du plan $\gamma$ :

C'est l'angle que fait la normale du capteur et sa projection sur le plan horizontal.

$\gamma = 90^\circ$  : plan horizontal

$\gamma = 0$  : plan vertical

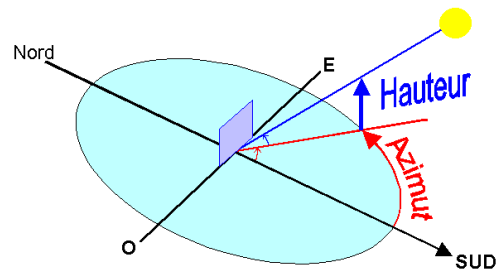


Figure I.3.7-1/ la hauteur

### I.3.8 Azimut du plan $\alpha$ (ou angle d'orientation du plan) :

C'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

$\alpha > 0$  vers l'Est

$\alpha < 0$  vers l'Ouest

$\alpha = 0$  plan orienté vers le Sud

$\alpha = -90^\circ$  plan orienté vers l'Ouest

$\alpha = +90$  plan orienté vers l'Est

### I.3.9 Angle d'incidence sur un plan quelconque :

L'angle d'incidence ( $i$ ) est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan. Cet angle gouverne l'intensité du rayonnement direct interceptée par le plan. Il peut être déterminé en coordonnées horizontales ou en coordonnées horaires

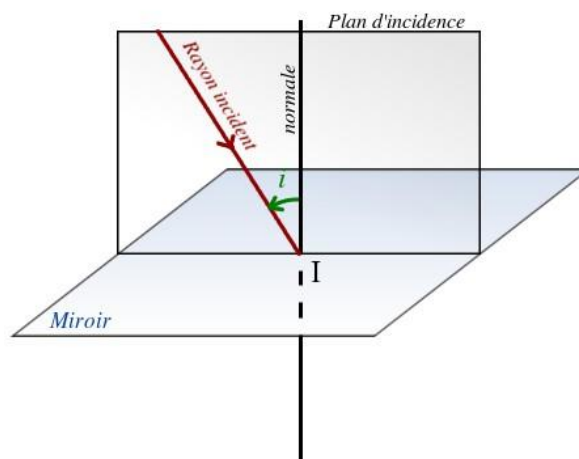


Figure I.3.9-1 /Angle d'incidence sur un plan

quelconque

#### I.3.9.1 Coordonnées horizontales

L'angle d'incidence est donné par :

$$\cos i = \cos \gamma \cos h \cos (\alpha - a) + \sin \gamma \sin h$$

Équation I.3.9-1/ l'angle d'incidence

Or,  $\beta = 90 - \gamma$ . Donc angle d'incidence (i) pour un plan d'inclinaison quelconque  $\beta$  et d'orientation quelconque  $\alpha$  devient

$$i = \arccos (\sin \beta \cos h \cos (\alpha - a) + \cos \beta \sin h)$$

Équation I.3.9-2 angle d'incidence

Avec :

$\gamma$  : hauteur du capteur

$\beta$  : angle d'inclinaison

$\alpha$  : angle d'orientation du capteur

$h$  : hauteur du soleil

$a$  : angle azimut du soleil

En coordonnées horizontales  $i = i(\alpha, \gamma, a, h)$ , deux valeurs  $a$  et  $h$  sont à déterminer pour connaître l'angle d'incidence sur un plan donné.

### 1.3.9.2 En coordonnées horaires

En remplaçant dans l'équation 15, les angles  $h$  et  $a$  par leurs expressions (équations 3 et 14 respectivement), on obtient la relation

$$\cos(i) = \sin \alpha \sin \beta \sin \omega \cos \delta + \cos \alpha \sin \beta [\cos \omega \cos \delta \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi] \cos \beta [\cos \omega \cos \delta \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi]$$

Équation I.3.9-3 angle d'incidence crd horaire

Avec :

$\beta$  : angle d'inclinaison

$\alpha$  : angle d'orientation du capteur

$\varphi$  : Latitude du lieu.

$\delta$  : La déclinaison du soleil.

$\omega$  : L'angle horaire.

En coordonnées horaires (i) est fonction de l'angle horaire  $\omega$ .

Dans les cas particuliers où les surfaces sont horizontales ou verticales avec différentes orientations, l'expression devient :

### 1.3.9.3 Surface horizontale:

$$\gamma = 90^\circ \text{ et } \beta = 0^\circ : \cos(i) = \cos(\varphi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\varphi) \sin(\delta).$$

Équation I.3.9-4/ surface horizontale

### 1.3.9.4 Surface vertical :

$$\gamma = 0 \text{ et } \beta = 90^\circ :$$

Surface verticale orientée vers le Sud :  $\alpha = 0^\circ$ .

$$\cos(i) = \sin(\varphi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\varphi) \sin(\delta).$$

Équation I.3.9-5 surface verticale orientée vers le sud

Surface verticale orientée vers l'Ouest:  $\alpha = -90^\circ$

$$\cos(i) = -\cos(\delta) \sin(\omega).$$

Équation I.3.9-6/ surface verticale orientée vers l'ouest

Surface verticale orientée vers l'Est:  $\alpha = +90^\circ$

$$\cos(i) = \cos(\delta) \sin(\omega)$$

Équation I.3.9-7/ surface verticale orientée vers l'est

### **I.3.9.5 Surface orientée vers le sud et inclinée d'un angle $\beta$ par rapport à l'horizontale :**

$$\cos(i) = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\varphi - \beta) + \sin(\delta) \sin(\varphi - \beta)$$

Équation I.3.9-8 surface verticale orientée vers le sud

### **I.3.10 L'inclinaison $\beta$ :**

L'inclinaison  $\beta$  du capteur est l'angle formé par le plan par rapport à l'horizontale.

On peut extraire l'expression de l'inclinaison  $\beta$  à partir de l'équation 15

Si on a angle d'incidence nulle ( $i=0$ ) alors  $\alpha = a$  en remplaçant dans l'équation 15 devient :

$$\cos(0) = \cos \gamma \cos h \cos(0) + \sin \gamma \sin h \cos(0) = \cos(\gamma h) \gamma h = 0$$

$$\text{Or, } \beta = 90 - \gamma$$

Donc l'expression de  $\beta$  :

$$\beta = 90 - h$$

Équation I.3.10-1 l'expression de l'inclinaison  $\beta$

Avec :

$\beta$  : angle d'inclinaison

$h$  : hauteur solaire ( $^\circ$ )

L'inclinaison varie au cours de la journée. Elle est plus réduite en midi solaire et est plus importante en lever et coucher du soleil

## **I.4 Transfert des rayons solaire a travers l'atmosphère**

### **I.4.1 Les types des rayonnements solaires :**

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que  $1367 \text{ W/m}^2$  (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous

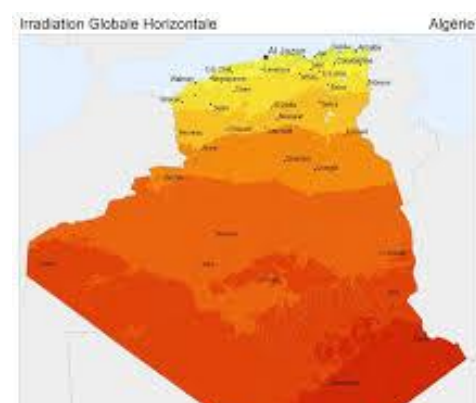


Figure I.4.1-1/ rayonnement solaire en Algérie

forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée.

#### **1.4.1.1 Le rayonnement direct :**

Le rayonnement direct c'est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair. Il est constitué de rayons solaires ayant traversé l'atmosphère terrestre sans subir d'absorption ni de diffusion.

#### **1.4.1.2 Le rayonnement diffus :**

Le rayonnement diffus c'est le rayonnement réfléchi par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. Par ciel clair, la part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu et l'état de l'atmosphère). Le rayonnement global sur la terre et la part de rayonnement diffus varie au cours de l'année

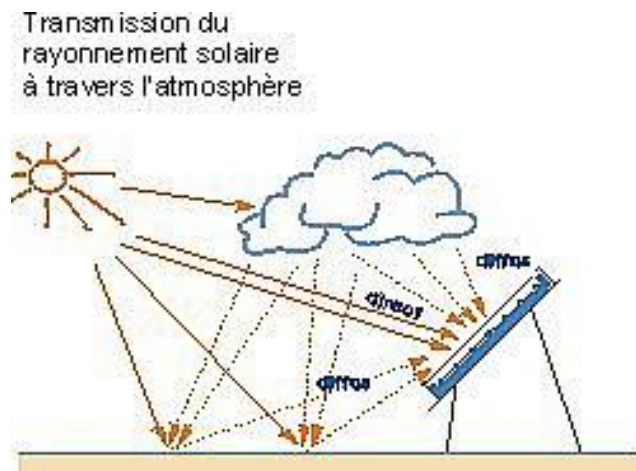


Figure I.4.1-2 les types des rayonnements

#### **1.4.1.3 Le rayonnement global :**

Le rayonnement global d'un plan horizontal est la somme des rayonnements direct et diffus. Pour un plan incliné, il faut ajouter le rayonnement réfléchi par la surface environnante.

### **1.4.2 Gisement solaire en Algérie**

La qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde, De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre

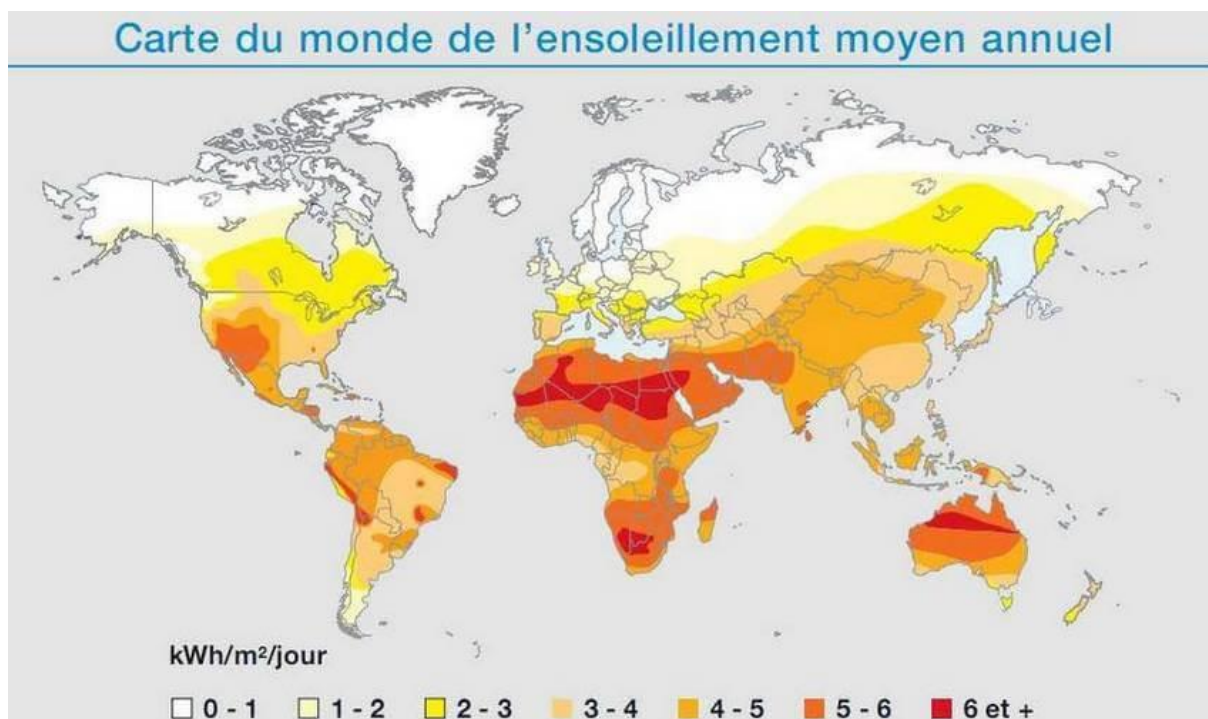


Figure I.4.2-1 Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérienne est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau 2 selon l'ensoleillement reçu annuellement :

Tableau 2/ Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

| Régions                                       | Régions | Hauts | Sahara |
|---|---------|-------|--------|
| Superficie (%)                                | 4       | 10    | 86     |
| Durée moyenne d'ensoleillement (h/m)          | 2650    | 3000  | 3500   |
| Energie moyenne reçue (Km/m <sup>2</sup> /an) | 1700    | 1900  | 2650   |

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie

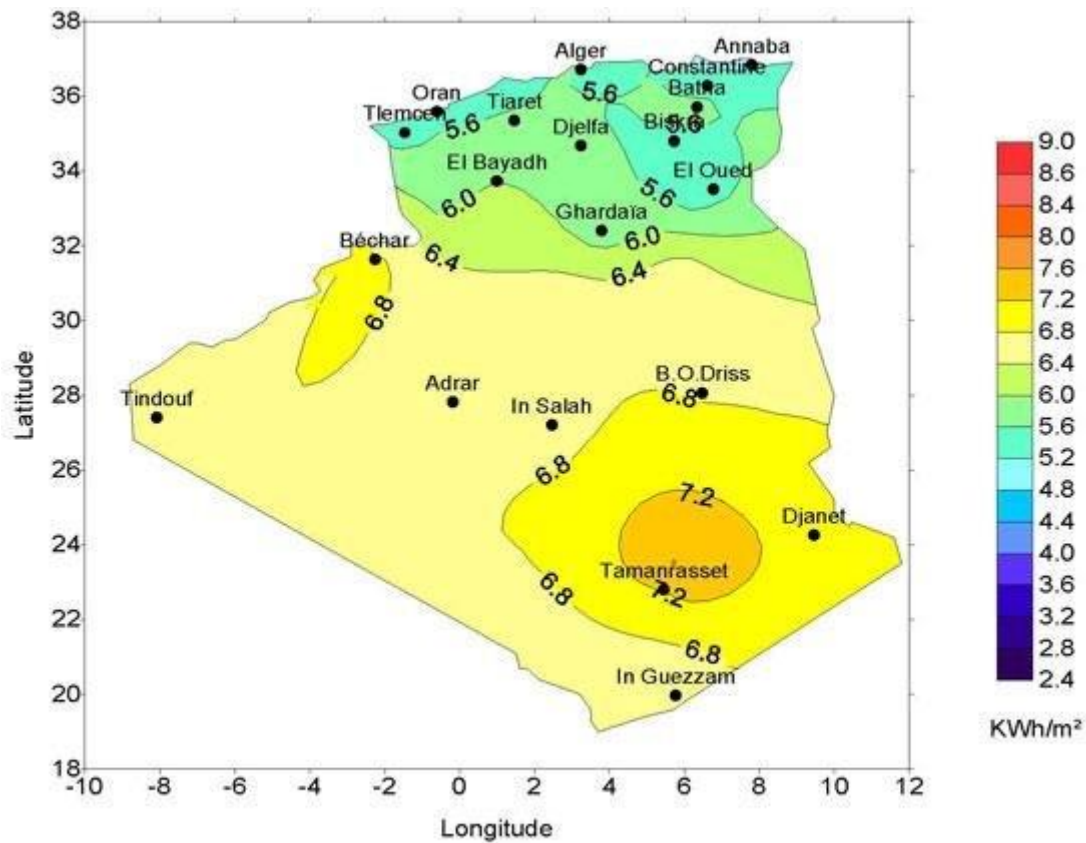


Figure I.4.2-2/ Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné la latitude du lieu

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M (annexe D) réparties sur tout le territoire algérien. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe<sup>4</sup> dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

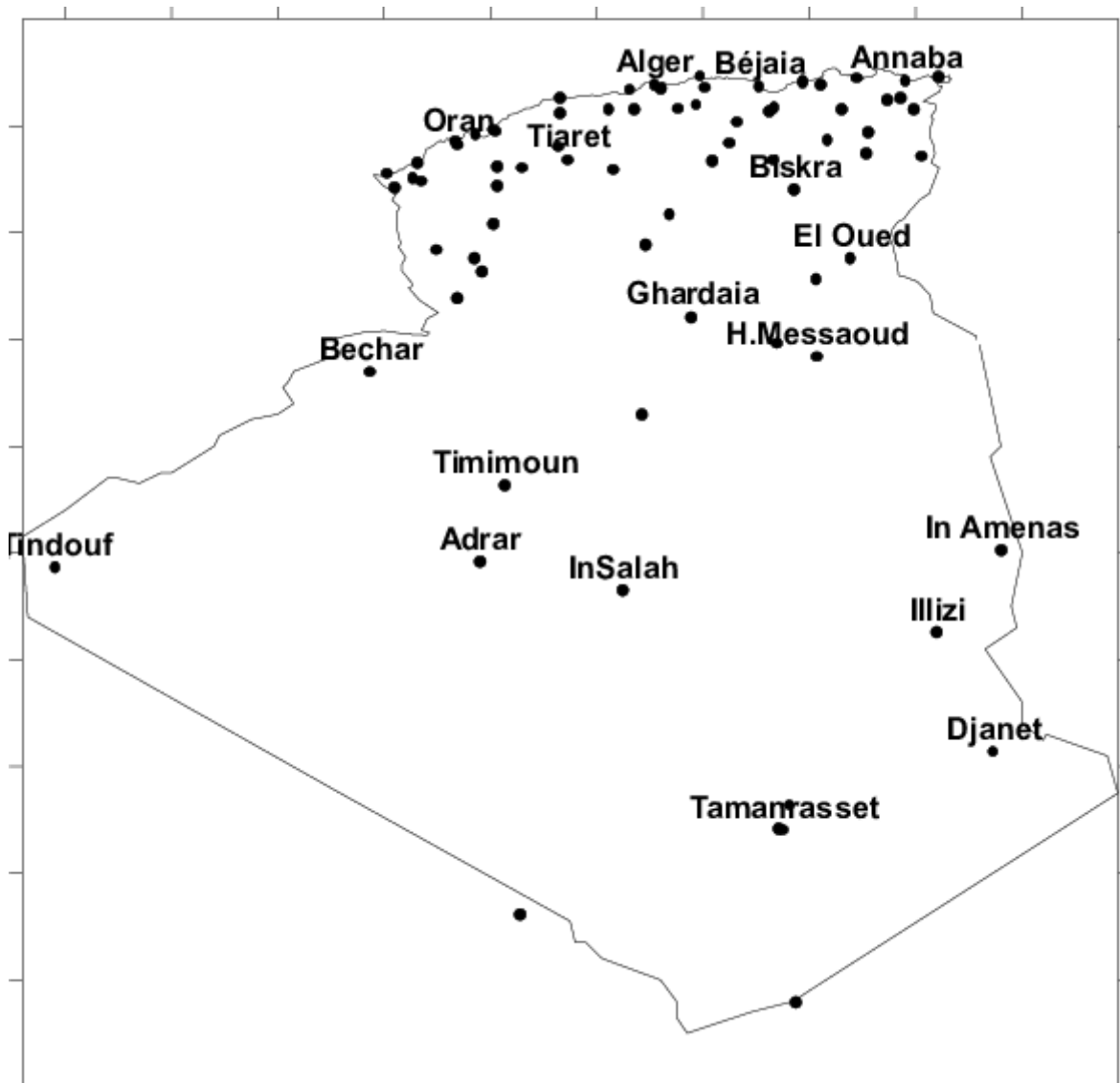


Figure I.4.2-3/ Répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie

## I.5 Conclusion

Le rayonnement solaire reçu par un capteur au niveau du sol dépend des paramètres géométriques du lieu considéré (latitude et la longitude), du positionnement du capteur (inclinaison et l'orientation par rapport au Sud), mais aussi du mouvement apparent du soleil dans le ciel qui est caractérisé par sa hauteur, sa déclinaison et son azimut.

Il est bien connu que le rayonnement solaire qui peut être collecté par un capteur est maximal lorsque le capteur reste constamment orienté vers le soleil. Ceci ne peut être obtenu que grâce à un système de poursuite solaire.

Dans le présent chapitre, on s'est intéressé à une étude détaillée des équations qui régissent le mouvement apparent du soleil par rapport à un lieu donné et à la détermination de la position du soleil par rapport à un plan incliné.

Dans le chapitre suivant, on va s'intéresser à l'étude d'un concentrateur parabolique.



Introduction :

Les systèmes solaires à concentration offrent la possibilité de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, les températures pouvant aisément dépasser les 300°C et le rendement de conversion est élevé généralement. En exploitant le rayonnement solaire direct, considéré comme la ressource principale, qui est très considérable à l'échelle planétaire, ces technologies offrent une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts ainsi que la possibilité de l'hybridation de ces installations. (3)

### I.1 C'est quoi un Concentrateurs parabolique



Figure I.2.1-1/ réflecteur parabolique

C'est un système à réflecteur parabolique (figure22), utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur situé à son foyer. Ce dernier contient un fluide qui absorbe le rayonnement réfléchi, et atteint une température de 750°C à 1000°C. Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité (9).

## I.2 La géométrie du concentrateur parabolique

### I.2.1 Définition

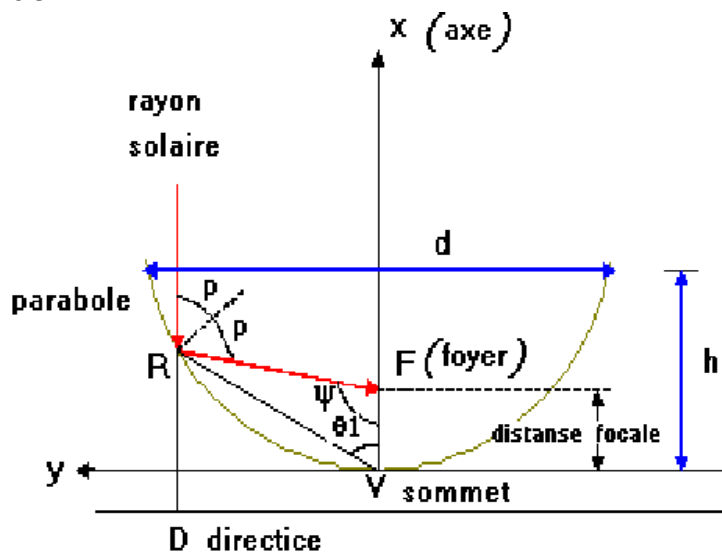


Figure I.2.1-1/ propriété de la géométrie de la parabole

Une parabole est le parcours ou un point qui se déplace de façon que ses distances d'une ligne fixe et un point fixe soient égaux. Ceci est illustré sur la figure 23, où la ligne fixe est appelée la directrice et le point fixe (F) appelé foyer et que la longueur FR est égale à la longueur RD. La ligne perpendiculaire à la directrice et passant par le foyer F est appelé l'axe de la parabole [4]. La parabole croise son axe à un point (V) appelé le sommet, qui est exactement intermédiaire entre le foyer et la directrice (10).

Si l'origine est prise au sommet (V) et l'axe des abscisses le long de l'axe de la parabole,

L'équation de la parabole est :  $Y^2 = 4. f. x$  (11).

Équation I.2.1-1 l'équation de la parabole

f : la distance focale FV

$$p = \frac{2f}{1 + \cos\psi}$$

Équation I.2.1-2 l'équation de rayon parabolique

p : rayon parabolique, distance (RF) entre le foyer (f) et la courbe de la parabole.

$\psi$  : Angle mesuré à partir de ligne (VF) et le rayon parabolique (P).

### I.2.2 Angle d'ouverture d'une parabole (12)

$$\tan \psi\rho = \frac{(f/d)}{2 \left(\frac{f}{d}\right)^2 1/s}$$

Équation I.2.2-1 l'équation de l'angle d'ouverture d'une parabole

d : diamètre d'ouverture de la parabole

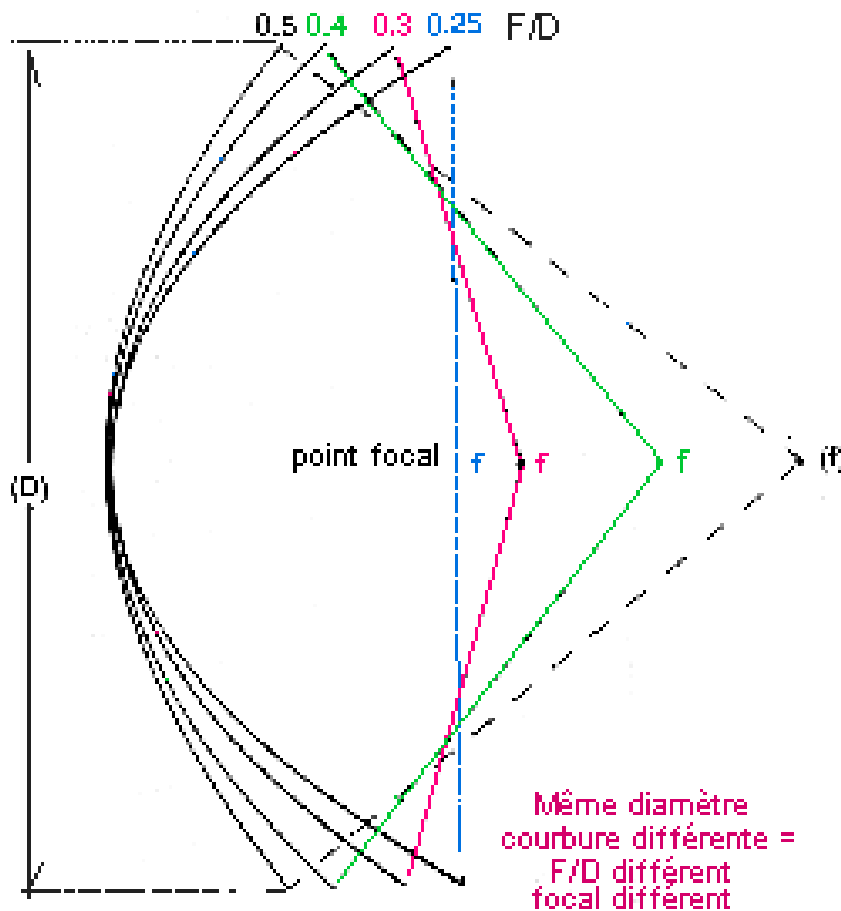


Figure I.2.2-1 l'angle d'ouverture d'une parabole

On peut voir qu'une parabole avec un petit angle d'ouverture est relativement plate et l'augmentation de ce dernier amoindrit la distance focale.

### I.2.3 Taille d'une parabole

La taille de la courbe parabolique h peut être définie comme la distance maximale du sommet à une ligne à travers l'ouverture de la parabole, elle est définie par (13).

$$h = \frac{d^2}{16f}$$

Équation I.2.3-1 l'équation de la taille d'une parabole

De façon semblable, l'angle d'ouverture peut être trouvé en fonction des dimensions d'une parabole :

$$\tan \Psi \rho = \frac{1}{\left(\frac{d}{8h}\right) - \left(\frac{2h}{d}\right)}$$

Équation I.2.3-2 l'équation de la taille

### I.2.4 Surface d'une parabole

C'est l'espace inclut entre une parabole et une ligne à travers son ouverture, elle est

Indiquée par (12) :  $\frac{2}{3} d \cdot h$

Équation I.2.4-1 l'équation de la surface d'une parabole

### I.2.5 Longueur d'arc d'une parabole

La longueur d'arc d'une parabole peut être trouvée en intégrant une équation de cette courbe (l'équation 24), en appliquant les limites  $X=h$  et  $Y=d/2$ , on trouve (14).

$$s = \left[ \left( \frac{d}{2} \right) \times \sqrt{\left( \frac{4h}{d} \right)^2 + 1} \right] + 2f \operatorname{Ln} \left[ \frac{4f}{d} + \sqrt{\left( \frac{4f}{d} \right)^2 + 1} \right]$$

Équation I.2.5-1 l'équation de la longueur d'arc

## I.3 Système optique d'une surface parabolique

D'après les lois de réflexion, tout rayon lumineux parallèle à l'axe de la parabole est réfléchi par la parabole suivant une droite passant par le foyer. Donc la parabole focalise tous les rayons réfléchit en un point appelé « foyer » (11).

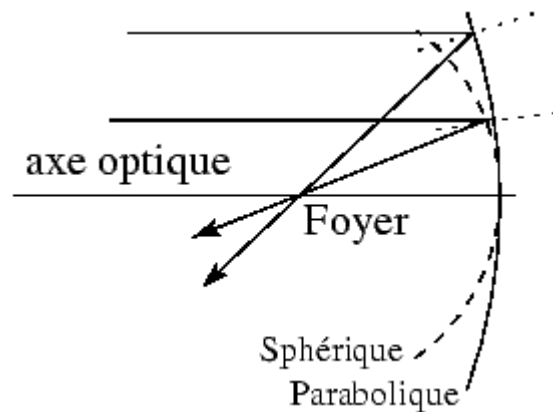


Figure I.2.5-1/ Système optique d'une surface parabolique

## I.4 Les composants d'un concentrateur solaire parabolique :

Le concentrateur solaire parabolique est composé des éléments suivants :

### I.4.1 Réflecteur (paraboloïde)

On obtient un paraboloïde par rotation de la parabole autour de son axe. L'équation pour le paraboloïde de révolution en coordonnées rectangulaires avec l'axe (Z) comme axe de symétrie. Est : (4) (13) (14).

$$Y^2 + X^2 = 4 \cdot f \cdot Z$$

$$Z = \frac{a^2}{4f}$$

Équation I.4.1-1 l'équation du réflecteur

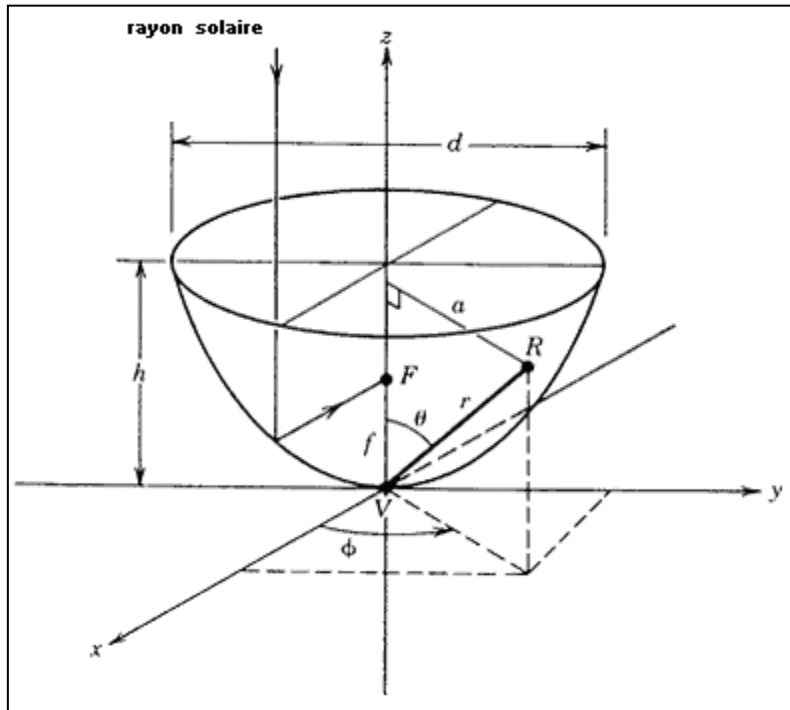


Figure I.4.1-1 Paraboloïde de révolution

La surface du paraboloïde peut être trouvée en intégrant l'équation, Nous pouvons définir une bande différentielle circulaire d'une surface sur le paraboloïde.

$$dAs = 2 \cdot \pi \cdot a \sqrt{dz^2 + da^2}$$

Équation I.4.1-2 la surface d'une parabole

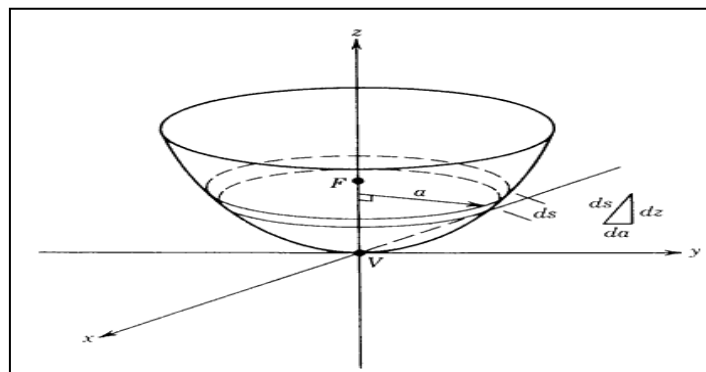


Figure I.4.1-2 Élément différentiel de surface parabolique

$$dAs = 2 \cdot \pi \cdot a \sqrt{\left(\frac{a}{2f}\right)^2 + 1} da$$

Équation I.4.1-3 la surface du parabole

La surface d'un paraboloïde dont la distance focale est f et le diamètre d'ouverture est d est donnée par (14).

$$A_s = \int_0^{\frac{d}{2}} d A_s = 8 \cdot \pi \cdot f^2 \left\{ \left[ \left( \frac{d}{4f} \right)^2 + 1 \right]^{3/2} - 1 \right\}$$

Équation I.4.1-4 la surface du parabole

La surface d'ouverture d'un paraboloïde est :

$$A_a = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Équation I.4.1-5 la surface d'ouverture

Nous trouvons

$$A_a = \frac{\pi}{4} (2 \cdot \pi \cdot \sin \Psi_p)^2$$

Équation I.4.1-6 la surface d'ouverture

$$A_a = 4 \cdot \pi \cdot f^2 \cdot \frac{\sin^2 \Psi_p}{1 + \cos \Psi_p}$$

Équation I.4.1-7 la surface d'ouverture

#### I.4.2 Récepteur (absorbeur)

Le récepteur doit absorber autant de flux solaire concentré possible, et le convertir en énergie thermique, cette chaleur est transférée dans un fluide d'un certain type (liquide ou gaz).

En fonction de leur surface de transfert, on classe les récepteurs solaires en deux catégories :

##### I.4.2.1 Surface externe :

Il y a plusieurs configurations possibles : plane, cylindrique, conique ou sphérique, dépendantes de la répartition, de l'intensité du flux, de la température et de l'application. Ce genre de récepteur s'applique généralement dans la gamme température de l'ordre 300-400°C maximum.

##### I.4.2.2 Surface interne ou cavité :

Ce type de récepteur est bien adapté pour le cas où l'intensité du flux et la température de travail sont élevées. Le flux énergétique concentré entre dans le récepteur par l'ouverture dont la surface est généralement 5 à 10 fois inférieure à celle de la surface de transfert dans la cavité. C'est un moyen efficace pour augmenter le coefficient d'absorption et diminuer les pertes (16).

La surface du récepteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne conductivité et diffusion thermique.
- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Une bonne résistance chimique vis à vis du fluide utilisé.

Il est important que le récepteur soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre : 360 w/m.k, aluminium : 200 w/m.k, acier 60 w/m.k) (9). Plus le coefficient de conduction est faible et plus l'absorbeur doit être épais, ce qui augmente le prix et l'inertie de l'absorbeur.

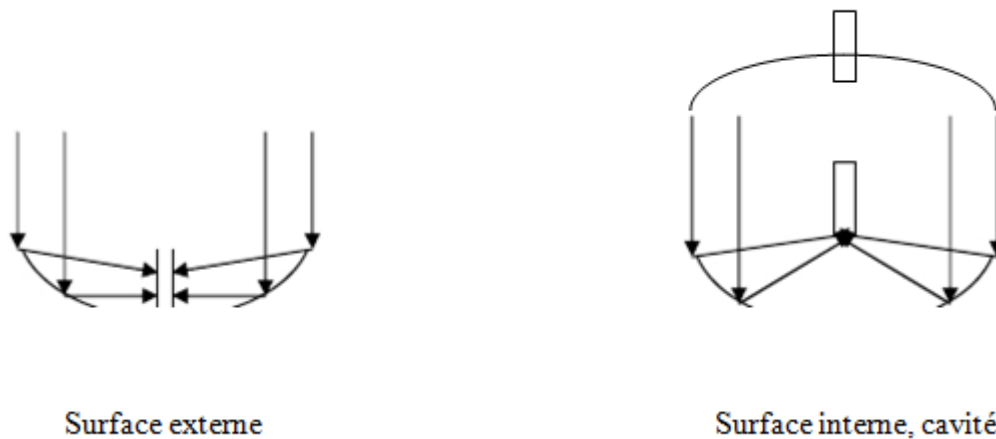


Figure I.4.2-1 Catégories des récepteurs

Notre étude est concernée par des températures élevées, nous allons donc étudier un récepteur type cavité sous forme cylindrique.

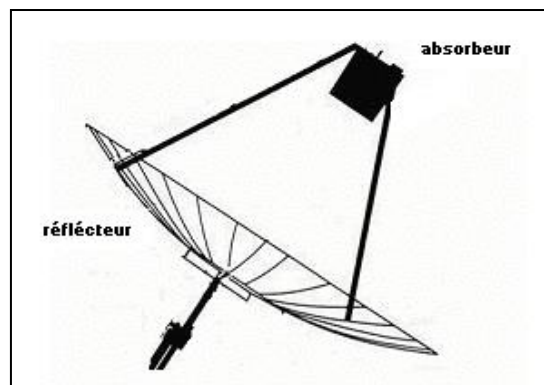


Figure I.4.2-2 Concentrateur solaire parabolique

## I.5 Dimensions du récepteur

Nous avons vu que la parabole réfléchit tous les rayons lumineux parallèles à son axe en un point foyer. En raison de la taille angulaire finie du disque solaire, on peut attester que le diamètre apparent du disque solaire  $\theta_s$  est égal à 0.0093 mrad (17).

Quand l'angle d'ouverture d'une parabole en parfait état est aligné vers le soleil, la réflexion des rayons forme une image circulaire (tache solaire) centrée au point focal sous forme d'ellipse. Le petit rayon  $s_f$  et le grand rayon  $r_f$  de l'ellipse sont indiqués comme suit (17) (18) :

$$s_f = \frac{f \cdot \theta_s}{1 + \cos\Psi}$$

Équation I.4.2-1 le petit rayon  $s_f$

$$r_f = \frac{f \cdot \theta_s}{(1 + \cos\Psi)\cos\Psi}$$

Équation I.4.2-2 le rayou  $r_f$

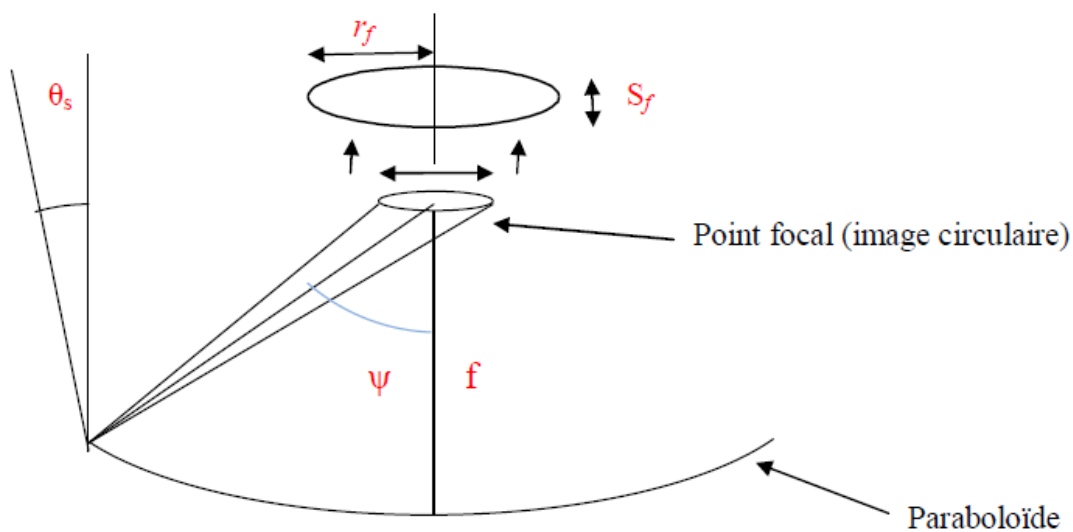


Figure I.4.2-1 L'image ellipsee

$r_f$ : Diamètre minimum de l'image circulaire centrée au point focal en négligeant l'erreur de poursuite du soleil et l'erreur de focalisation du l'absorbeur

Pour que l'ouverture du récepteur capte tous les rayons du champ arrivant au foyer, le récepteur doit avoir un rayon minimum égal à la taille de la tache solaire. Comme en application solaire, son diamètre est petit, on peut augmenter ce diamètre qui varie selon la distance axiale arrière de point focal (L).

Le diamètre d'ouverture du récepteur est donné par

$$d_2 = \frac{d \cdot L}{f - h}$$

Équation I.4.2-3 Le diamètre d'ouverture du récepteur

$d_2$ : diamètre d'ouverture du récepteur.  
 L : distance axiale arrière du point focal.

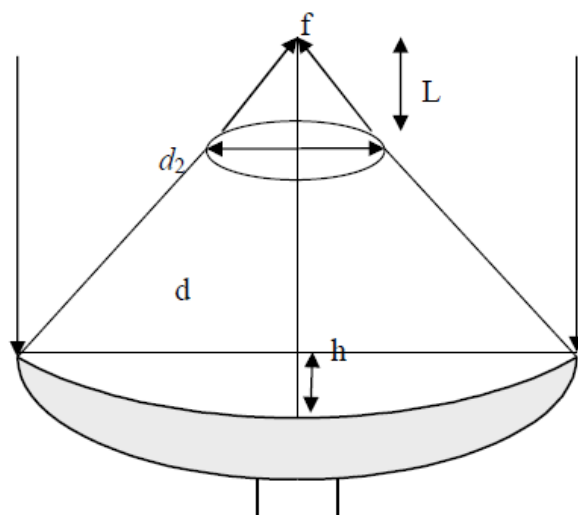


Figure I.4.2-2 Distance axiale arrière du point focal



## I.6 La Concentration

Ce paramètre indique la quantité de concentration légère d'énergie réalisée par un collecteur donné, Les deux définitions normales de la concentration solaire sont la concentration géométrique (surface) et la concentration système optique (flux).

### I.6.1 Concentration géométrique

C'est le rapport de la surface de l'ouverture du collecteur  $A_a$  celle du récepteur  $A_r$

$$C_g = \frac{A_a}{A_r}$$

Équation I.6.1-1 Concentration géométrique

### I.6.2 Concentration optique

$$C_o = \frac{I_r}{I_a}$$

Équation I.6.2-1 concentrateur optique

$I_r$  : L'énergie reçue à l'ouverture du récepteur.

$I_o$  : L'énergie reçue à l'ouverture du paraboloïde.

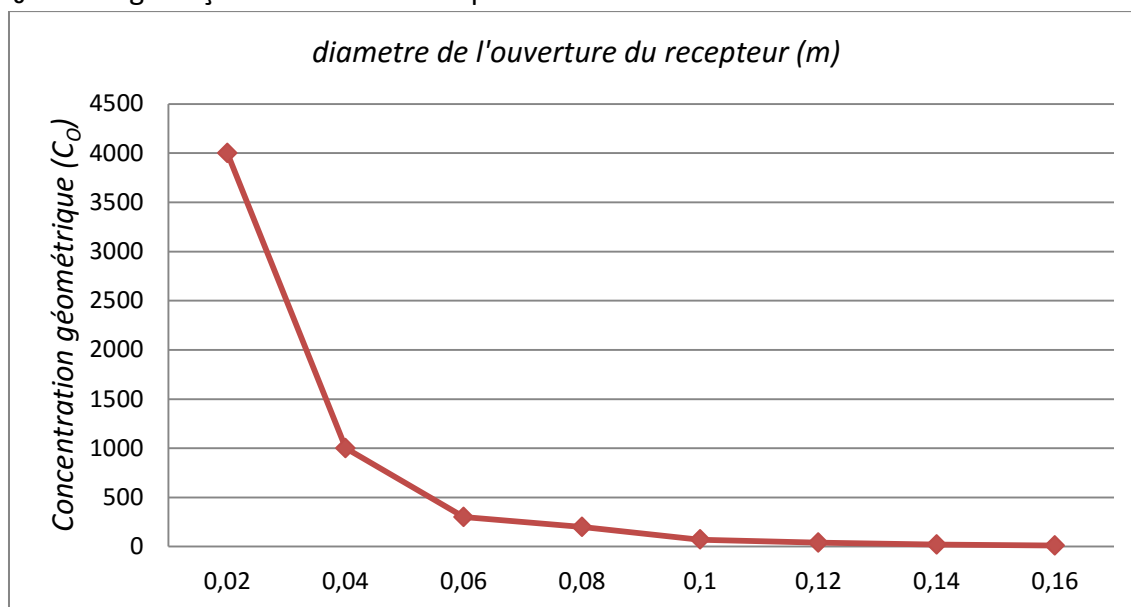


Figure I.6.2-1. Concentration géométrique à différentes valeurs du récepteur ( $d_2$ )

On remarque que l'optique peut délivrer des concentrations théoriques supérieures à 100000, ce qui est considérable. Dans la pratique on réalise des concentrateurs paraboliques dont les rapports réalisables de la concentration sont beaucoup plus petits, en tenant compte de la contribution des erreurs sur la qualité géométrique des surfaces, de l'erreur de poursuite du soleil et l'erreur de focalisation du récepteur, on peut obtenir des concentrations de l'ordre de 40000 (19).

On peut définir la concentration d'un concentrateur parabolique par

$$C = \frac{4\sin^2\Psi}{\theta_s^2}$$

Équation I.6.2-2 la concentration d'un concentrateur

La concentration maximale  $C_{\max} = 46250$  pour  $\Psi = 90^\circ$

### I.7 Température de l'ouverture du récepteur

Pour calculer la température de l'ouverture du récepteur, nous supposons les hypothèses suivantes :

- Le récepteur sous forme cylindrique plein d'eau.
- La température du ciel égale à la température ambiante.
- La température est uniforme sur l'ouverture du récepteur

Le bilan énergétique de la surface d'ouverture du récepteur est donné par la formule suivante

$$(M_w C_w + M_r C_r) \frac{dT}{dt} = Q_u$$

Équation I.6.2-1 le bilan énergétique de la surface

$M_w$  : masse de l'eau.

$C_w$  : chaleur massique de l'eau.

$M_r$  : masse du récepteur.

$C_r$  : chaleur massique du récepteur.

$Q_u$  : puissance utile.

$$Q_u = Q_a - Q_p$$

$Q_a$  : puissance solaire absorbée par le récepteur.

$Q_p$  : puissance correspondant aux pertes thermiques.

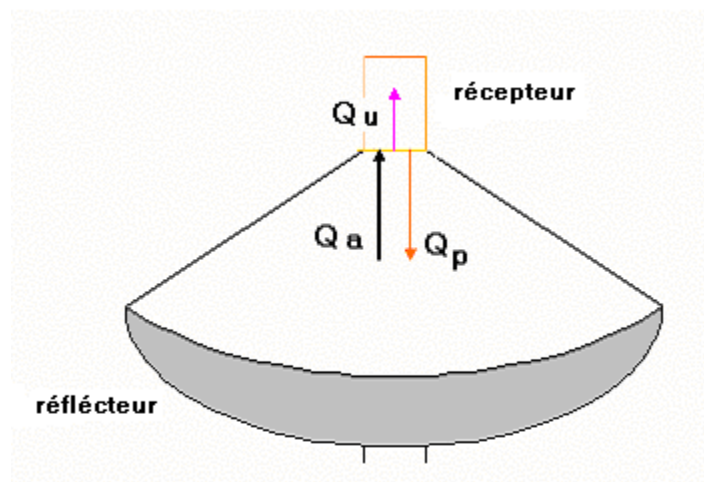


Figure I.6.2-1 Bilan énergétique

### 1.7.1 L'énergie reçue à l'ouverture d'un paraboloïde

Supposons un rayon solaire incident, avec l'intensité  $I_b$  parallèle à l'axe de la parabole, ce rayon sera reflète au foyer  $f$ . Puisque nous voudrions calculer toute la quantité des rayons reflétés par la surface entière de la parabole, il est commode que nous considérons un secteur différentiel qui peut être intégré au-dessus de la surface entière de la parabole.

La surface différentielle est définie comme (10).

$$dA_s = I ds$$

Équation 1.7.1-1 la surface différentiel

$ds$  = longueur différentielle d'arc de la parabole

$I$  = longueur d'une bande différentielle sur la surface d'une cuvette parabolique.

$$ds = p \sin(\psi) / \left(\frac{\cos\psi}{2}\right)$$

L'angle  $d\psi$  est petit,  $\sin d\psi = d\psi$  donc réduite à :

$$dS = \frac{p(p\psi)}{\cos\psi/2}$$

$$dA_s = \frac{I p (d\psi)}{\cos\psi/2}$$

Tout le flux radiant reflété ( $dI_a$ ) de ce secteur différentiel (n'assumant aucune perte de réflectivité) au point de foyer est (10)

$$\begin{aligned} dI_a &= dA_s I_b \cos(\Psi / 2) \\ &= I \cdot p \cdot I_b \cdot d\psi \end{aligned}$$

En remplaceant ( $p$ ) par sa valeur, on trouve

$$dI_a = \frac{2 f I I_b d\psi}{(1 + \cos\psi)}$$

On a :  $I = 2 \times \pi \times p \times \sin\Psi$

$$I = \frac{4 f \pi \sin\psi}{1 + \cos\psi}$$

L'énergie reçue à l'ouverture d'un paraboloïde est [8]

$$I_a = \int \frac{8 \cdot \pi \cdot f^2 I_b \cdot \sin\Psi \cdot d\Psi}{(1 + \cos\Psi)^2}$$

Équation 1.7.1-2 L'énergie reçue à l'ouverture

### 1.7.2 Puissance solaire absorbée par l'ouverture du récepteur

L'énergie reçue à l'ouverture d'un paraboloïde, en arrivant sur l'ouverture du récepteur, est réduite à cause des pertes. La puissance absorbée est donnée par la formule suivante (10)

$$Q_a = I_b \cdot A_a \cdot \alpha \cdot \rho \cdot \tau$$

$$\text{On a : } \eta_{op} = \alpha \cdot \rho \cdot \tau \cdot A_a$$

Devient ;

$$Q_a = \eta_{op} \cdot I_b$$

$\eta_{op}$  : rendement optique du concentrateur.

$I_b$  : énergie reçue à l'ouverture du concentrateur.

$\tau$  : Coefficient de transmission du récepteur.

$\alpha$  : Coefficient d'absorption du récepteur.

$\rho$  : Coefficient de réflexion de la parabole

### 1.7.3 Puissance correspondant aux pertes thermiques

Une fois que l'énergie solaire passe vers la surface d'ouverture du récepteur, elle relève sa température au-dessus de la température ambiante, cette variation de température provoque un processus des pertes de chaleur, ce sont des pertes par convection, par rayonnement et par conduction. La puissance correspondant aux pertes thermiques est donnée par l'expression suivante (20)

$$Q_p = Q_{p.cv} + Q_{p.r} + Q_{p.cd}$$

$Q_p$  : puissance correspondant à la perte thermique

$Q_{p.cv}$  : pertes par convection

$Q_{p.r}$  : pertes par rayonnement

$Q_{p.cd}$  : pertes par conduction

#### 1.7.3.1 Pertes par convection

La convection est un phénomène encore peu connu pour la plaque plane. Elle est de plus liée à la vitesse et la direction du vent sur le site. Ces pertes sont proportionnelles à la surface du récepteur et la différence entre la température de surface d'absorbeur et l'air ambiant

$$Q_{p.cv} = h_{cv} A_y (T_r - T_a)$$

$A_y$  : surface d'ouverture du récepteur

$T_r$  : température du récepteur

$T_a$  : température ambiante

$h_{cv}$  : Coefficient de transfert par convection est donne par

$$h_{cv} = Nu \cdot K / d^2$$

$$Nu = 0.664(Re)^{1/3}(Pr)^{1/3}$$

$$Re = V \cdot \frac{d^2}{\nu}$$

$V$  : vitesse du vent

$K$  : conductivité thermique de l'air

$\nu$  : viscosité de l'air

$d_2$  : diamètre du récepteur

### 1.7.3.2 Pertes par rayonnement

Ces pertes dépendent de la forme du récepteur mais plus particulièrement de la température du récepteur. Ils sont proportionnels à l'émissivité de l'absorbeur

$$Q_{pr} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A (T_r^4 - T_{sk}^4)$$

$\varepsilon$  : Facteur émissivité de l'absorbeur.

$\sigma$  : Constante de Stefan – Boltzmann ( $5,670 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

$T_{sk}$  : température du ciel.

La température équivalente du rayonnement du ciel dépend de la densité d'air et de son contenu d'humidité, quand l'humidité relative est haute où qu'on soit au niveau de la mer, on peut supposer que la température du ciel est identique à la température de l'air ambiant. Cependant pour la basse humidité relative ou aux altitudes élevées, la température du rayonnement du ciel peut être inférieure de 6°C que la température ambiante.

Habituellement on prend :

$$T_{sk} = T_a - 6$$

On peut écrire sous la forme suivante ;

$$Q_{py} = A_r \cdot h_r (T_r - T_a)$$

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \frac{T_r^4 - T_a^4}{T_r - T_a} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^3 \left[ 1 - \left( \frac{\Delta T}{2T} \right)^2 \right]$$

ou :  $T = (T_r - T_a)/2$

### 1.7.3.3 Pertes par conduction

Liées à la nature du matériel utilisé

$$Q_{p.cd} = K \cdot A \gamma (T_r - T_a)$$

$K$  : Conductivité de l'absorbeur.

Les pertes par conduction sont habituellement petites comparées aux pertes par convection ou par rayonnement, on peut les combiner avec les pertes par convection dans la plupart des cas.

On calcule la température d'ouverture du récepteur à partir de l'équation (45), Après les calculs précédents, l'équation (45) devient

$$Q_u = \eta_{op} I_b A_a - A_r (h_{cv} (T_r - T_a) + \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_{sk}^4))$$

$$Q_u = \eta_{op} I_b A_a - A_r (h_{cv} (T_r - T_a) + h_r (T_r - T_a))$$

$$Q_u = A_r \left( \eta_{op} I_b \frac{A_a}{A_r} - (h_{cv} + h_r) (T_r - T_a) \right)$$

Pour simplifier les calculs, on peut définir un coefficient  $K_{v.r}$  tel que

$$Q_u = A_r (P_a - K_{v.r} (T_r - T_a))$$

Où  $K_{v.r}$  est le coefficient global des pertes donné par  $K_{v.r} = h_{cv} + h_r$

$$Pa = \eta \rho b C g$$

On écrit :  $CM = C_w M_w + C_r M_r$

Devient :

$$M C dTr = Ar(Pa - Kv.r(Tr - Ta))dT$$

Après intégration depuis  $t_0$  jusqu'à  $t$ , on obtient l'expression de la température en fonction du temps

$$Tr(t) = Ta + Pa/Kv.r - (Pa/Kv.r - Tr(t_0) + Ta) \exp\left(-Kv.r \frac{Ar(t - t_0)}{MC}\right)$$

## I.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'identifier les différents paramètres constitutifs du concentrateur et l'influence des différentes dimensions de ce dernier sur son efficacité.

On a aussi constaté que l'erreur de poursuite influe considérablement sur le rapport de concentration, on en conclue donc que l'efficacité du concentrateur dépend aussi de la précision du mécanisme de poursuite

Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une vue d'ensemble du dispositif expérimental que nous avons réalisé «Suiveur Solaire parabolique à Base de capteurs de lumière».

Ce système suiveur est constitué d'une partie mécanique qui sert à supporter le panneau et le diriger vers le rayonnement perpendiculaire du soleil et également une partie électronique constituée des capteurs solaires, une carte microcontrôleur « Arduino » et des moteurs électriques.

## I.1 Schéma synoptique

La figure II.7.3.1 présente schéma synoptique général de notre réalisation. Le système suiveur du soleil que nous proposons pour améliorer le rendement du panneau photovoltaïque est illustré par un schéma synoptique.

Ce système est basé sur la comparaison des tensions délivrer par des capteurs photovoltaïque et envoyer ces tension ver la carte microcontrôleur « Arduino ». Elles vont être converti dans cette dernière en valeur numérique puis on fait la comparaison et gère la commande des deux moteurs à fin de rétablir la position d'équilibre entre les capteurs pour avoir un grand rendement.

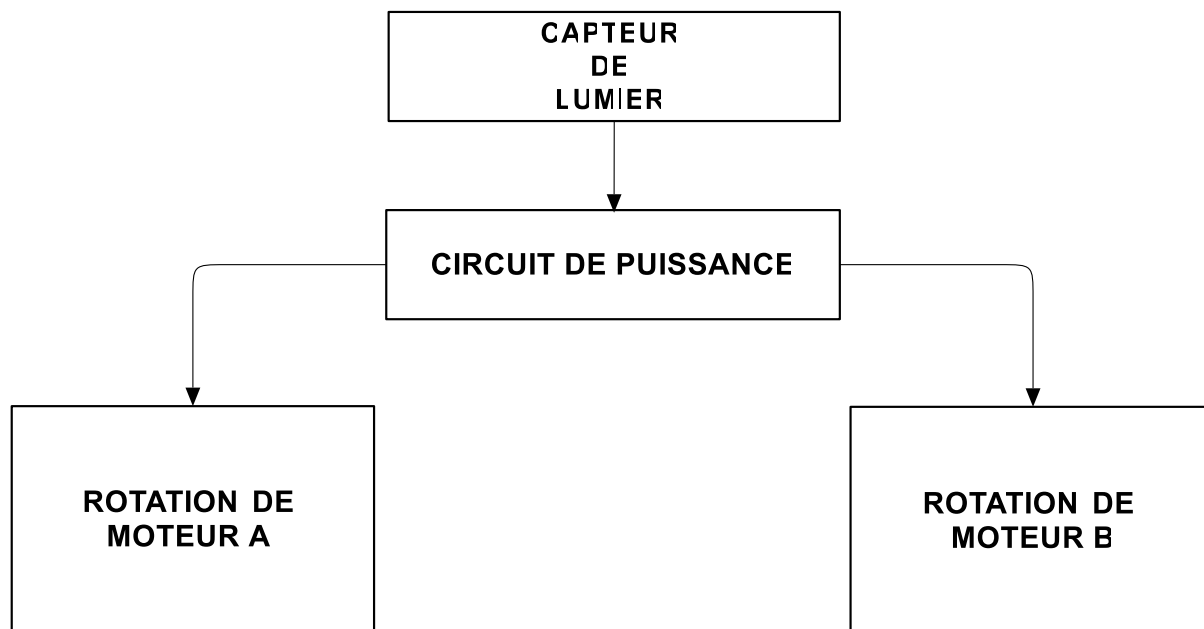


Figure I.2.1-1 .schéma synoptique

## I.2 Etude des différents blocs

### I.2.1 Les capteurs de lumière

Le capteur qu'on a utilisé est la photorésistance ou LDR. C'est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle elle est exposée (5). En effet, sa résistance varie en

fonction du flux lumineux incident, elle est inversement proportionnelle à la lumière reçue. Le choix s'est porté sur cette dernière vu que son temps de réponse est beaucoup plus court par rapport à la photodiode.

Figure I.2.1-1 Photo – Photorésistance LDR

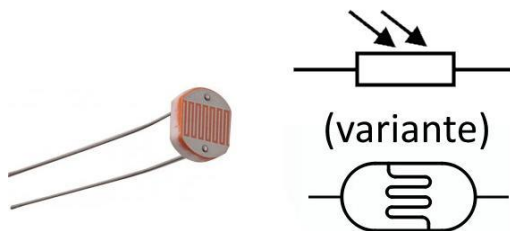
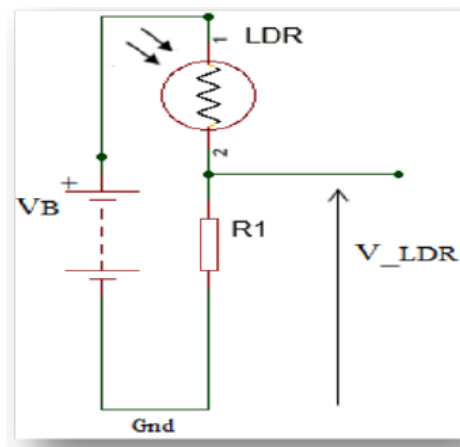


Figure I.2.1-2 Circuit équivalent du capteur LDR



La tension délivrée par le capteur est donnée par la relation

$$v - LDR = \frac{VB \times R1}{R - LDR + R1}$$

Équation I.2.1-1 La tension délivrée par le capteur

où : VB : tension batterie (V)

R-LDR : résistance de la LDR (Ω)

**I.2.1.1 Suiveur double axe**

Il est basé sur la différence d'éclairément des quatre LDR.

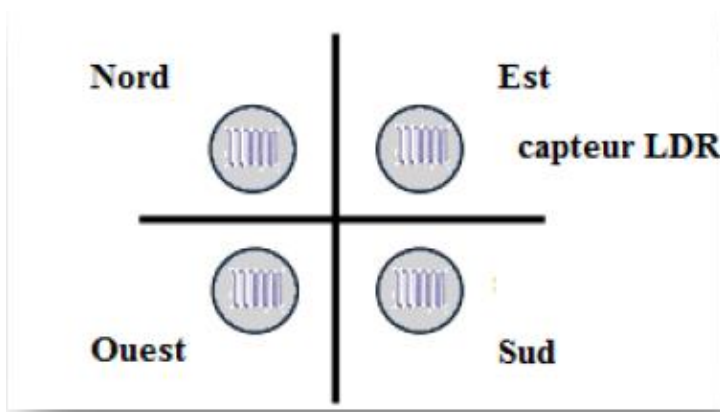


Figure I.2.1-3 Schéma du prototype des quatre capteurs LDR.



## I.2.2 Le circuit de commande

Le circuit de commande de notre système est basé complètement sur un circuit programmable dit « Arduino », l'avantage de ce dernier est de minimiser la surface des cartes électriques donc on minimise l'utilisation des quantités des composants électroniques.

### I.2.2.1 Définition de la carte Arduino

Arduino est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation.

### I.2.2.2 Arduino MEGA 2560 R3

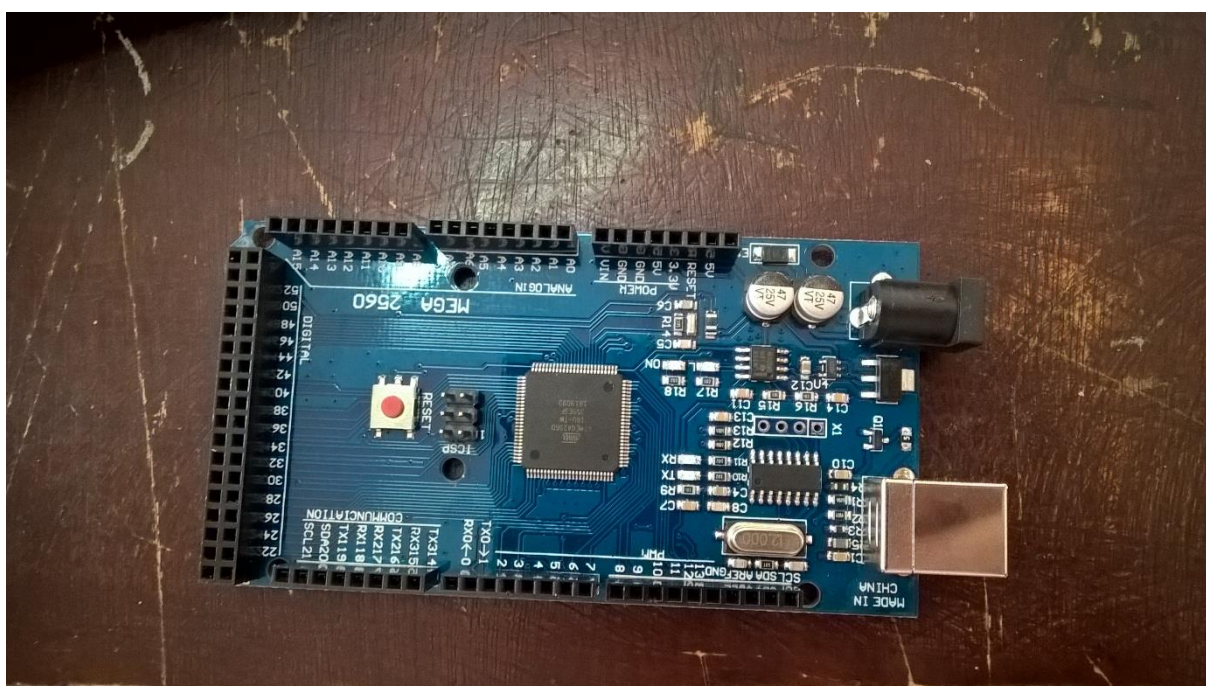


Figure I.2.2-1 Carte Arduino mega 2650

La carte Arduino Mega 2560 est une carte à microcontrôleur basée sur un ATmega2560

Cette carte dispose :

- de 54 (!) broches numériques d'entrées/sorties (dont 14 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)),
- de 16 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
- de 4 UART (port série matériel),
- d'un quartz 16Mhz,
- d'une connexion USB,
- d'un connecteur d'alimentation jack,
- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),
- et d'un bouton de réinitialisation (reset).

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur; Pour pouvoir l'utiliser et se lancer, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB (ou de l'alimenter avec un adaptateur secteur ou une pile, mais ceci n'est pas indispensable, l'alimentation étant fournie par le port USB). (6)

#### Câble USB :

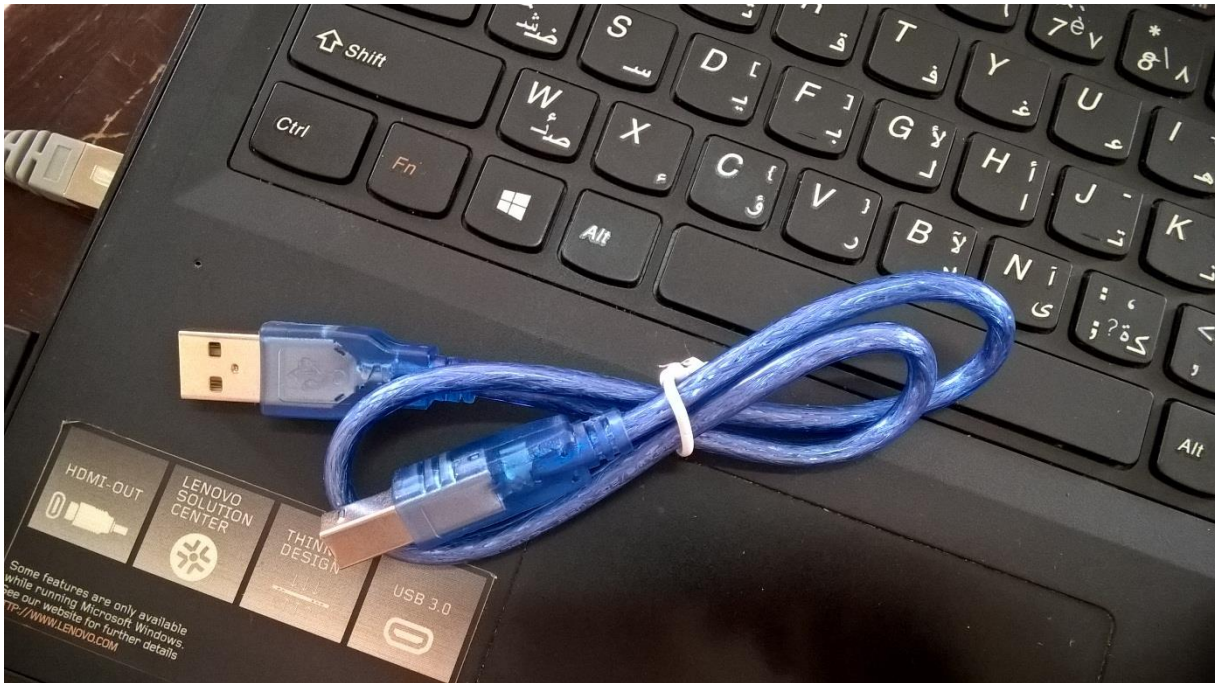


Figure I.2.2-2 câble USB

Le câble USB permet à la fois d'alimenter un projet Arduino, de programmer la carte (via Arduino IDE) mais aussi d'utiliser le Moniteur Série (7).

#### Fils de pin d'Arduino :

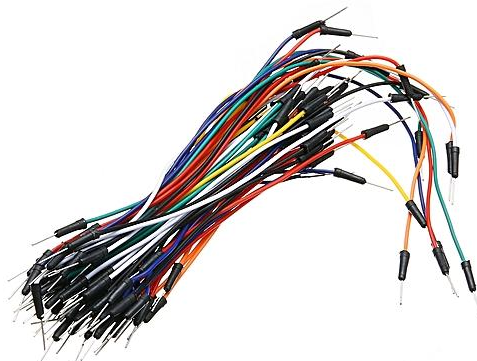


Figure I.2.2-3 fils de pin d'Arduino

Ces fils males sont utilisés pour brancher et connecter l'Arduino avec d'autre pièce et pour les tests.

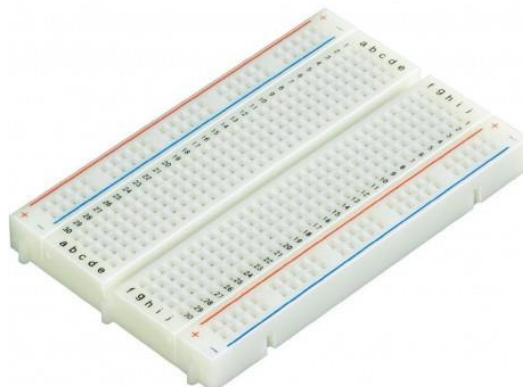


Figure I.2.2-4 plaque d'essaye

La plaque d'essai est un dispositif qui permet de réaliser le prototype d'un circuit électronique elle est utilisé dans la plupart des expériences d'Arduino.

### I.2.3 Circuit de puissance L298n

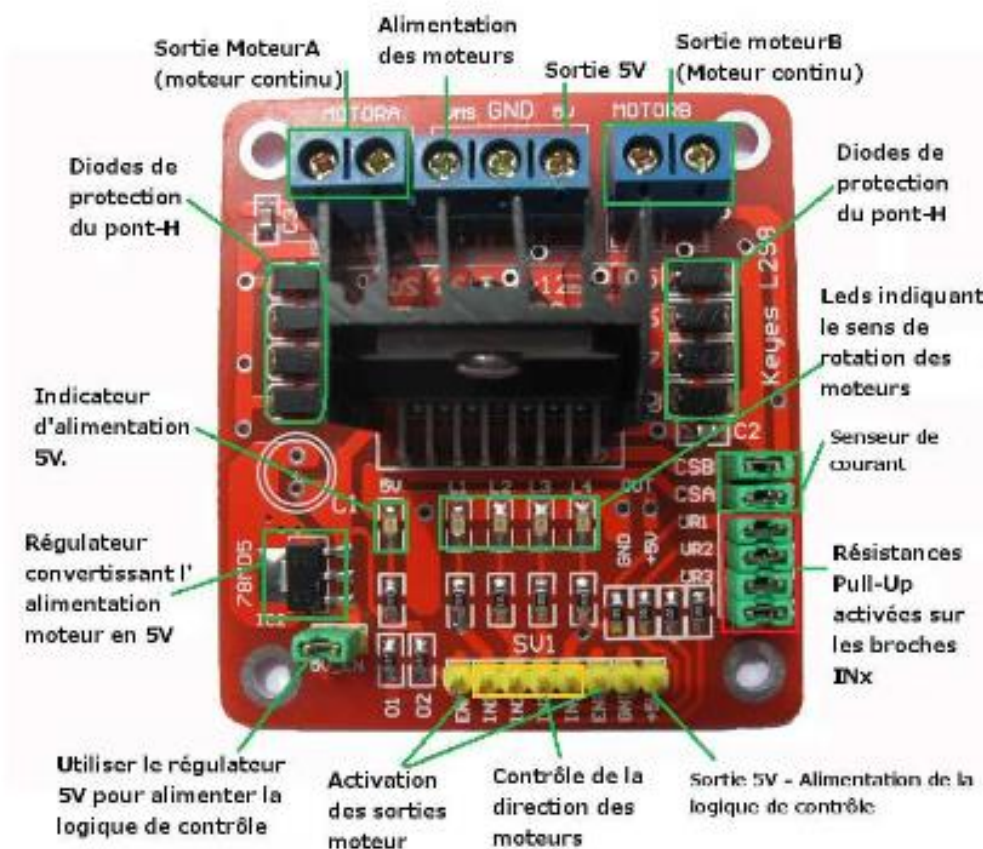


Figure I.2.3-1 /Détails techniques

C'est un module extrêmement utile pour le contrôler de robots et ensembles mécanisés. Il peut contrôler deux moteur courant continu ou un moteur pas-à-pas 4 fils 2 phases. il est conçu pour supporter des tensions plus élevées, des courants importants tout en proposant une commande logique TTL (basse tension, courant faibles, idéal donc pour un microcontrôleur).

#### I.2.3.1 Caractéristiques

- Léger, petit
- Des capacités hors-pair pour contrôle moteur
- Diodes de protections
- Un dissipateur (pour dissiper la chaleur en cas de forte charge)
- Un sélecteur pour sélectionner la source d'alimentation
- 4 Sélecteurs pour les résistances pull up
- Sortie pour 2 moteurs continus
- Indicateur LED pour sens de rotation moteur
- Indicateur LED pour alimentation 5V
- 4 trous de fixation standard

### I.3 Le moteurs cc

Un moteur à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique ; selon la source d'énergie.

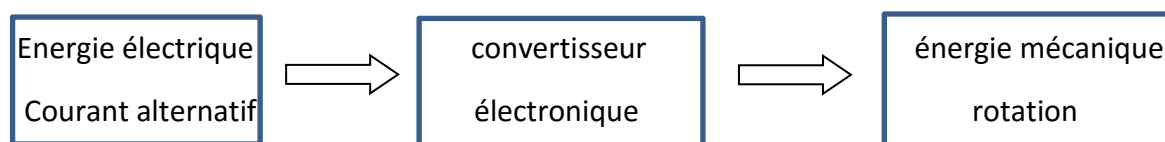


Figure I.2.3-1 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Dans notre projet nous avons utilisé des moteurs d'un essuie-glace à forte puissance figure (42) pour qu'ils puissent piloter l'assiette de la parabole.



Figure I.2.3-2moteur d'essuies- glace

Le moteur électrique possède les caractéristiques suivantes ;

|                        |       |
|------------------------|-------|
| Courant Max            | 3A    |
| Puissance utile (W)    | 30 W  |
| Tension d'alimentation | 12 DC |

Tableau 1 mcc

#### I.4 Le vérin électrique



Figure I.2.3-1 vérin électrique

Les vérins électriques utilisent le principe de la transformation d'un mouvement de rotation créée par un moteur électrique en un mouvement de translation grâce à un système mécanique. La vitesse linéaire de la tige du vérin dépend donc de la vitesse de rotation du moteur et du pas du système de la transformation de mouvement (8)

Le vérin pris en considération pour notre cas est un vérin super power jack de 18 pouces série régulière, conçus pour des paraboles de 120 cm à 180 cm, (Figure 43) Dont les caractéristiques sont illustrées dans le tableau 4

La course maximale que devra entreprendre le vérin est d'environ 31 cm, mais pour éviter tout

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| Course du vérin               | 35cm         |
| Taille suggéré de la parabole | 1,2 à 1,8 m  |
| Capacité de charge            | 2500 N       |
| Charge statique maximale      | 4500 N       |
| Vitesse à pleine charge       | 4,2 mm/s     |
| Tension d'alimentation        | 24/ 36 V DC  |
| Puissance utile               | Environ 70 W |

Table 1 caractéristique vérin

La course maximale que devra entreprendre le vérin est d'environ 31 cm, mais pour éviter tout risque de venue en butée mécanique, nous avons prévue 40 mm de course supplémentaire.

La hauteur du soleil passe de 0° à environ 80° le jour du solstice d'été et le vérin parcourt environ 12 cm de sa course et ceci en environ 6 heures. Nous concluons donc d'après les caractéristiques du vérin que les exigences en vitesse de l'installation sont vérifiées.

Comme la visse du vérin choisie est à filet trapézoïdal, le vérin est donc irréversible mécaniquement permettant le blocage du concentrateur en position voulue quand le moteur vérin n'est pas alimenté.

## I.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les différents éléments constitutifs du dispositif que nous sommes amenés à réaliser qui permet d'optimiser les performances d'un panneau PV classique et d'assurer le bon fonctionnement de celui à concentrateurs, en faisant en sorte que les rayons solaires y soient perpendiculaires.

Dans le chapitre qui suit, nous allons voir les détails et les étapes de réalisation de notre suiveur.

Introduction :

Après avoir décrit la partie matérielle de notre système, nous sommes arrivés à la partie la plus importante de notre mémoire qui est la conception et la réalisation du système de poursuite. Notre réalisation se décompose en quatre parties principales :

- Partie programmation;
- Partie électrique ;
- Partie mécanique : on va faire un rappelle car elle est déjà faite l'année président
- absorbeur

Donc, le bon fonctionnement de notre système se base essentiellement sur l'ensemble de ces parties :



Figure I.1.1-1 la vue réal de notre système

### I.1 Partie programmation :

#### I.1.1 L'organigramme

Avant de passer à la programmation, nous devons réaliser un organigramme qui explique le déroulement des différentes séquences, tant intérieures qu'extérieures (Figure (III.1)), il comportera plusieurs boucles dont la fin d'exécution succède toujours à son commencement.

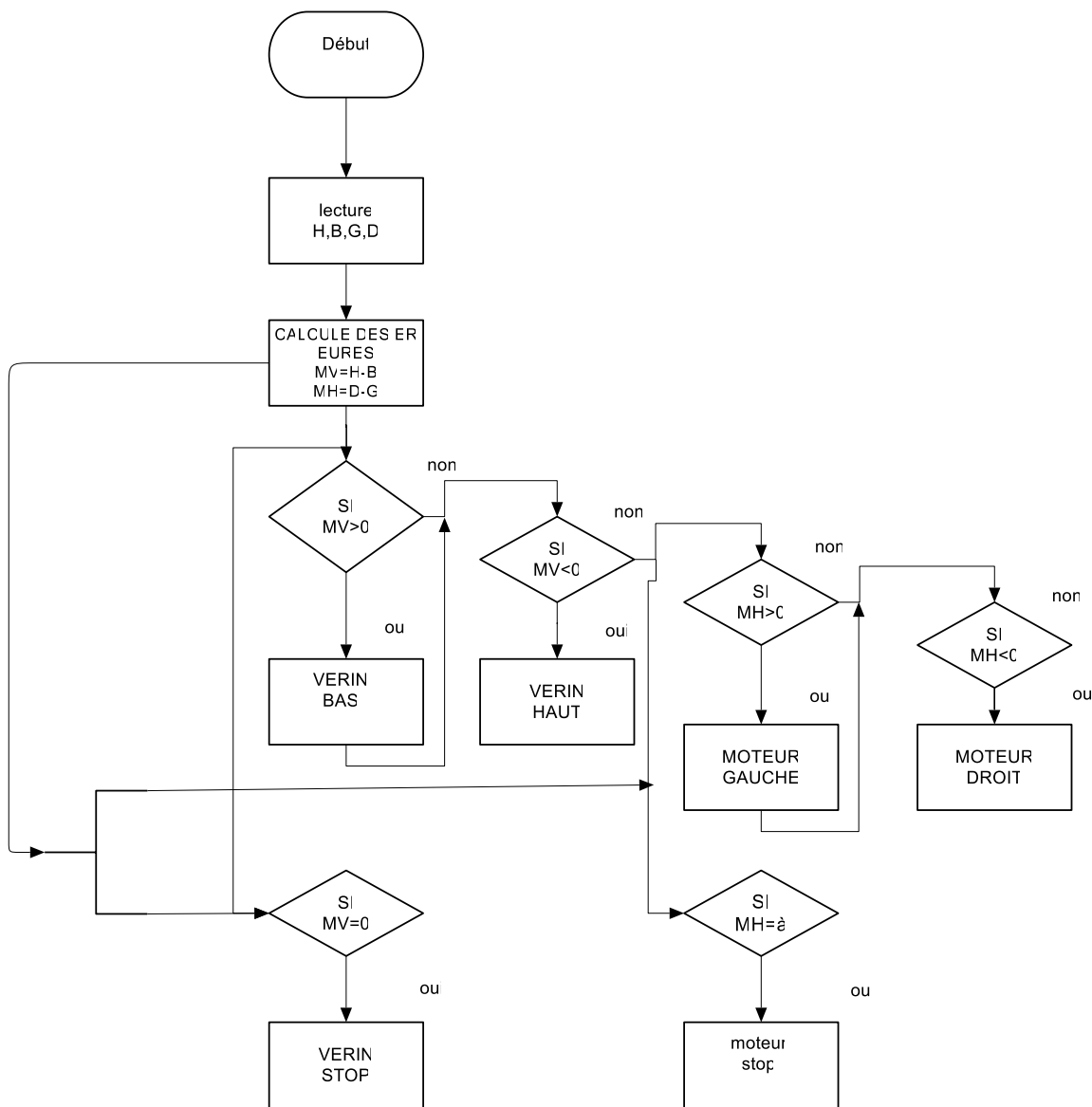


Figure I.1.1-1 Organigramme Principal

#### I.1.2 Programmation

La carte Arduino ATméga 2560 est une carte programmable, elle peut être programmée avec le logiciel Arduino représenté dans la figure 37.



Nous avons préféré de photographier l'interface du logiciel Arduino dans laquelle nous avons simulé notre programme (exemple le vérin)

```
// moteur A
#define enA 8
#define in1 6
#define in2 7

//moteur B
#define enB 11
#define in3 10
#define in4 9

// les led et les photoresistance

const char PHOTORESISTANCE_H = A0;
const char H_LED = 2;
const char PHOTORESISTANCE_B= A1;
const char B_LED = 3;

const char PHOTORESISTANCE_G = A2;
const char G_LED = 4;
const char PHOTORESISTANCE_D= A3;
const char D_LED = 5;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
```

```
void loop() {
  analogWrite(enA, 255);
  analogWrite(enB, 255);

  // put your main code here, to run repeatedly:
  int valeurSurA0 = analogRead(PHOTORESISTANCE_H);
  int valeurSurA1 = analogRead(PHOTORESISTANCE_B);

  int MV = valeurSurA0 - valeurSurA1;
  Serial.println(MV);

  if (MV < 0 ) {
    digitalWrite(in1, HIGH);
    digitalWrite(in2, LOW);

    digitalWrite(B_LED,LOW);
    digitalWrite(H_LED,HIGH);
    delay(20);
  }
  if (MV > 0 ) {
    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, HIGH);

    digitalWrite(H_LED,LOW);
    digitalWrite(B_LED,HIGH);
    delay(20);
  }
  ,

  if (MV == 0) {

    digitalWrite(in1, 0);
    digitalWrite(in2, 0); //HIGH

    digitalWrite(H_LED,HIGH);
    digitalWrite(B_LED,HIGH);
    delay(20);
  }
}
```

## I.2 Partie électrique :

On a réalisé notre montage électrique sur la plaque d'essai par étapes.

- Etape 1

On a réalisé notre montage électrique sur la plaque d'essai par étapes

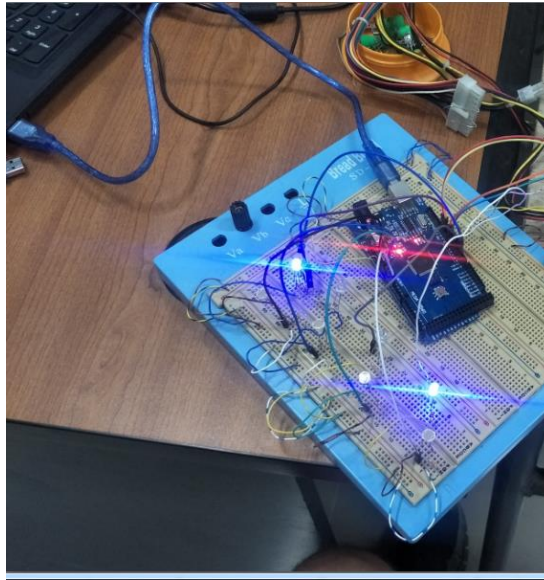


Figure I.1.2-1 / Réalisation en utilisant les LEDs

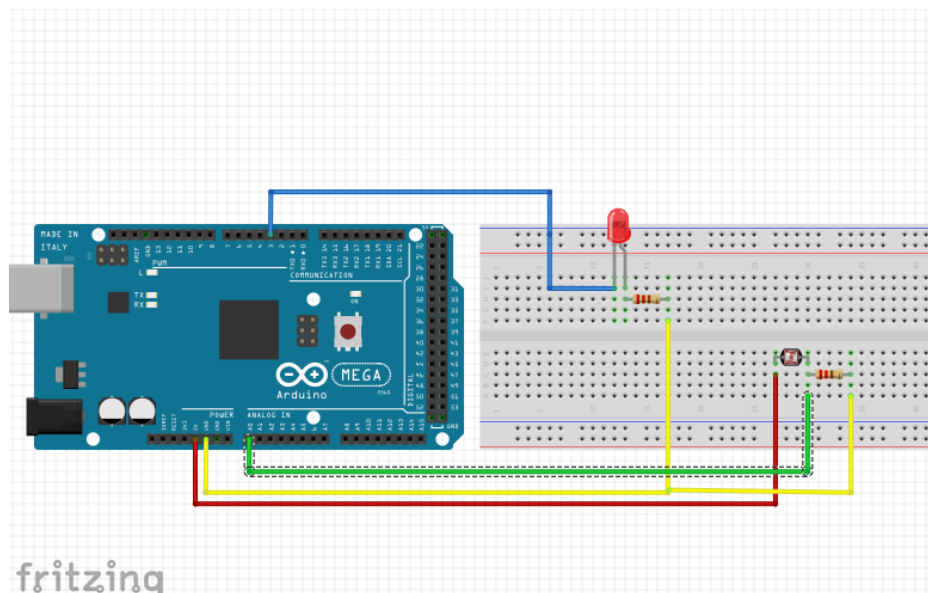


Figure I.1.2-2 schéma s'amplifier sur les capteurs et les leds

Nous avons réalisé cette essai en premier lieu en utilisant quatre leds colorées (chaque led indique représente une direction de rotation des deux moteurs) pour tester la connexion entre les capteurs et les actionneurs (les signaux reçu des capteurs vers l'arduino pour traiter et leurs effet sur les actionneurs (les moteurs))

- Etape 2

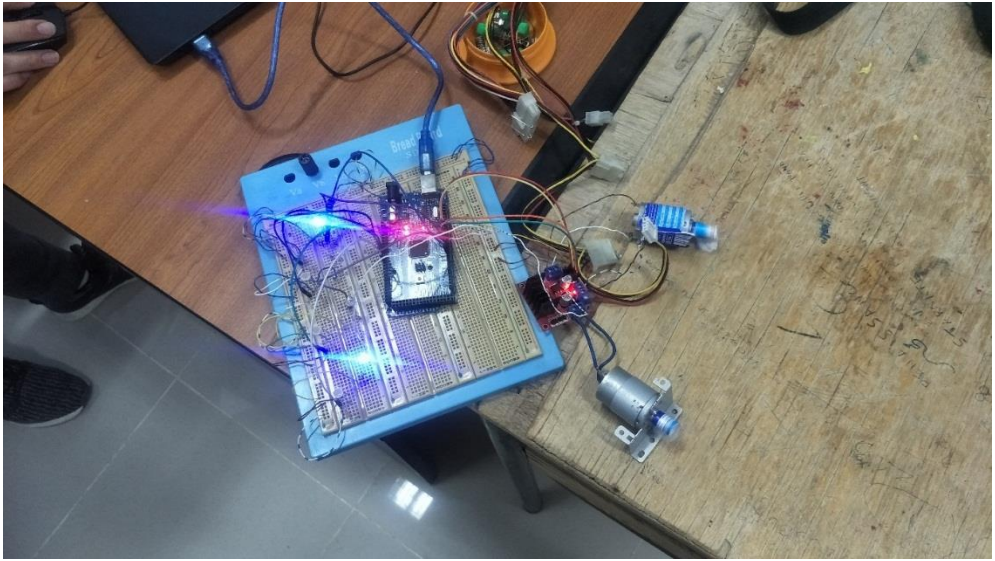


Figure I.1.2-3/Réalisation avec des petits moteurs à courant continue

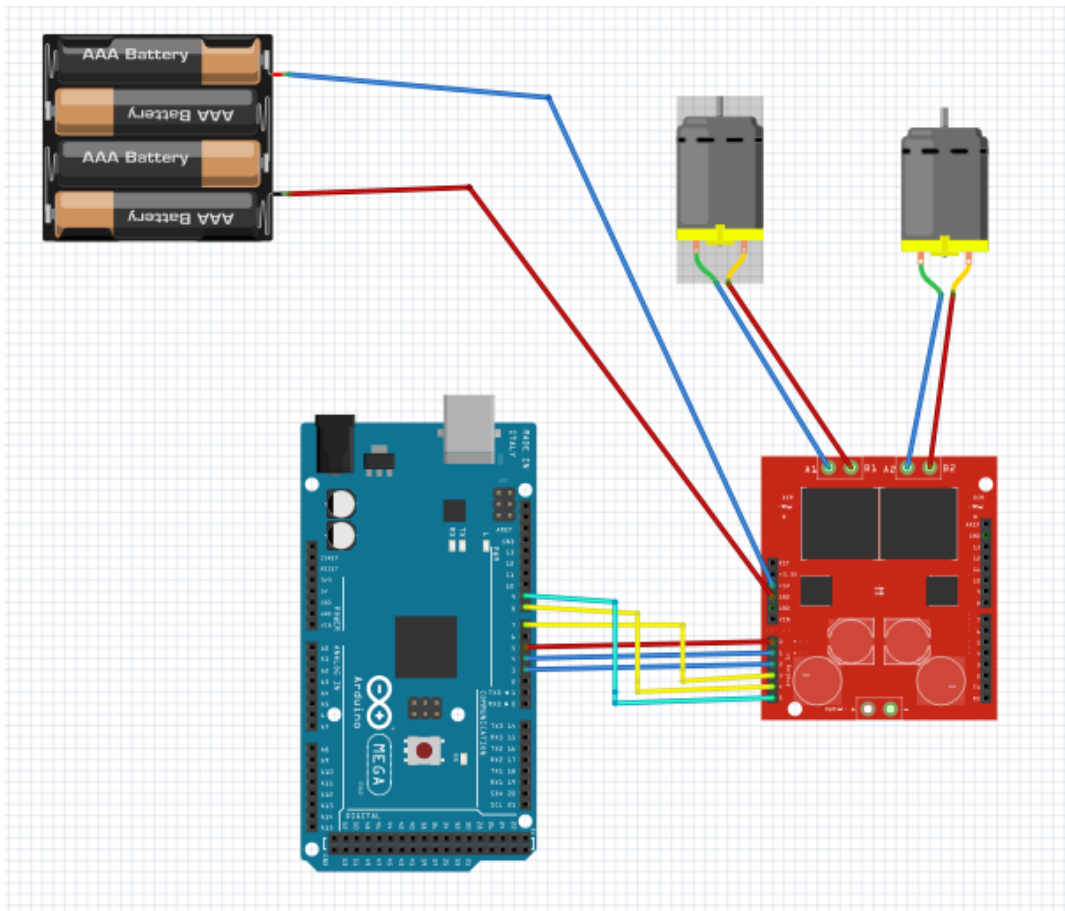


Figure I.1.2-4 Réalisation avec des petits moteurs à courant continue

Dans cette étape, nous avons réalisé cet essai en utilisant des petits moteurs pour tester les sens des rotations des moteurs.

- Etape 3  
A cause du temps en n'a pas pu réaliser le prototype réel.

### I.3 Partie mécanique

Elle est déjà faite l'année précédente, on va faire un petit rappel de sans fonctionnement

#### I.3.1 Principe de fonctionnement du mécanisme réalisé :

Après avoir terminé de la réalisation de toutes les pièces précédentes, on passe directement à leurs assemblages, afin d'aboutir à un mécanisme ayant pour but de suivre le soleil.

(Figure 50)



Figure I.3.1-1 Le mécanisme réalisé après l'assemblage de toutes les pièces

Le fonctionnement de notre mécanisme s'articule sur deux principes :

- La rotation de la parabole afin de suivre la trajectoire circulaire du soleil et cela à l'aide d'un moteur azimutale.
- Assurer l'inclinaison de la parabole à l'aide d'un vérin électrique lui permettant ainsi de suivre la trajectoire allongée du soleil.

#### I.4 Absorbeur



Figure I.3.1-1 notre prototype



Figure I.3.1-2 notre absorbeur

Le métal du récepteur devant avoir une bonne conductivité, nous avons choisi un tube en aluminium ( $185 \text{ W/m.K}$  à  $20^\circ$ ) (9), 60 cm de longueur, on a serpenté le tube dans un cylindre en aluminium de type cannette d'un diamètre de 8 cm, puis on la met dans un autre cylindre de diamètre de 10 cm de type harissa on a isolé les deux cylindres avec un isolant de type polystyrène extrudé on l'a obtenu dans un vieux frigidaire.

Le polystyrène extrudé est un isolant synthétique d'une *conductivité thermique*  $\lambda$  : De  $0,027$  à  $0,040 \text{ W/(m.K)}$

**Avantage :**

- Résistance mécanique élevée
- Matériau très léger
- Résistance à la compression

**Inconvénients :**

- Faible isolation acoustique
- Dégagement de gaz toxique en cas d'incendie

## I.5 Thermocouple :

Thermocouples de type « k » (Nikel-chrome/nickel-aluminium) de diamètre 0.05mm et pouvant mesurer des températures allant de -50 à 900°C et permettant une précision de 0.75%, sont placés dans l'installation pour relever les températures des différents composants formants l'installation fluide caloporteur (eau).

Tableaux de mesures :

Les mesures présentes concernent la journée du dimanche 7 de Juin. Ce tableau illustre les différentes températures prises pendant la période de test au niveau des différents points dans le capteur solaire parabolique.

Calcule le flux :

$$\Phi = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

$\Phi$  : Flux thermique.

m : Débit 0.01l/s

Cp : Chaleur spécifique de l'eau.1000 cal

$\Delta T$  : différent de température.

Ce tableau illustre les différentes températures prises pendant chaque minute

| Temps   | Te [°C] | température ou point focale | Ts [c°] |
|---------|---------|-----------------------------|---------|
| 12h 30m | 28      | 158                         | 32      |
| 12h 31m | 28      | 174                         | 45      |
| 12h 32m | 28      | 189                         | 48      |
| 12h 33m | 28      | 196                         | 52      |
| 12h 34m | 28      | 190                         | 60      |
| 12h 35m | 38      | 250                         | 64      |
| 12h 36m | 38      | 287                         | 70      |



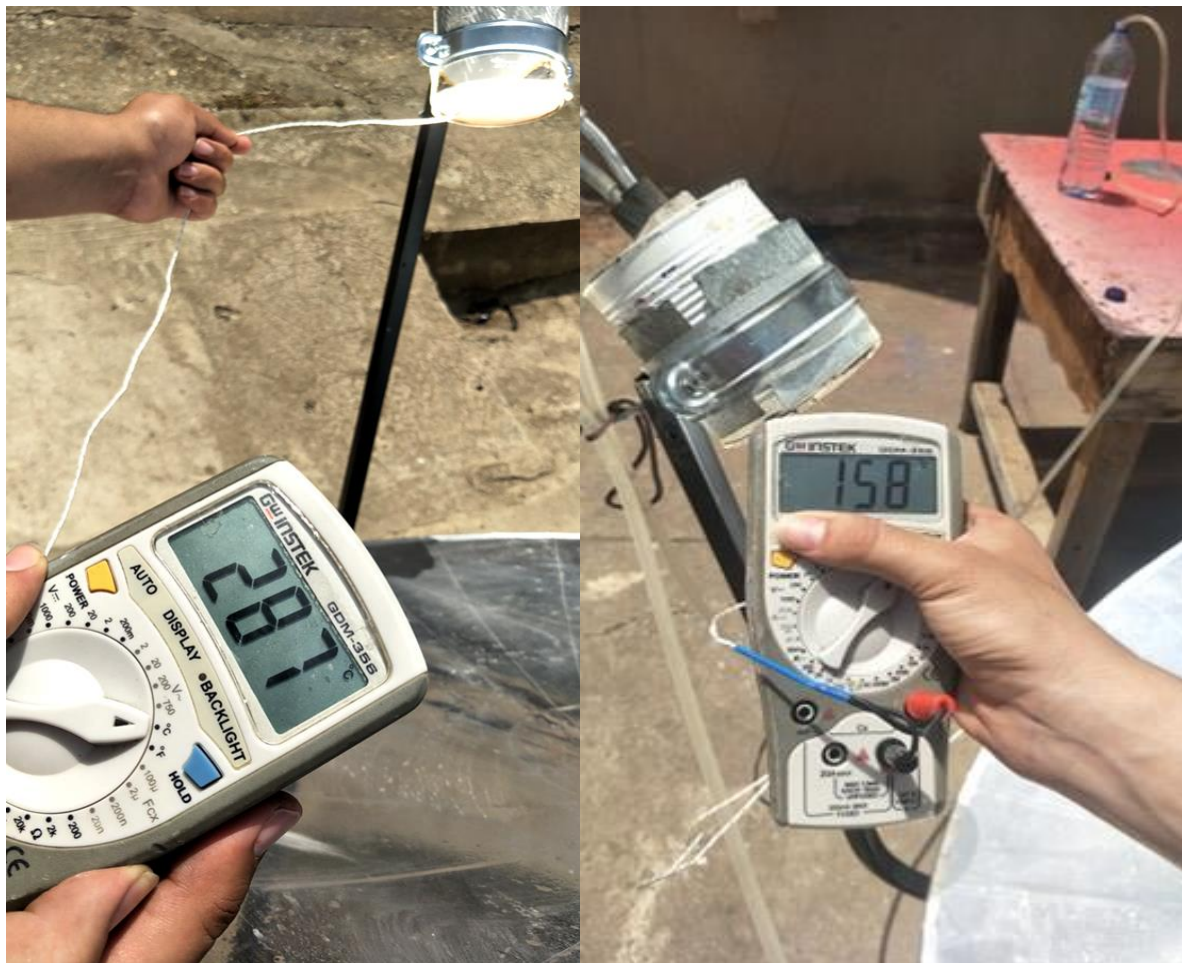


Figure I.3.1-1 LES TESTS DE MESURE



Figure I.3.1-2 les tests de mesure de tableau

Conclusion :

Dans ce chapitre on a essayé de réaliser notre système de concentrateur parabolique on a utilisé le logiciel Arduino qui est nouveaux pour nous en a ressuie a écrire un petit programme débutant sur la poursuite des photorésistances a la lumière quand on a utilisé pour faire tourner les moteur.

L'absence d'un débit mètre et du temps nous a poussé a mesuré la température chaque minute.

Notre projet de fin d'étude est finalisation de la réalisation d'un système de poursuite solaire automatique d'un concentrateur parabolique et réalisation de son absorbeur notre but réside dans la mise en œuvre d'une solution technique permettant de transformer un suiveur solaire manuel en un suiveur automatique afin de rendre le système de poursuite autonome d'une part et d'améliore le rendement d'autre part et la réalisation de son absorbeur.

Pour cela une analyse critique a été faite sur le modèle de poursuite intitulé (étude de concentrateur parabolique, promotion 2017) suivi par des modifications majeure afin d'améliorer les performances de système. Ils sont aussi proposés une poursuite aveugle grâce à un programme sur le logiciel Arduino.

On a choisi d'améliorer ce programme qui est la poursuite sensible consiste à détecter la variation de la position du soleil à l'aide des composant électronique programmable géré par un microcontrôleur ARDUINO, et un pont h qui contrôle la sens de rotation et la vitesse des moteur (le vérin et le mcc) notre suiveur peut être utilise dans toute application nécessitant la poursuite solaire notamment le photovoltaïque. .

Ce projet de fin d'études était pour nous l'occasion précieuse de faire un travail multidisciplinaire, associant l'instrumentation, l'électronique, l'automatique, le transfert thermique, la programmation.

En perspective, on souhaite d'améliorer notre suiveur on lui ajoutant des systèmes de protection contre le changement brusque du climat, et de couvrir cette surface parabolique par un miroir qui la corresponde à fin d'amélioré le rendement, et d'ajouté des options de commande comme le contrôle à distance.

- [1]. R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique.
- [2]. J.M.chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire, bordas Paris.1984.
- [3]. N. Mehdi .Bahadori, Design of solar autoclave. Solar Energy, Vol.18,pp.489-496.
- [4]. B.Jennifer, Krystal Roaers, Parabolic solar cookers, Campus Center For.
- [5]. R.Benchirifa, D.Zejli, A.Bennouna, Potentiel de l'introduction de la Technologie.
- [6]. <http://www.thermique55.com/principal/thermiquesolaire.pdf>, site internet :.
- [7]. (2005), ZEGHIB ILHEM « Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire » parabolique par UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE.
- [8]. R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique.
- [9]. Dominique, Michèle Frémy, Le monde et Astronomie, quid 2001, France Loisir,.
- [10]. [En ligne] [https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&biw=1366&bih=635&tbm=isch&sa=1&ei=T2vrXInlCbmCjLsP\\_-OE6AU&q=la+latitude&oq=La+laltitude&gs\\_l=img.1.0.0i10i24.848357.852731..855612..0.0..0.158.2061.0j16.....0....1..gws-wiz-img.....0i67j0j0i30j0i10j0i8i](https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&biw=1366&bih=635&tbm=isch&sa=1&ei=T2vrXInlCbmCjLsP_-OE6AU&q=la+latitude&oq=La+laltitude&gs_l=img.1.0.0i10i24.848357.852731..855612..0.0..0.158.2061.0j16.....0....1..gws-wiz-img.....0i67j0j0i30j0i10j0i8i).
- [11]. R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique.
- [12]. F.G.Acién Fernandez, F.Garcia Camacho, Modeling of Biomass productivity in.
- [13]. [En ligne] <http://db05.perso.infonie.fr/m-mai.htm>.
- [14]. concentrateur, Etude et réalisation d'un. webreview. [En ligne] <http://www.webreview.dz/spip.php?article1843>.
- [15]. K. Ogilvie, „L'abc de technologie de l'énergie renouvelable, pollution probe“.,.
- [16]. : B.Stine, Michael Geyer, „Power from the sun“, Lyle centre for regenerative studies.
- [17]. U.H.Kurzweg, J.P.Benson , "Iso-Intensity absorber Configurations For parabolic.
- [18]. Dan dye, Byard Wood, "Non-imaging devices for uniform irradiation on Planar.
- [19]. M.Srinivasan, L.V.Kulkarni, "A simple technique of fabrication of parabolic.

- [20]. B.Stine, Michael Geyer, "Power from the sun", Lyle centre for regenerative studies.
- [21]. [En ligne] <http://www.les-mathematiques.net/phorum/read.php?8,1262505,1262505>.
- [22]. M. Kayouche, "système de poursuite du soleil, bilan énergétique et optimisation de.
- [23]. D. Kedwards, L. Marlot, "Capteurs Solaires", Edition S C M, Paris 1979.
- [24]. J.E .Braun et J.C .Mitchell, "Solar geometry for fixed and tracking surface". Solar.
- [25]. Paul De Neyer, "Energie solaire thermique", Guide des Energies Renouvelables, mai.
- [26]. : D.Kedwards, L.Marlot, Capteurs Solaires, Edition S C M, Paris 1979.
- [27]. Optoelectronic detectors, Dr. Heiner Ryssel, Indian Institute of Technology, Madras 9th INDO –German Winter Academy 2010.
- [28]. arduino. [En ligne] [http://www.mon-club-elec.fr/pmwiki\\_reference\\_arduino/pmwiki.php?n=Main.MaterielMega2560](http://www.mon-club-elec.fr/pmwiki_reference_arduino/pmwiki.php?n=Main.MaterielMega2560).
- [29]. arduino, cable. [En ligne] 01 07 2019.  
<https://www.indiamart.com/proddetail/arduino-uno-cable-13068239133.html>.
- [30]. [En ligne]  
[www.ns7.freeherberg.com/~const59/cpo/cours/automatusme/verelec.pdf](http://www.ns7.freeherberg.com/~const59/cpo/cours/automatusme/verelec.pdf).
- [31]. [En ligne] <http://www.aciersspeciaux.fr/conductivite%20thermique-de-l-aluminium/>.
- [32]. polysterene. [En ligne] <https://conseils-thermiques.org/contenu/polystyrene-extrude.php>.
- [33]. Dan dye, Byard Wood, "Non-imaging devices for uniform irradiation on Planar.
- [34]. B.Stine, Michael Geyer, "Power from the sun", Lyle centre for regenerative studies.

