



**LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES**  
**Génie Electrique**

**RAPPORT DE FIN D'ETUDES**

**Intitulé :**

**Implémentation d'un algorithme de poursuite  
solaire des concentrateurs Cylindro-Paraboliques**

**Réalisé Par :**

**BELLAT Fadoua**  
**LMANSOURI Souhayl**

**Encadré par :**

**Pr. A. MECHAQRANE(FST FES)**

**Soutenu le 08 Juin 2017 devant le jury**

**Pr M. RAZI (FST FES)**

**Pr H. GHENNIQUI (FST FES)**

**Pr A. MECHAQRANE (FST FES)**

# *Avant-propos*

Dans le cadre de l'obtention de notre Licence en Génie Électrique à la Faculté des Sciences et Techniques, on a effectué notre projet de fin d'études au Laboratoire d'Energie Renouvelable et Systèmes Intelligents à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès.

Ce stage a duré deux mois auprès de l'équipe « Systèmes à Energie Renouvelable: Intégration et Gestion Intelligente (SER) » et on avait comme sujet : « Implémentation d'un algorithme de poursuite solaire des concentrateurs cylindro-parabolique ».

Ce stage est une étape importante dans la vie d'un étudiant au point de vue scolaire ainsi au point de vue professionnel, ça nous a permis d'améliorer nos compétences dans la programmation Matlab, apprendre comment programmer sur Arduino et approfondir nos connaissances en ce qui concerne la géométrie et la technologie de concentration solaire ainsi que de mettre en pratique les enseignements reçus et d'affirmer nos savoir-faire et nos compétences.

Et le présent rapport, représente le fruit de notre travail durant ces deux.

## Remerciements

- *En préambule à ce travail, on tient à adresser nos sincères remerciements à toute personne qui a aidé à acheminer à bon port le présent projet de fin d'études.*
- *Nos premiers remerciements à ALLAH le tout puissant, qui a guidé nos pas depuis l'aube de notre vie.*
- *On remercie notre professeur **Mr A. MECHAQRANE** de la Faculté des Sciences et Techniques, qui a bien voulu assurer l'encadrement de ce projet, et qui nous a offert les meilleures conditions de la réalisation pratique du projet.*
- *On tient à remercier le professeur **Mr. M. JORIO** responsable de la filière Génie électrique, qui nous a dirigé durant notre formation de spécialité.*
- *Merci à mademoiselle **BOUNOUA Zineb**, doctorante au laboratoire d'Energie Renouvelables et Système Intelligents qui nous a aidé durant toute la période du projet.*
- *On remercie aussi les membres de Jury, **Mr. M. RAZI** et **Mr H. GHENIOUI** professeurs à la FST-Fès d'avoir accepté de juger ce travail.*
- *On exprime notre profonde gratitude également à tous nos professeurs de la FST Fès, pour leurs efforts fournis et la qualité d'enseignements.*

# DEDICACE

*Nous dédions ce modeste travail à :*

- *À nos très chères mères qu'elles trouveront ici l'hommage de notre gratitude qui ,si grande qu'elle puisse être, ne sera à la hauteur de leurs sacrifices et leurs prières pour nous ;*
- *À nos chers pères ,nos premiers encadrant , depuis notre naissance ;*
- *À nos sœurs ,Safae et Wiam, à qui nous souhaitons un très bon parcours et beaucoup de réussite ;*
- *À tous nos amis (Salim,Nouhaila) et à tous ceux qui nous sont très chers;*
- *À tous nos professeurs et enseignants ;*

## RESUME

Le Maroc importe la plupart de ses besoins en énergie fossile (environ 96%) ce qui engendre une facture énergétique très lourde d'où le lancement d'un plan d'envergure d'utilisation des énergies nouvelles pour réduire cette facture et limiter son indépendance vis à vis des marchés pétroliers qui handicapent l'investissement local et l'amélioration des conditions de vie des citoyens.

Parmi les sources d'énergie à développer, une priorité est donnée à l'énergie solaire. Ainsi, il a été lancé un réel plan solaire qui constitue une réelle opportunité de diversification des sources d'approvisionnement en énergies renouvelables. En effet, notre pays dispose d'un gisement solaire considérable avec une irradiation extrêmement favorable qui dépasse les 2300 kWh/m<sup>2</sup>/an. Cette irradiation au Maroc est 30% supérieure aux meilleurs sites européens d'où un levier de développement et d'industrialisation extrêmement intéressant.

Ce plan vise l'installation de stations solaires de production de 2000 MW d'électricité à l'horizon 2020. Parmi les technologies adoptées, il y a les centrales à concentration (CSP pour Concentrated Solar Power): à Tour (NOOR III) ou à concentrateurs cylindro-paraboliques (NOOR I et NOOR II). Les systèmes à concentration solaire nécessitent tous des systèmes de poursuite qui permettent aux collecteurs de suivre la trajectoire apparente du soleil. Le laboratoire d'Energies Renouvelables et Systèmes Intelligents de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès s'intéresse, depuis sa création, à la maîtrise de la technologie des suiveurs solaires. De ce fait, il nous a été fixé comme objectif de ce travail, l'implémentation d'un algorithme de poursuite solaire des systèmes Cylindro-Paraboliques. Notre travail sur le sujet a abouti à la réalisation de la partie électronique du suiveur utilisant une carte Arduino Uno et un driver ULN2003 pour commander un moteur pas à pas.

**Mots clés :** Collecteur cylindro-parabolique, énergie solaire, Microcontrôleur Arduino Uno, moteur pas à pas.

## ABSTRACT

Morocco imports most of its fossil energy needs (approximately 96%). This leads to a very heavy energy bill. For this reason, Morocco has launched a major plan to develop the use of renewable energies to reduce its energy bill and limit its dependence from the oil markets that handicap local investment and improving the living conditions of citizens. Among the energy sources to develop, priority is given to solar energy. So, Morocco has launched a real Solar Plan which provides a real opportunity to diversify its energy mix. Indeed, our country has a huge solar power with an extremely favorable irradiation exceeding  $2300 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{year}$ . This irradiation is 30% higher than the best European sites.

This plan aims at the installation of solar stations producing 2,000 MW of electricity by 2020. Among the adopted technologies, there are Concentrating Solar Power (CSP) plants (solar parabolic trough (NOOR I and NOOR II or solar tower (NOOR III))). Systems with solar concentration require all tracking systems that allow collectors to follow the apparent trajectory of the sun. The laboratory of Renewable Energies and Smart Systems of the Faculty of Science and Techniques of Fez is interested, since its creation, to solar tracking technology. Therefore, the goal of this work is to implement of a solar tracking algorithm for solar parabolic trough systems. Our work has led to the realization of the electronic part of the solar tracker using an Arduino Uno board and an ULN2003 driver to control the stepper motor.

**Key words:** Cylindrical parabolic collector, Solar energy, Arduino Uno, ULN2003 driver, Step motor.

# Table des matières

Remerciements.....	3
Dédicaces.....	4
Résumé.....	5
Abstract.....	6
Table des matières .....	7
Table des figures.....	10
Liste des tableaux.....	11
Nomenclature.....	12
Laboratoire d'accueil .....	13
Introduction générale : .....	14
<b>Chapitre I : Collecteur Cylindro-Parabolique</b> .....	16
I. Introduction : .....	17
II. Système de poursuite solaire: .....	17
1. Introduction :.....	17
2. Les types des suiveurs solaires :.....	17
2.1. Suiveur solaire double axe : .....	17
2.2. Suiveur solaire mono axe :.....	17
III. Collecteur Cylindro-Parabolique: .....	17
1. Description :.....	17
2. Géométrie des CCP :.....	21
2.1.Concentration du rayonnement par un CCP.....	21
2.2.Paramètres pour la description géométrique d'un CCP.....	22
3. Principe de fonctionnement :.....	22
IV. Méthodes de poursuite :.....	23
1. A base des LDR.....	23
2.A base de la géométrie solaire.....	23
3.Conclusion : .....	23
<b>Chapitre II : Géométrie solaire-Trajectoire solaire</b> .....	24
I. Introduction : .....	25
II. Le mouvement de la terre autour du soleil :.....	25
1. Le Soleil .....	25

2. Le mouvement de la terre .....	25
III. La sphère céleste .....	26
1. Grandeurs géographiques et astronomiques .....	27
1.1. Repérage d'un site à la surface terrestre .....	27
1.1.1 Les coordonnées géographiques .....	27
1.2. Détermination de la direction du soleil .....	27
1.2.1. Les coordonnées équatoriales .....	27
1.2.2. Les coordonnées horizontales .....	29
2. Angle d'incidence et angle de suivi.....	30
3. Mouvement apparent du soleil .....	30
IV. Les temps solaires .....	31
1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V) .....	32
2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M) .....	32
3. Équation du temps (Et) .....	32
4. Temps légal TL .....	33
5. Temps universel TU .....	33
6. Lever et coucher du soleil .....	33
VI. Programme.....	33
1.Comparaison .....	34
2. Conclusion .....	37
<b>Chapitre III : Tests et réalisation.....</b>	<b>38</b>
I. Introduction : .....	39
II. Description du système de poursuite : .....	39
III. Description des composants électroniques : .....	40
1. La carte Arduin Uno:.....	40
1.1. Spécifications techniques :.....	40
1.2. Alimentation : .....	40
1.3. Programmation :.....	41
1.4. Raisons du choix Uno : .....	41
2. Moteur pas à pas : .....	41
2.1. Principe de fonctionnement : .....	41
2.2. Fonction globale : .....	42



2.3. Raison du choix d'un moteur pas à pas: .....	42
2.4. Commande d'un moteur pas à pas :.....	42
3. Circuit ULN2003 : .....	43
4. Afficheur LCD.....	44
IV. Réalisation du système : .....	45
CONCLUSION GENERALE.....	46
BIBLIOGRAPHIE & WEBOGRAPHIE.....	47

## Table des figures

### Chapitre I :

Figure I- 1 : Suivi mono axe des CCP.....	18
Figure I- 2 : Angles de suivi des CCP avec alignement nord-sud.....	19
Figure I- 3 : Angles de suivi des CCP avec alignement est-ouest.....	19
Figure I- 4 : Irradiation solaire des CCP orientés nord-sud et est-ouest.....	21
Figure I- 5 : Chemin des rayons dans un miroir cylindro-parabolique.....	22
Figure I- 6 : Paramètres géométriques d'un CCP.....	22

### Chapitre II :

Figure II- 1 : Le mouvement de la terre autour du soleil .....	26
Figure II- 2 : La sphère céleste .....	26
Figure II- 3 : Les coordonnées géographiques .....	27
Figure II- 4: Coordonnées équatoriales .....	28
Figure II- 5 : Coordonnées horaires.....	29
Figure II- 6 : Coordonnées horizontales .....	30
Figure II- 7 : Angle de suivi et angle d'incidence .....	30
Figure II- 8 : Courses particulières du Soleil .....	31
Figure II- 9 : Variation de l'équation du temps au cours de l'année .....	33
Figure II-10 : Equinoxe d'automne.....	35
Figure II-11 : Solstice d'été .....	35
Figure II-12 : Solstice d'hiver .....	36
Figure II-13 : Equinoxe de printemps.....	36

### Chapitre III :

Figure III- 1 : Câblage du système .....	39
Figure III- 2 : La carte Arduino Uno .....	40
Figure III- 3 : Interface logiciel Arduino .....	41
Figure III- 4 : Moteur pas à pas unipolaire.....	42
Figure III-5 : Drivers ULN 2003 .....	43
Figure III-6 :Affichage de la date et l'heure.....	44
Figure III-7 : Affichage de la longitude et la latitude du lieu géographique.....	44
Figure III-8 : Affichage des angles de suivi Nord-Sud et Est-Ouest.....	44
Figure III-9 : Système global.....	45

## Liste des tableaux

Chapitre I :

Table I- 1 : avantages et inconvénients des alignements nord-sud et est-ouest.....20

Chapitre II :

Table II- 1 : Caractéristiques principales du soleil.....25

Table II.2 : numéro jour du premier de chaque mois de l'année.....28

## Nomenclature

$\delta$  : Déclinaison solaire [°]

$\varphi$  : Latitude du lieu [°]

$\omega$  : Angle horaire [°]

$a$  : Azimut solaire [°]

ad: Ascension droite [°]

DE : Décalage horaire [h]

Et : Équation du temps [h]

$h$  : Hauteur du soleil [°]

$i$  : Angle d'incidence [°]

$j$  : Numéro du jour de l'année

$L$  : Longitude du lieu [°]

$s$  : Angle de suivi

TL : Temps légal [h]

TSM : Temps solaire moyen [h]

TSV : Temps solaire vrai [h]

TU : Temps universel [h]

## Laboratoire d'accueil

Le laboratoire (L.E.R.S.I) est constitué de 34 personnes de trois équipes comme le montre l'organigramme suivant :

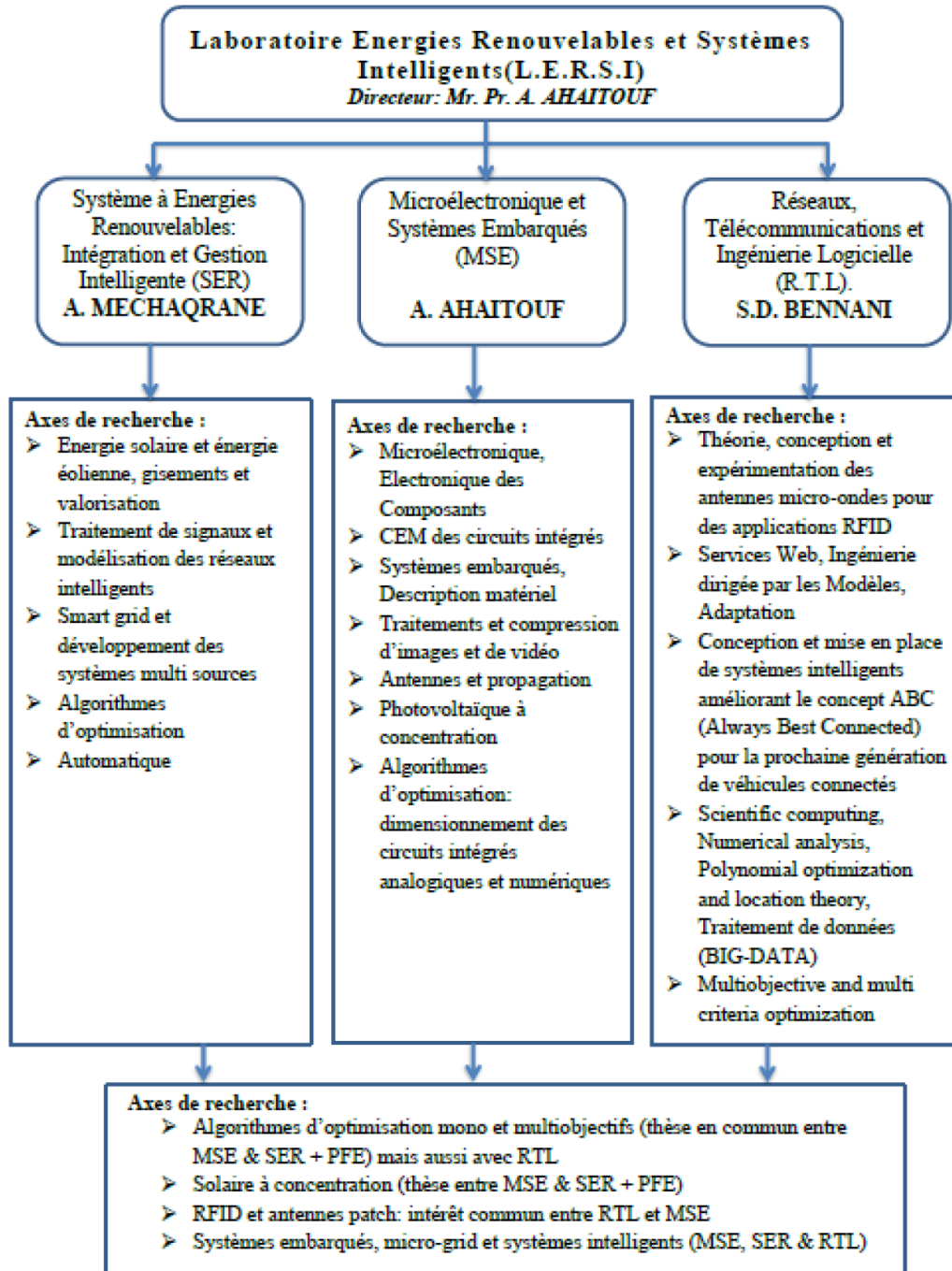


Figure 1 : Organigramme du Laboratoire Energies Renouvelables et Systèmes Intelligents(L.E.R.S.I).

Le présent stage a été effectué au sein de l'équipe Système à Energies Renouvelables dirigée par le Pr. A. MECHAQRANE.

## Introduction générale :

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain [1].

Parmi les sources des énergies renouvelables, on trouve l'énergie solaire où le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnements électromagnétiques véhiculent de l'énergie. Le niveau d'irradiance (le flux énergétique) mesuré à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire [1].

Dans le monde, la conjonction de l'instabilité des marchés des énergies fossiles et l'impératif de protection de l'environnement et de réduction des émissions de gaz à effet de serre imposent une révision des stratégies énergétiques. Les énergies renouvelables disposent d'atouts essentiels pour prendre la première place dans les bouquets énergétiques des pays [2].

Au Maroc l'accélération du développement économique et social a engendré une progression significative de la demande en Energie. Pour répondre à ses besoins énergétiques croissants, le gouvernement a lancé le projet marocain pour l'énergie solaire, avec une première réalisation : la centrale NOOR I, inaugurée en février 2016.

Noor I est constituée d'un champ de 480 hectares de miroirs courbes (cylindro-paraboliques) avec une capacité de 160 MW. La centrale est dotée d'une capacité de stockage de 3 heures de production, grâce à des sels fondus.

Noor II utilisera la technologie thermo-solaire avec capteurs cylindro-paraboliques, sur une superficie de 680 hectares. Sa puissance serait de 200 MW et sa capacité de stockage de 8 heures.

Noor III utilisera la technologie thermo-solaire avec tour, avec une puissance de 150 MW et une capacité de stockage de 8 heures

Noor IV, sera photovoltaïque avec une capacité d'environ 70 MW.

Ces quatre unités feront de Noor Ouarzazate le plus grand site de production solaire multi technologique au monde avec une capacité de 580 MW.

L'objectif fixé par le plan solaire marocain est de 2 000 MW à l'horizon 2020, soit 14 % des besoins en énergie électrique du Royaume, et la part des énergies renouvelables dans la consommation électrique globale atteindra 42 % [3].

Ainsi, l'université marocaine, comme moteur de développement et entité du transfert du savoir, compte tirer profit de ces programmes, en s'associant et en s'impliquant dans des recherches nécessaires à la mise à niveau de la structure et au développement du secteur des énergies renouvelables.

La puissance électrique produite par un capteur solaire dépend de l'intensité du flux lumineux reçu selon la position du soleil qui varie le long de la journée et de l'année. Afin de collecter le maximum d'énergie, on utilise des dispositifs dits systèmes de poursuite solaire ou

suiveurs solaires. Ces dispositifs permettent de constamment orienter le capteur perpendiculairement aux rayons solaires.

Actuellement, il existe deux catégories de suiveurs: les systèmes à un seul axe et les systèmes à deux axes. Selon l'application, un système ou un autre peut être le mieux adapté. Par exemple, pour un système CPV (photovoltaïque à concentration), un suiveur à deux axes est nécessaire alors que pour les systèmes à concentrateurs cylindro-paraboliques, un suiveur à un seul axe est suffisant.

C'est dans ce cadre général que s'inscrit notre projet de fin d'études, sous le thème :«**Implémentation d'un algorithme de poursuite solaire des concentrateurs cylindro-paraboliques**».

Le présent rapport est organisé selon trois chapitres :

- Le premier portera un aperçu sur les concentrateurs solaires à collecteurs cylindro-paraboliques
- Le second présentera la géométrie solaire, la trajectoire apparente du Soleil, les techniques de poursuite solaire adoptées dans notre étude et la méthodologie suivie pour la conception d'un système de tracking solaire.
- Dans le dernier chapitre, on présentera la description des composants électroniques et l'implémentation de l'algorithme de poursuite solaire.

On termine avec une conclusion regroupant les différents aspects étudiés.

## **Chapitre I: Collecteur Cylindro-Parabolique.**

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu sur les Collecteurs Cylindro-Paraboliques (CCP) et les méthodes permettent à un CCP de suivre la trajectoire apparente du soleil.



## I. Introduction :

Le soleil est une source d'énergie 100% propre et disponible de façon équitable en tout point de la planète. La connaissance de la position du soleil dans le ciel, à tout instant et en tout lieu, est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée.

## II. Système de poursuite solaire:

### 1. Introduction :

Un **traqueur solaire** ou **suiveur de Soleil** est une structure importante qui permet d'orienter les panneaux solaires en fonction de la position du Soleil, afin d'en augmenter la productivité [4].

### 2. Les types de suiveurs solaires:

Les deux types de suiveurs solaires qui existent sont soit mono-axe soit double axe.

#### 2.1 Suiveur solaire double axe :

Ce suiveur solaire possède deux axes ce qui lui permet de suivre les mouvements en azimut et en inclinaison au cours de la journée. Ainsi, le capteur reste constamment orienté vers le soleil. Ce types de suiveur est très imposant et fournit de meilleures performances par rapport au suiveur mono-axe [5].

Le suiveur à deux axes nécessite l'intervention de deux moteurs [6].

#### 2.2 Suiveur solaire mono axe :

Comme son nom l'indique, ce suiveur solaire tourne autour d'un axe simple. Le trajet de suivi par cet axe est souvent en azimut, c'est-à-dire d'Est en Ouest au fil de la journée. L'angle d'inclinaison du panneau est fixe, il est placé selon l'angle le plus propice à recevoir le maximum de rayons du soleil durant toute l'année. Cet angle dépend de la latitude du lieu où est installé le capteur. Ainsi, l'angle d'inclinaison du capteur reste constant mais son azimut varie au cours de la journée [5].

Le système de poursuite mono axe est la solution la plus simple et la plus utilisée [7].

## III. Collecteur cylindro-parabolique :

### 1. Description :

Il est constitué d'un long miroir (généralement recouvert d'un plaquage en argent ou en aluminium poli), rectangulaire, en forme de cylindre parabolique et complété par un tube à double enveloppe sous vide qui court sur toute sa longueur le long de la droite focale. Les rayons solaires sont reflétés par le miroir pour converger sur le tube [4].

Comme tout collecteur à concentration, les cylindro-paraboliques doivent suivre le soleil pour pouvoir concentrer le rayonnement solaire direct. En tant que collecteurs de concentration de lignes, les cylindro-paraboliques ont un système de suivi mono axe.

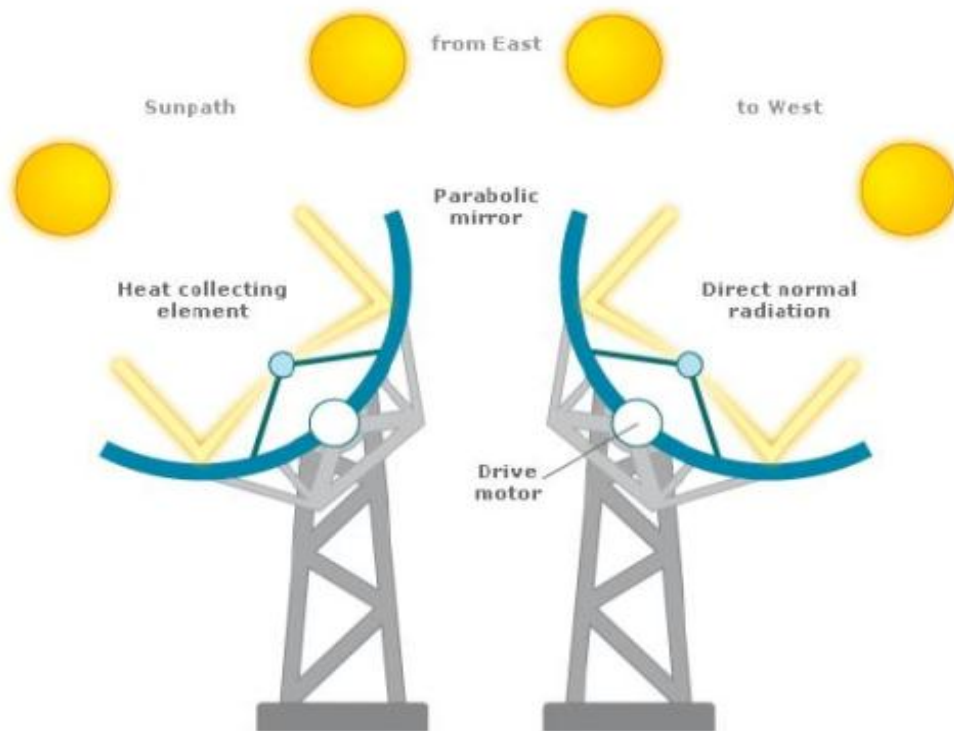


Figure I- 1: Suivi mono axe des cylindro-paraboliques [8].

Théoriquement, les cylindro-paraboliques dans le champ solaire peuvent avoir une orientation horizontale. Le suivi du soleil est toujours possible. Cependant, il existe une orientation privilégiée, qui est l'alignement nord-sud avec le suivi de l'Est à l'Ouest. L'alignement Est-Ouest avec le suivi nord-sud est aussi possible mais n'a été appliqué que pour des essais expérimentaux[8].

- **L'alignement nord-sud**

L'axe primaire nord-sud pivote dans le plan perpendiculaire correspondant, de façon à suivre un plan de la course elliptique du Soleil au cours de la journée [4].

Cette orientation nord-sud peut être décrite par l'angle zénithal, qui est l'angle entre le plan optique du collecteur et la ligne au zénith, et l'angle azimutal, qui indique l'orientation de l'ouverture des miroirs par rapport à l'horizon, où le sud = 0 ° et l'ouest = 90 °. L'angle azimut  $A$  du collecteur peut avoir seulement deux valeurs:  $A = -90^\circ$  si  $A_s < 0^\circ$  et  $A = 90^\circ$  si  $A_s > 0^\circ$ , où  $A_s$  est l'angle d'azimut solaire.

Cela signifie que l'ouverture des miroirs est orientée vers l'est au matin et vers l'ouest l'après-midi. L'angle de suivi(s) est calculé comme suit[8]:

$$\tan(s) = \tan(Oz) |\cos(A - A_s)| \quad (I.1)$$

où  $Oz$  est l'angle zénithal solaire.

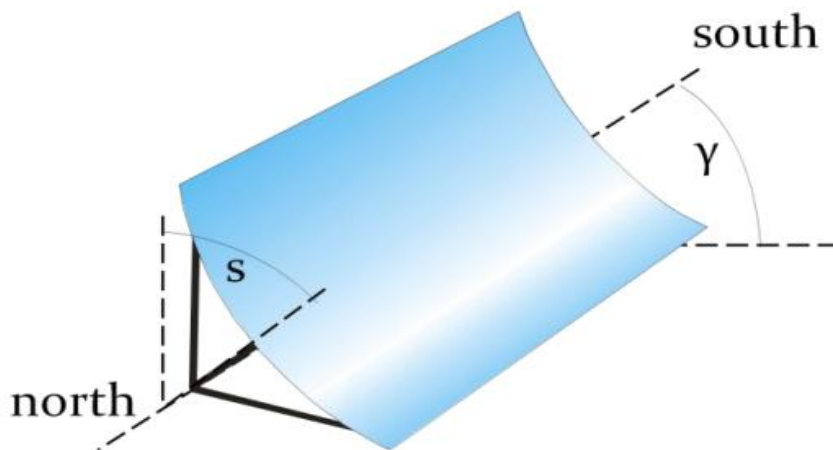


Figure I- 2 :Angles de suivi du système cylindro-parabolique avec alignement nord-sud [8].

- **Alignement est-ouest**

Dans ce cas l'efficacité du collecteur diminue en proportion du décalage angulaire conjugué. Ce type de configuration ne produit son rendement optimal qu'aux dates d'équinoxe de printemps et d'automne [4].

Pour cet alignement, l'angle de suivi (s) est déterminé comme suit[8]:

$$\tan(s) = \tan(Oz)|\cos(As)| \quad (I.2)$$

Pour l'angle azimut A du collecteur, on a:  $A=0^\circ$  si  $|As|<90^\circ$  et  $A=180^\circ$  si  $|As|>90^\circ$ , ce qui signifie que l'ouverture du miroir est orientée vers le sud si le soleil est au sud de la ligne est-ouest et au nord si le Soleil est au nord de la ligne est-ouest.

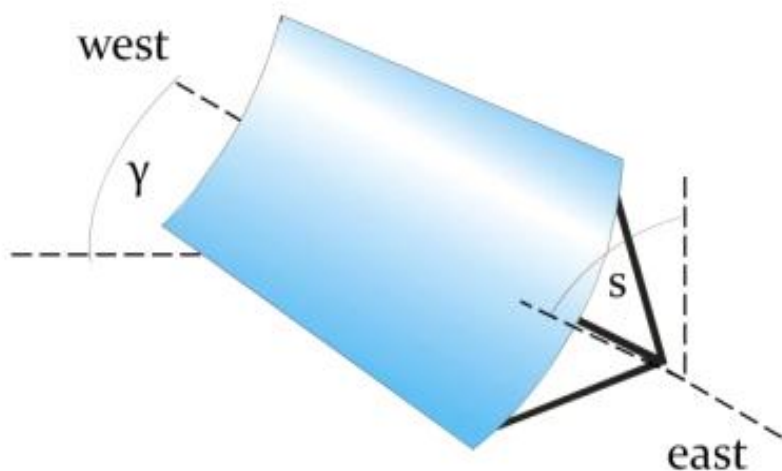


Figure I- 3 : Angles de suivi du système cylindro-parabolique avec alignement est ouest [8].

- **Avantages et inconvénients :**

	Alignement nord-sud	Alignement est-ouest
Avantages & inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La performance du collectionneur au cours de la journée est assez uniforme. Généralement, la perte de cosinus est plus élevée à midi que le matin et le soir, et tend à se compenser.</li> <li>- En raison de la différence d'angle d'incidence entre l'été et l'hiver, la différence du rendement énergétique saisonnière est plus importante que celle de l'alignement est-ouest.</li> <li>- Le rendement énergétique annuel est supérieur à celui de l'alignement est-ouest.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La performance du collectionneur au cours de la journée est assez inégale. En raison des grands angles d'incidence, la performance du collecteur est considérablement réduite dans les heures qui suivent le lever du soleil et les heures avant le coucher du soleil. A midi, l'ouverture complète est toujours tournée vers le Soleil, c'est-à-dire que l'angle d'incidence est nul.</li> <li>- Contrairement à l'alignement nord-sud, les angles d'incidence sur le collecteur ne sont pas plus importants en hiver qu'en été.</li> <li>- De petits mouvements de suivi sont nécessaires pendant la journée.</li> </ul>

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des alignements nord-sud et est-ouest [8].

- **Comparaison :**

Toutes ces différences sont basées sur différents angles d'incidence et l'effet cosinus correspondant. La figure (II-4) compare l'effet cosinus aux collecteurs orientés nord-sud et ceux orientés est-ouest. Elle montre l'éclairement de l'ouverture au cours du jour aux solstices d'hiver et d'été et aux équinoxe. Un emplacement à 30 ° de latitude a été choisi. On voit que :

- L'*éclairement*\* du collecteur au cours de la journée est plus équilibré pour l'orientation nord-sud.
- La variation saisonnière de l'*éclairement* du collecteur est plus faible pour l'orientation est-ouest
- Le pic de l'éclairement (au midi solaire) est plus élevé pour l'orientation est-ouest (en un endroit en dehors des Tropiques. C'est le cas pendant toute l'année).

- Ce qui est plus difficile à voir dans le schéma, c'est que le rendement énergétique total au cours de l'année est plus élevé pour l'orientation nord-sud. Cependant, si on considère la somme des zones situées sous les courbes (en prenant deux fois la courbe d'équinoxe pour le printemps et l'automne), ce qui représente une bonne représentation comparative de l'irradiation\* annuelle des collecteurs pour les deux orientations, on peut discerner une irradiation annuelle plus élevée du collecteur pour l'orientation nord-sud.

\*Irradiation : flux d'énergie incident par unité de surface. (**USI:**  $J/m^2$ ,  $Wh/m^2 = 3600 J/m^2$ ).

\*Eclairement : flux de puissance incident par unité de surface (**USI:**  $W/m^2$ ).

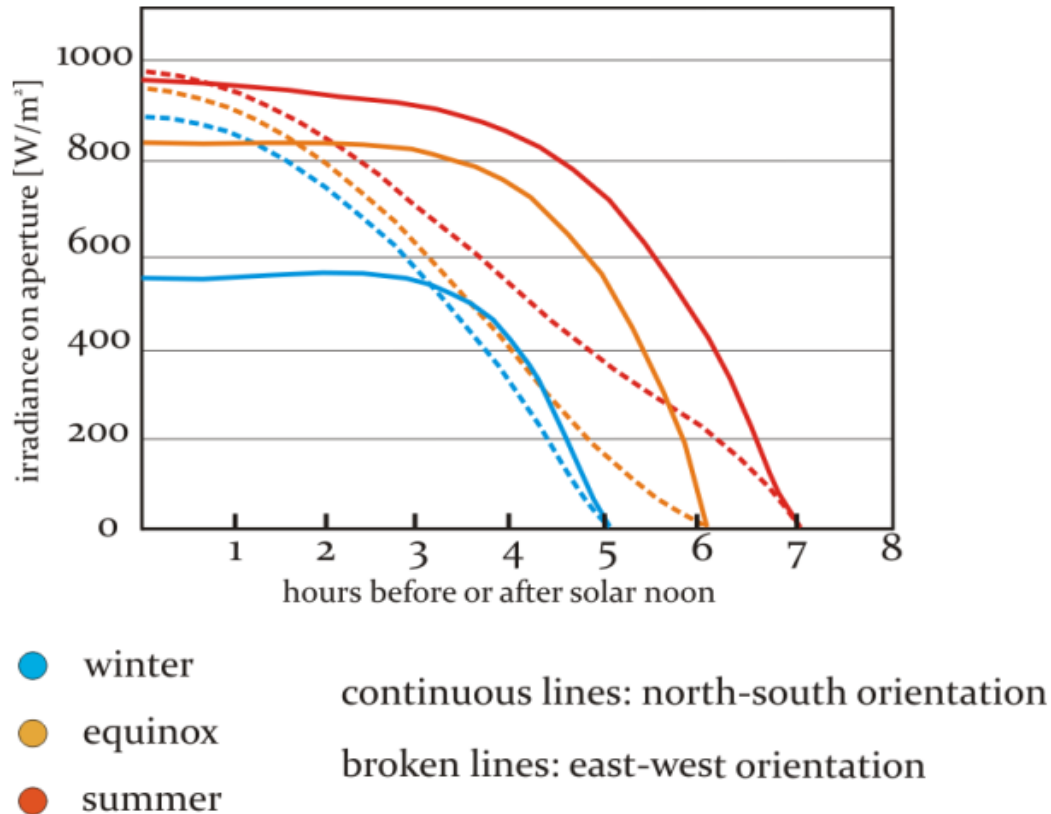


Figure I- 4 : Eclairement des collecteurs cylindro-paraboliques orientés nord-sud et est-ouest pendant les solstices et les équinoxes [9]

## 2. Géométrie des CCP :

### 2.1 Concentration du rayonnement dans un CCP

Les CCP ont une ligne focale, qui se compose des points focaux des sections transversales paraboliques. Le rayonnement qui entre dans un plan parallèle au plan optique est réfléchi de telle manière qu'il passe à travers la ligne focale.

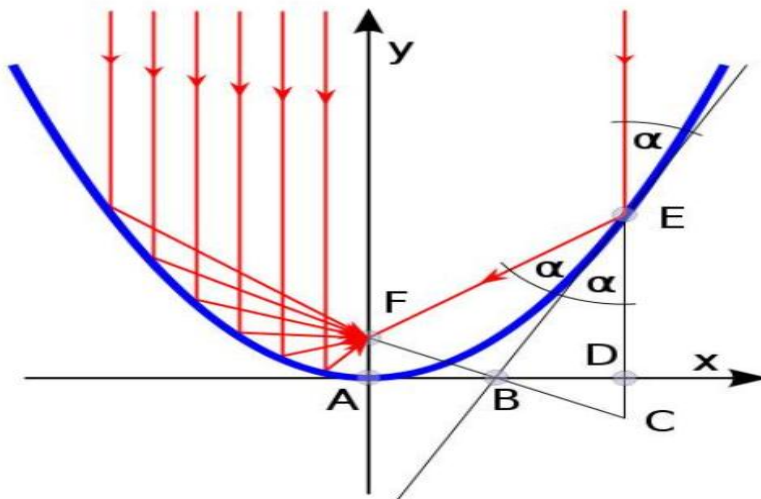


Figure I- 5 : Chemin des rayons parallèles dans un miroir parabolique [8]

## 2.2 Paramètres pour la description géométrique d'un CCP

Les quatre paramètres suivants sont couramment utilisés pour caractériser la forme et la taille d'un CCP: longueur du cylindre, distance focale, largeur d'ouverture, c'est-à-dire la distance entre les deux bords du miroir et l'angle de bord du concentrateur, c'est-à-dire l'angle entre l'axe optique et la surface d'ouverture:

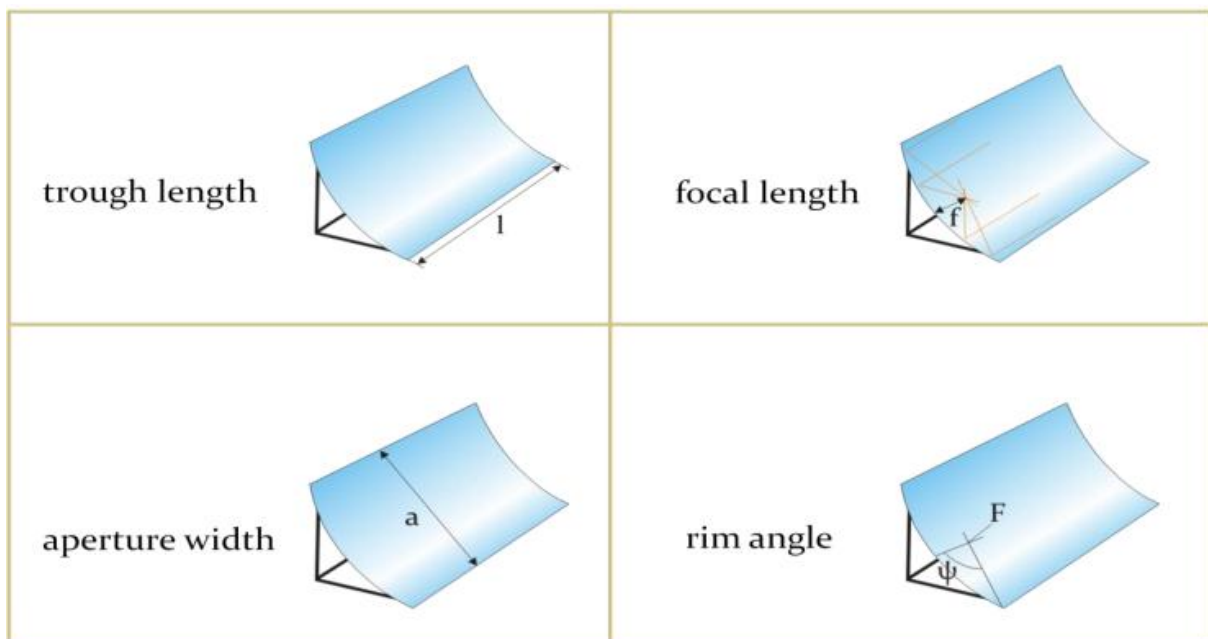


Figure I- 6 : Paramètres géométriques d'un cylindro-parabolique [8].

## 3. Principe de fonctionnement du système de poursuite:

Tout au long de la journée et de l'année (selon les saisons) la position du soleil varie constamment et d'une manière différente selon la latitude du lieu. Le système de poursuite a pour rôle d'orienter, en temps réel, les collecteurs vers le soleil pour placer le panneau dans une position optimale par rapport à l'incidence du rayonnement solaire (perpendiculaire au

rayonnement si possible). Cette adaptation en temps réel a pour effet de substantiellement augmenter la captation et production d'énergie.

#### **IV. Les méthodes de poursuite :**

Il existe deux grandes méthodes pour assurer le suivi:

##### **1. La méthode des capteurs de lumière :**

Le fonctionnement est supervisé uniquement par des capteurs solaires qui commandent le suiveur de façon à placer en permanence les collecteurs solaires face au soleil de façon à capter le maximum de rayonnement solaire direct[10].

##### **2. La méthode basée sur la géométrie solaire :**

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

Notre travail est consacré à la réalisation d'un système de poursuite solaire à un seul axe à base des équations astronomiques.

Dans la littérature, il existe plusieurs algorithmes de calcul de la position apparente du soleil par rapport une surface placée en un lieu donnée de la terre. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation de quelques algorithmes les plus utilisés.

## Chapitre II : Géométrie solaire

Dans ce chapitre nous présenterons les équations astronomiques qui permettent de repérer la position du soleil au cours de la journée et de l'année par rapport à un lieu géographique donné.



## I. Introduction :

Dans ce deuxième chapitre, on décrira la position du soleil par rapport à la terre et les différents paramètres qui peuvent influencer sur l'énergie solaire incidente sur terre comme les mouvements apparents du soleil dans le ciel au cours d'une journée ou au cours de l'année et la situation géographique du lieu.

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

### 1. Le 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[11].

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

Diamètre (km)	1392684
Masse (kg)	$1,9891 \cdot 10^{30}$
Surface (km <sup>2</sup> )	$6,0877 \cdot 10^{12}$
Volume (km <sup>3</sup> )	$1,412 \cdot 10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2,5 \cdot 10^{17}$

Table II- 1 : Caractéristiques principales du soleil [12]

### 2. Mouvement de la terre autour du soleil :

L'orbite de la Terre autour du Soleil est une ellipse où le soleil occupe un des foyers[13].

Un tour complet du circuit dure 365 jours 5 heures et 46 minutes (environ). Ce mouvement détermine les durées du jour et de la nuit ainsi que les saisons sur la surface terrestre.

- Aux équinoxes du 21 mars et du 21 septembre, le soleil est perpendiculaire à l'Equateur (sa déclinaison est nulle :  $\delta=0^\circ$ ).
- Au solstice d'été du 21 juin, il est perpendiculaire au tropique du Cancer (hémisphère nord) (sa déclinaison est maximale :  $\delta=23^\circ 26'$ ).
- Au solstice d'hiver du 21 décembre, il est perpendiculaire au tropique du Capricorne (hémisphère sud)(sa déclinaison est minimale :  $\delta=-23^\circ 26'$ )[14].

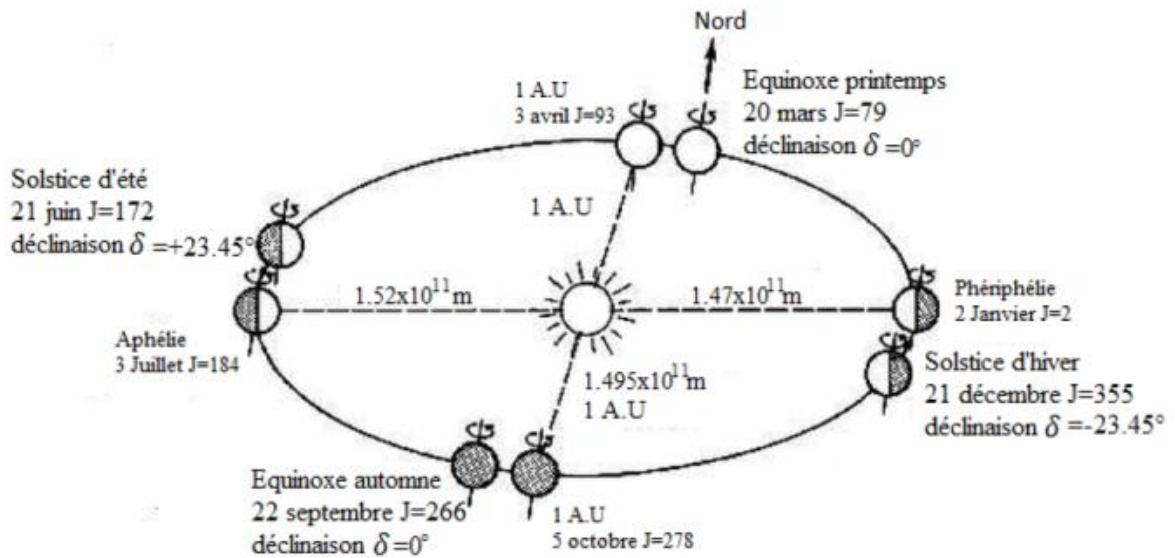


Figure II-1 : Le mouvement de la terre autour du soleil [12]

### III. La sphère céleste :

C'est une sphère imaginaire, de rayon arbitraire et dont le centre est l'origine du système de coordonnées célestes de référence considéré. Les positions des objets célestes ainsi que leurs trajectoires apparentes dans le ciel, sont marquées sur la surface interne de la sphère.

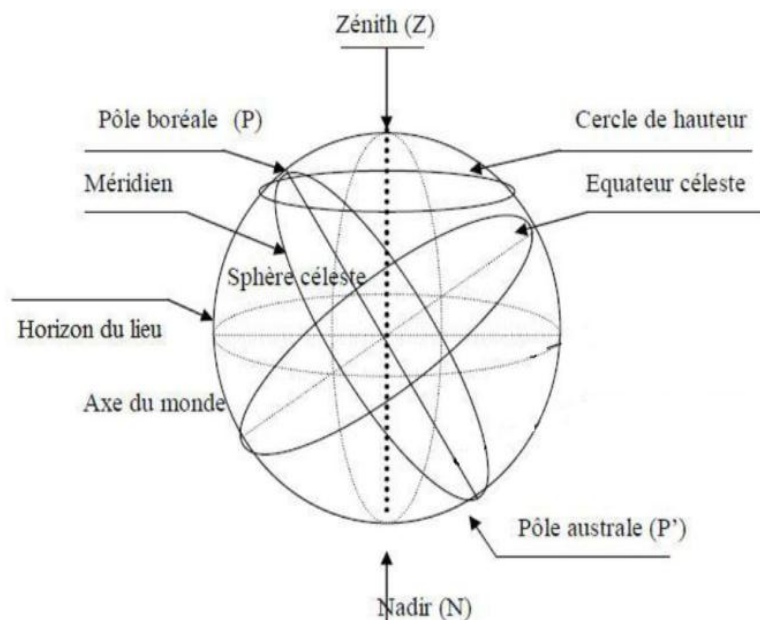


Figure II- 2 : La sphère céleste [6]

## 1. Grandeurs géographiques et astronomiques :

### 1.1 Repérage d'un site à la surface terrestre :

#### 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, sa longitude et son altitude. La latitude et la longitude représentent les coordonnées géographiques de ce point.

La **longitude** ( $L$ ):est une valeur angulaire, expression du positionnement EST ou OUEST d'un point sur Terre. En géodésie, c'est l'angle au centre que forme le plan passant par ce point et par l'axe de rotation de la terre avec le plan du méridien de Greenwich[15].

La **latitude** ( $\varphi$ ) : est une valeur angulaire, expression du positionnement NORD ou SUD d'un point sur Terre. D'un point de vue mathématique, la latitude d'un point est l'angle au centre que forme la normale (verticale) en ce point avec le plan équatorial [6].

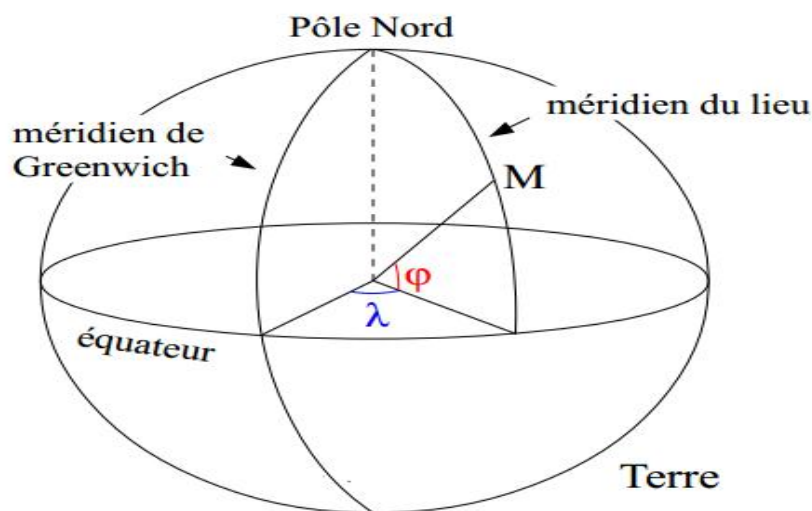


Figure II- 2 : Les coordonnées géographiques [14]

- Pour Fès : **Latitude** :  $34.0331300^\circ$ , **Longitude** :  $-5.0002800^\circ$  [16]

#### 1.2. Détermination de la direction du soleil :

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

- les coordonnées horizontales : définies par rapport au plan horizontal d'un lieu à la surface de la Terre.
- les coordonnées équatoriales: définies par rapport au plan équatorial de la terre.

##### 1.2.1. Les coordonnées équatoriales :

Est un système de coordonnées célestes dont les valeurs sont indépendantes de la position de l'observateur. Ce système utilise comme plan de référence la projection, sur la sphère céleste, de l'équateur de la Terre. Cette projection est l'équateur céleste, qui divise le ciel en

deux hémisphères, chacun ayant comme axe de référence la projection d'un pôle terrestre, perpendiculaire à l'équateur céleste. À partir de ces divisions, le système permet d'établir deux coordonnées angulaires : l'ascension droite et la déclinaison[17]:

- **L'ascension droite** (ad) : est l'angle mesuré sur l'équateur céleste à partir d'un point de référence, le point vernal, correspondant à une intersection entre l'équateur céleste et l'écliptique. À partir de ce point, l'angle est mesuré vers l'Est et comporte 24 divisions principales de 15 degrés (°) chacune, nommées « heures ».
- **La déclinaison** (D) : est l'angle mesuré perpendiculairement entre l'équateur céleste et l'objet céleste observé. Elle se mesure en degrés, positifs pour les objets situés dans l'hémisphère nord et négatifs pour ceux de l'hémisphère sud. La déclinaison varie ainsi de  $-90^\circ$  (pôle sud) à  $+90^\circ$  (pôle nord) en passant par  $0^\circ$  à l'équateur céleste.

$$D=23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(J + 284)\right] \quad (\text{II.1})$$

Avec J : est le numéro du jour dans l'année (J = 1 le premier janvier).

Jan	Fév	Mars	Av	Mai	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335

Table II.2 : numéro jour du premier de chaque mois de l'année

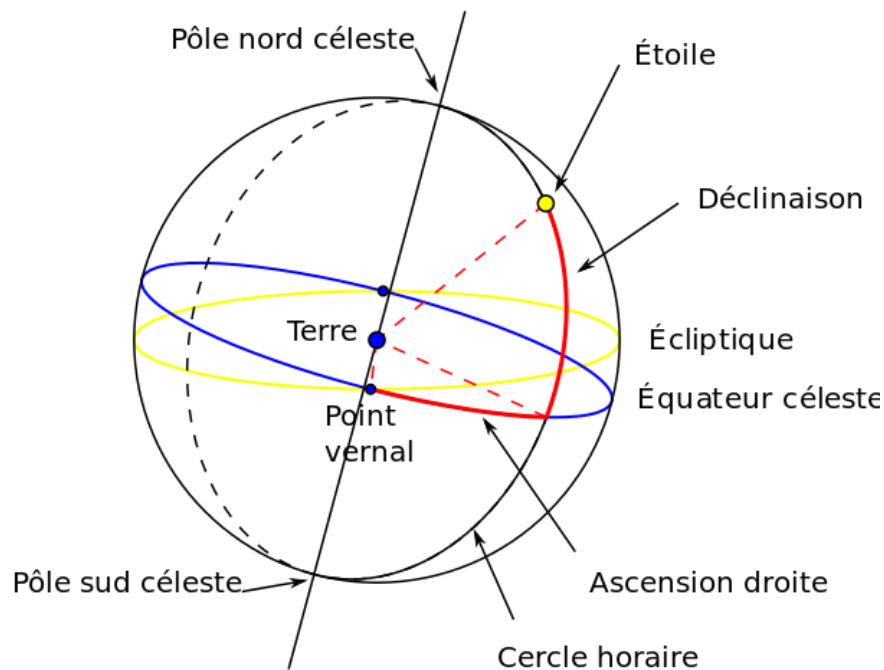


Figure II- 3: Coordonnées équatoriales [17]

- **L'angle horaire** (w) : 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 :

$$w=15(\text{TSV}-12) \quad (\text{II.2})$$

Avec TSV : temps solaire vrai

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

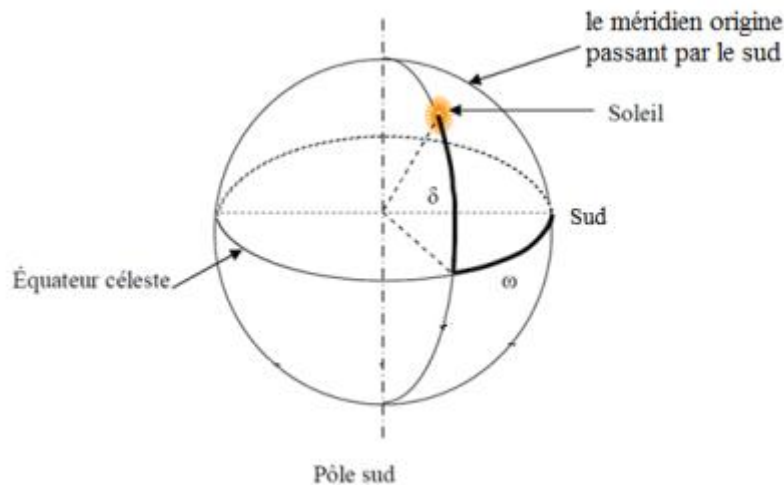


Figure II- 4 : Coordonnées horaires [6]

### 1.2.2. Les coordonnées horizontales :

Est un système de coordonnées célestes utilisé en astronomie par un observateur au sol. Le système sépare le ciel en deux hémisphères : l'un situé au-dessus de l'observateur et l'autre situé au-dessous, caché par le sol. Le grand cercle séparant les deux hémisphères situe le plan horizontal, à partir duquel sont établis une altitude et un azimut, qui constituent les deux principales coordonnées de ce système[18].

- **L'angle d'élévation**, ou la **hauteur** ( $h$ ) : est l'angle vertical entre le plan horizontal et l'objet visé. Il varie entre  $0^\circ$  (horizon) et  $90^\circ$  (zénith). Il est cependant possible d'obtenir des valeurs négatives lors d'une observation à partir d'un lieu élevé. Le point situé aux pieds de l'observateur ( $-90^\circ$ ) est appelé le nadir [18].

$$h = \sin^{-1}[\sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(w)] \quad (\text{II.3})$$

Avec :  $\delta$  la déclinaison,  $w$  l'angle horaire,  $\phi$  : la latitude

$h$  est égale à  $0^\circ$  au lever et au coucher du soleil, sa valeur est maximale à midi temps solaire vrai.

- L'azimut ( $A$ ) est déterminé par l'angle entre le nord ou le sud géographiques et la projection de la direction de l'objet observé sur le plan horizontal. Les azimuts sont généralement de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  dans le sens horaire à partir point cardinal choisi.[18]

$$A = \sin^{-1}\left[\frac{\cos(\delta)\sin(w)}{\cos(h)}\right] \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $\delta$  la déclinaison,  $w$  l'angle horaire,  $h$  la hauteur

- **L'angle du zénith solaire (Oz)** : est l'angle entre les rayons solaires et la direction verticale locale. C'est le complément de la hauteur solaire.

$$Oz = 90 - h(^{\circ}) \quad (II.5)$$

Avec :  $h$  la hauteur

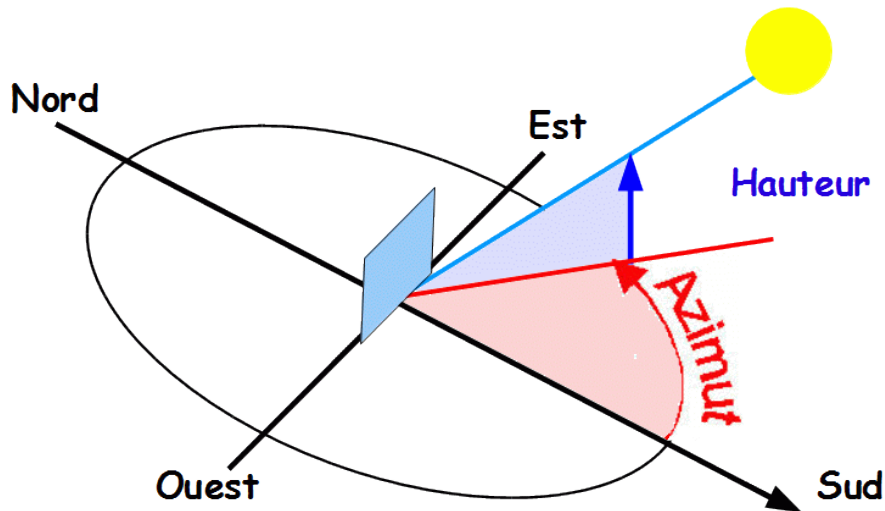


Figure II- 5 : Coordonnées horizontales [32]

## 2. Angle d'incidence et angle de suivi

- **L'angle d'incidence** est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan.

Cet angle gouverne l'intensité du rayonnement direct intercepté par le plan d'ouverture du concentrateur [19].

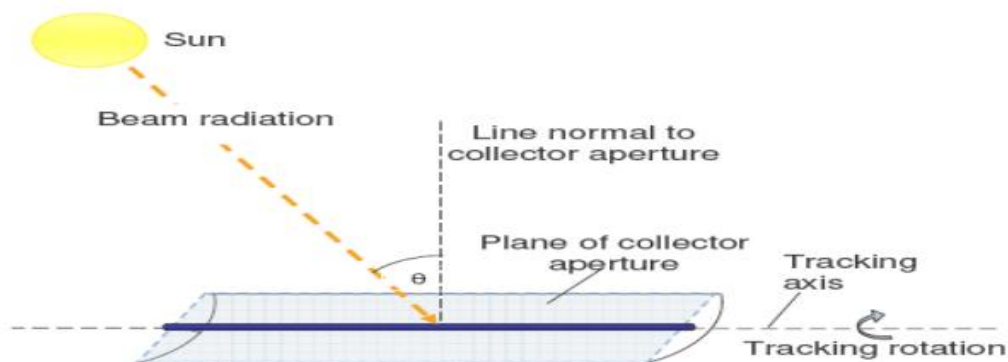


Figure II.6 : angle de suivi et angle d'incidence [19]

## 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 ».

Dans la pratique, la course exacte du Soleil dans le ciel varie tout au long de l'année. La trajectoire apparente du Soleil dans le ciel se modifie donc au cours des saisons. Elle est plus courte au solstice d'hiver ; le Soleil se lève pratiquement au Sud-Est et se couche pratiquement au Sud-Ouest ; et plus longue au solstice d'été ; le soleil se lève pratiquement au Nord-Est et se couche pratiquement au Nord-Ouest .

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, le Soleil se lève exactement à l'Est et se couche exactement à l'Ouest, 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).

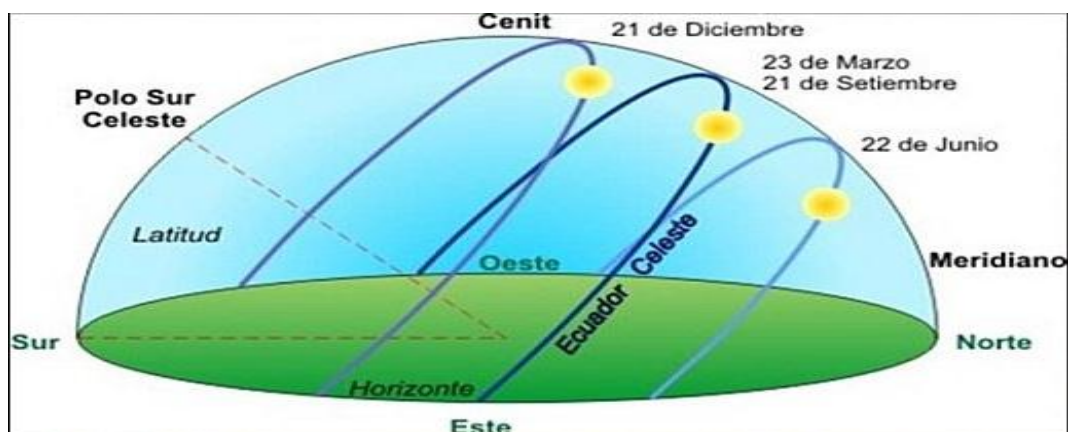


Figure II- 7 : Courses particulières du Soleil [20]

#### IV. Les temps solaires:

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  $(360/365,25 = 0,986^\circ)$  .

### 1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V):

Le temps solaire vrai est une mesure du temps basée sur le déplacement apparent du Soleil au cours de la journée. En découle la définition du midi solaire : c'est l'instant où le Soleil atteint son point de culmination, en un endroit donné de la Terre ; à cet instant, son angle horaire est égal à zéro[21]:

$$\text{T.S.V} = 12 + (w / 15) \quad (\text{II.6})$$

avec :T.S.V en heure et en degré.

### 3. 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 T.S.V (écart maximal =16 minutes) [21].

Le temps solaire moyen est donné par la relation suivante :

$$\text{T.S.M} = \text{T.S.V} - \text{Et} \quad (\text{II.7})$$

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

### 4. Équation du temps (Et):

La différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai est appelée l'équation du temps. Sur Terre, elle atteint son maximum de 16 minutes[21].

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

$$\text{Et} = \text{T.S.M} - \text{T.S.V} \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Et} = 0.258 \cos(N) - 7.416 \sin(N) - 3.648 \cos(2N) - 9.228 \sin(2N) \quad (\text{II.9})$$

Avec  $N = (360/365.242)(j-1)$

$j$  : est le numéro du jour dans l'année ( $j = 1$  le premier janvier).



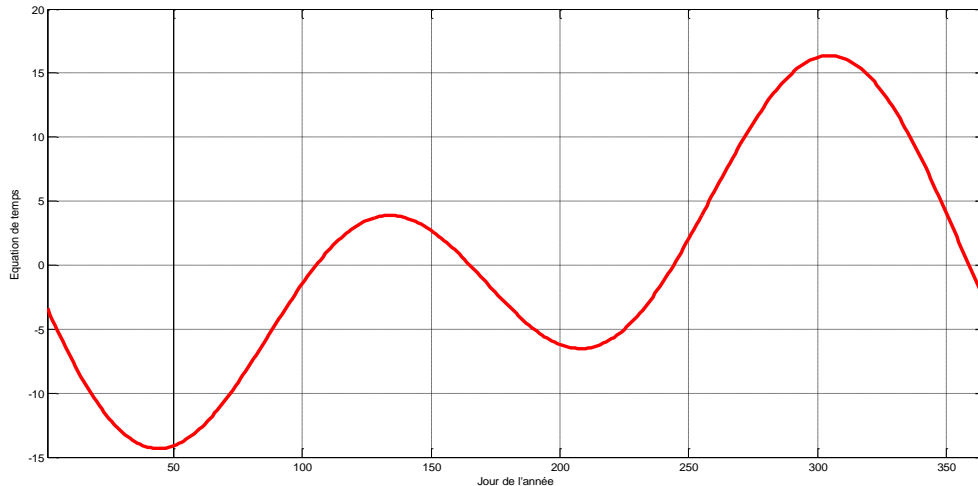


Figure II- 9 : Variation de l'équation du temps au cours de l'année

#### 4. Temps légal TL :

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.

$$\mathbf{TL = TU + DE} \quad \text{(II.10)}$$

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

#### 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:

$$\mathbf{TSM = TU + (L/15)} \quad \text{(II.11)}$$

Avec : L en degré positive à l'Est négative à l'Ouest (L/15 est en heure. En minutes, on remplace L/15 par 4L).

#### 6. Lever et coucher du soleil :

**Le temps du lever :**

$$t_{sv\text{lever}} = 12 - \arccos(-\tan(d) * \tan(f)) / 15 \quad \text{(II.12)}$$

**Le temps du coucher :**

$$t_{sv\text{coucher}} = 12 + \arccos(-\tan(d) * \tan(f)) / 15 \quad \text{(II.13)}$$

## V. Programmes

Il existe plusieurs programmes pour faire le suivi du soleil au cours de la journée, on cite parmi ces programmes :

- **SPA** : Cet algorithme calcule les angles du zénith solaire et de l'azimut, avec des incertitudes de +/- 0,0003 degrés en fonction de la date, l'heure et l'emplacement sur Terre [22].  
Cette procédure est définie à partir des algorithmes astronomiques qui sont basés sur les variations séculaires des orbites planétaires [23].

Cet algorithme est très précis mais lent pour le calcul de la position du soleil par rapport à un observateur à la surface du sol [24].

- **SG2** : Vu que le SPA est lent, Blanc et Wald ont proposé un nouvel algorithme SG2 qui est plus rapide que le SPA et offre environ un même niveau de précision: une erreur maximale dans le vecteur solaire d'ordre de 10. Cette performance est obtenue en concevant des approximations des équations d'origine du SPA pour diminuer le nombre d'opérations [24].
- **AJER 2014** :est un système d'équations développé pour le calcul de l'efficacité des collecteurs cylindro-paraboliques[19].
- **MUNEER**: est un algorithme développé par l'astronome *Yallop*. [25]:

## 1. Comparaison

Après avoir programmé ces 4 algorithmes, on a comparé les résultats aux équinoxes (automne et printemps) et aux solstices (été et hiver) pour les deux orientations nord-sud et est-ouest des concentrateurs cylindro-paraboliques. Les figures à gauche représentent l'angle de tracking (équations I.1 et I.2) et celles à droites représentent l'erreur par rapport à l'algorithme SPA pris comme référence :

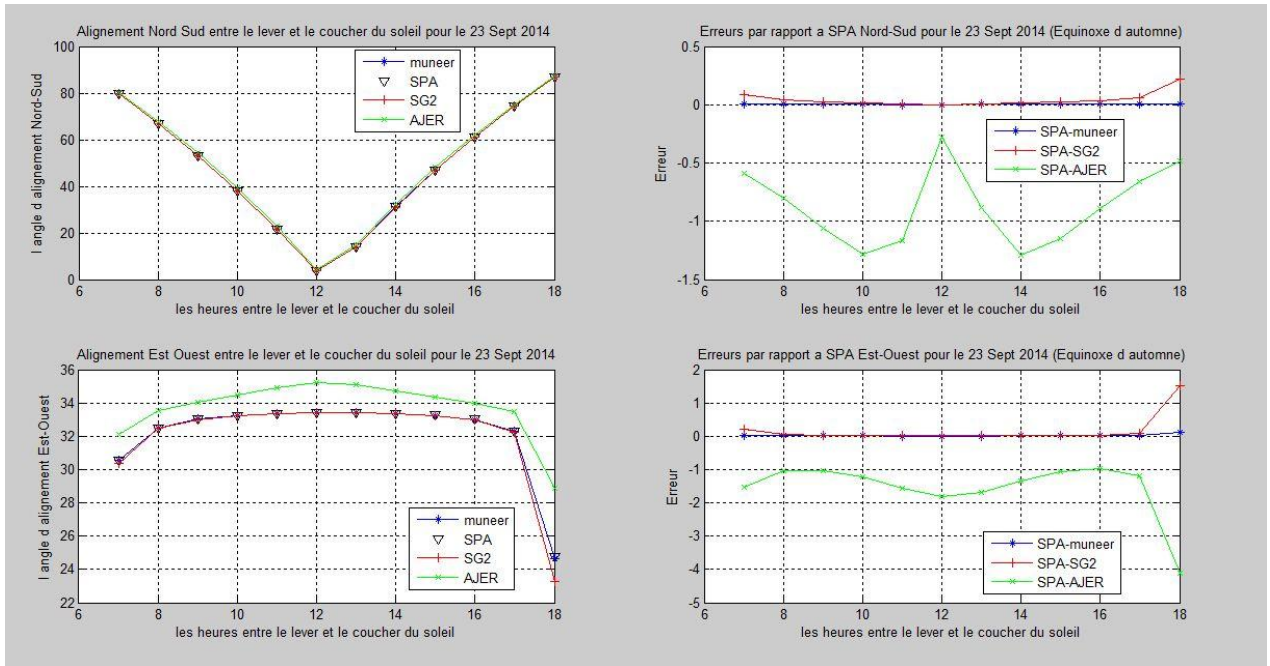


Figure II.10 : Equinoxe d'automne

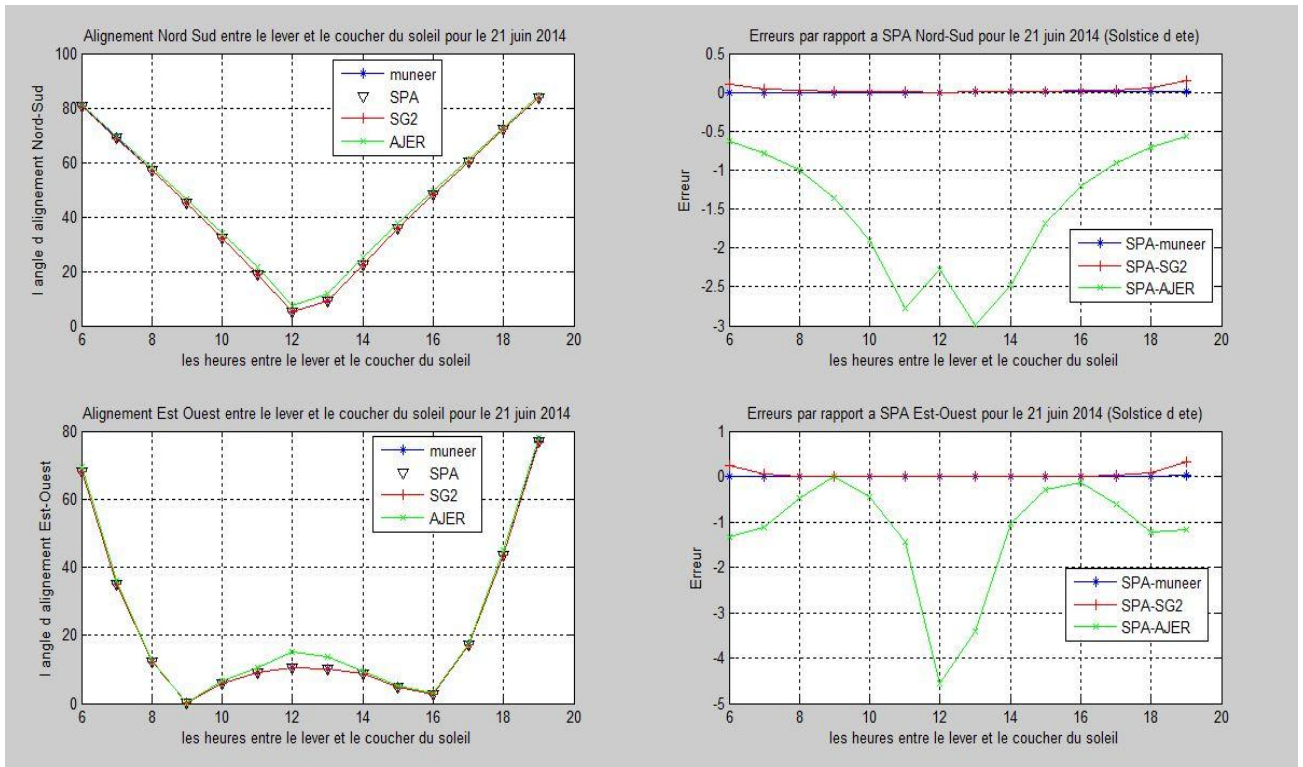


Figure II.11 : Solstice d'été

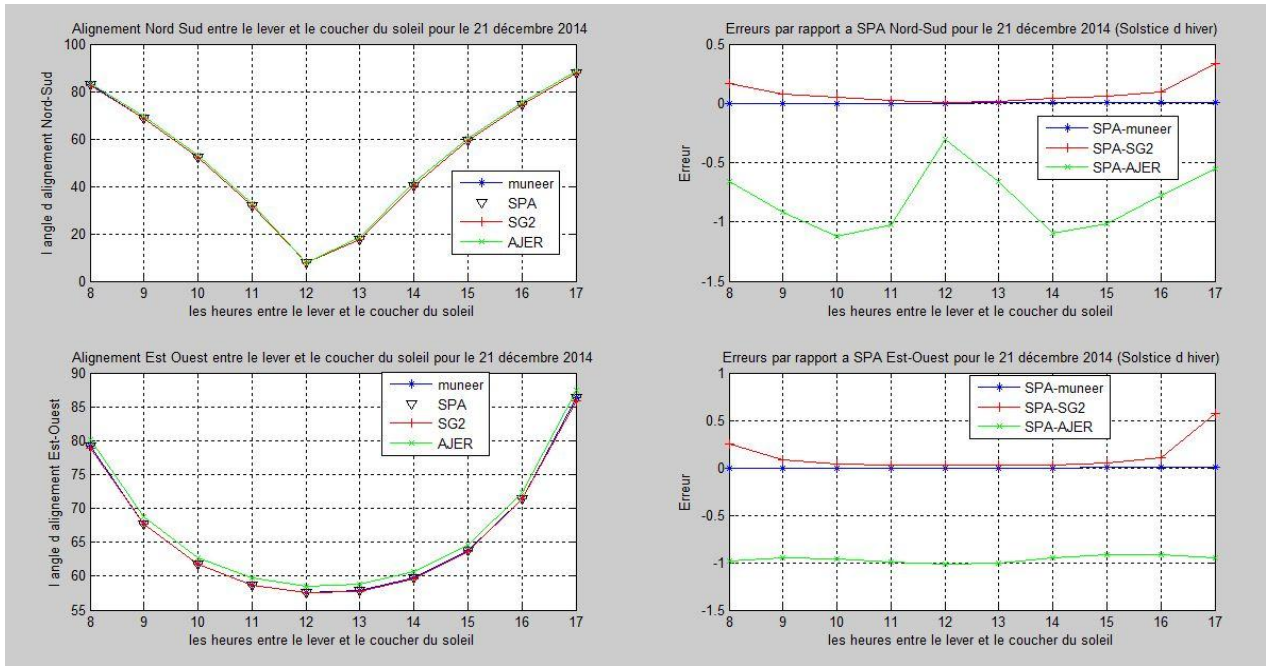


Figure II.12 : Solstice d'hiver

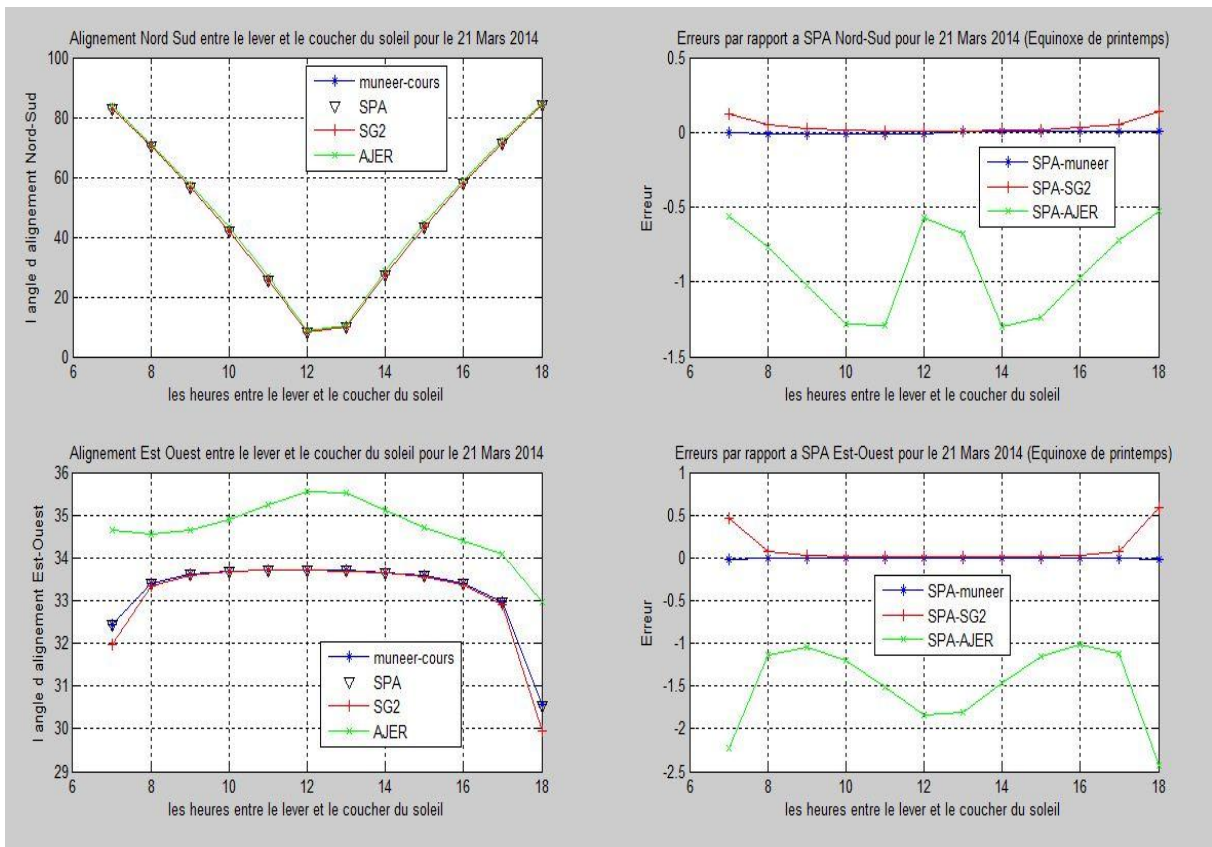


Figure II.13 : Equinoxe du printemps

## 2. Conclusion :

D'après les résultats ci-dessus, on remarque que l'angle de suivi calculé par l'algorithme AJER décale visiblement de celle calculé par le SPA pris comme référence. La différence est généralement supérieure à  $1^\circ$  et peut aller au-delà de  $4^\circ$  en valeur absolue en particulier pour l'orientation Est-Ouest. Pour le SG2, un petit décalage est observé vers le lever et le coucher du soleil mais la différence reste inférieure à  $0.5^\circ$ . Nous avons alors opté pour le programme **MUNEER** pour faire le suivi du soleil vu qu'il donne les meilleurs résultats.

## **Chapitre 3 :TESTS et REALISATION**

Dans ce chapitre, nous allons présenter une description détaillée de notre système de poursuite solaire mono axe basé sur les équations astronomiques. L'accent sera mis sur la description des composants utilisés, la procédure et la réalisation.

## I. Introduction :

Cette dernière étape est consacrée à présenter la procédure de réalisation du suiveur solaire à base d'équations astronomiques. Le dispositif électronique comprend un moteur pas à pas, un circuit de commande microcontrôleur Arduino (Arduino-Uno), un circuit de puissance (ULN2003) et un afficheur LCD permettant d'afficher la date et l'heure de la RTC (Real time clock).

Le système de suivi est basé sur la programmation en logiciel Arduino du déplacement du concentrateur solaire (entre le lever et le coucher du soleil) suivant la trajectoire du soleil au cours de la journée.

Le concentrateur solaire doit retrouver sa position de standby après le coucher du soleil.

## II. Description du système de poursuite :

Notre système de poursuite contrôle le mouvement d'un collecteur solaire à l'aide d'un programme informatique. Le module est orienté selon un seul axe pour suivre automatiquement le soleil sur une trajectoire bien définie grâce à des équations astronomiques traduite en programme sur un microcontrôleur Arduino.

Il est constitué de deux parties: la partie commande et la partie opérative. La partie commande comporte un microcontrôleur Arduino Uno. La partie opérative comporte un circuit de puissance composé d'un driver ULN2003 lié à un moteur pas à pas, qui assure le mouvement de l'angle de suivi (tracking angle).

Les informations concernant la trajectoire à suivre seront traitées par le microcontrôleur Arduino Uno et envoyées sous forme d'impulsions pour être exécutées par le circuit de puissance ULN2003.

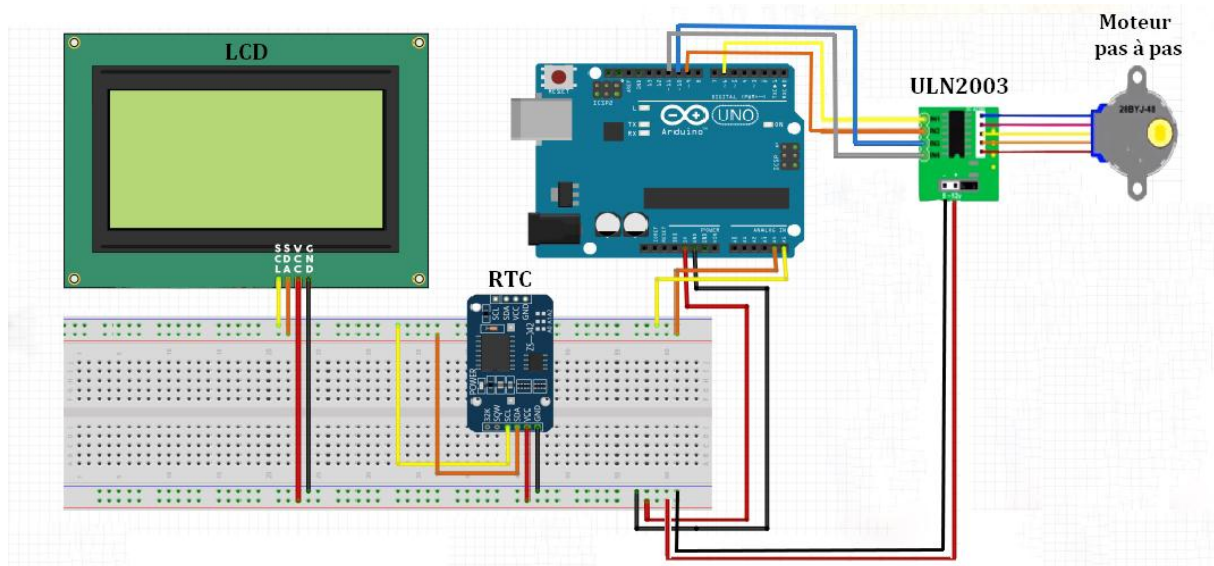


Figure III.1 : Câblage du système

### III. Description des composants électroniques :

#### 1. La carte Arduino Uno :

##### 1.1. Spécifications techniques

Arduino Uno est un panneau de microcontrôleur basé sur l'ATmega328P. Il dispose de [26]:

- 14 broches d'entrée / sortie numériques (dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM).
- 6 entrées analogiques.
- un cristal à quartz 16 MHz.
- une connexion USB, une prise de courant.
- un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation.

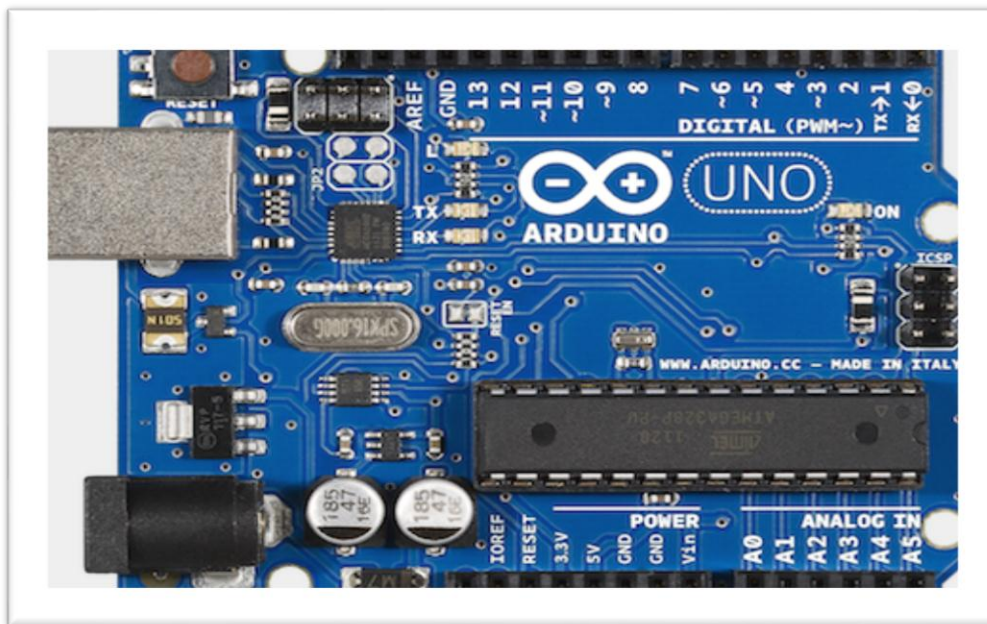


Figure III.2 : carte Arduino Uno[26].

##### 1.2. Alimentation :

La carte Arduino Uno peut être alimentée via la connexion USB ou avec une alimentation externe. La source d'alimentation est sélectionnée automatiquement.

L'alimentation externe (non-USB) peut provenir d'un adaptateur AC-DC ou d'une batterie. Le tableau peut fonctionner sur une alimentation externe de 6 à 20 volts. S'il est fourni avec moins de 7V, cependant, la broche 5V peut fournir moins de cinq volts et la carte peut devenir instable. Si on utilise plus de 12 V, le régulateur de tension peut surchauffer et endommager la carte. La plage recommandée est de 7 à 12 volts[27].



### 1.3. Programmation :

La carte Arduino Uno est une carte programmable, elle peut être programmée avec le logiciel Arduino. Il suffit de sélectionner "Arduino Uno" dans le menu 'Outils' > type de carte > puis choisir le port convenable.



La figure III.3 :Interface du logiciel Arduino.

### 1.4. Raisons du choix Arduino Uno

- Le logiciel Arduino compatible sous toutes les plateformes, à savoir : Windows, Linux et Mac OS..., par contre la plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
- Un environnement de programmation clair et simple : l'environnement de programmation Arduino est facile.
- Coût inférieur par rapport à celui de l'Arduino Méga.

## 2. Moteur pas à pas :

### 2.1. Principe de fonctionnement :

Le moteur pas à pas à 4 phases réducté peut être positionné sur une valeur angulaire précise. Il possède un couple important permettant de l'utiliser dans la plupart des petits montages. Son driver ULN2003 (réseau de transistors Darlington) lui apporte la puissance que la carte Arduino ne peut pas fournir directement [28].

Le moteur pas à pas est un moteur qui tourne en fonction des impulsions électriques reçues dans ses bobinages. L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques s'appelle un pas. On caractérise un moteur par le nombre de pas par tour (c'est à dire pour 360°)[29].

## 2.2. Fonction globale :

La fonction globale d'un moteur pas à pas est la conversion d'une énergie électrique (une information numérique) reçue comme entrée en énergie mécanique (déplacement angulaire).

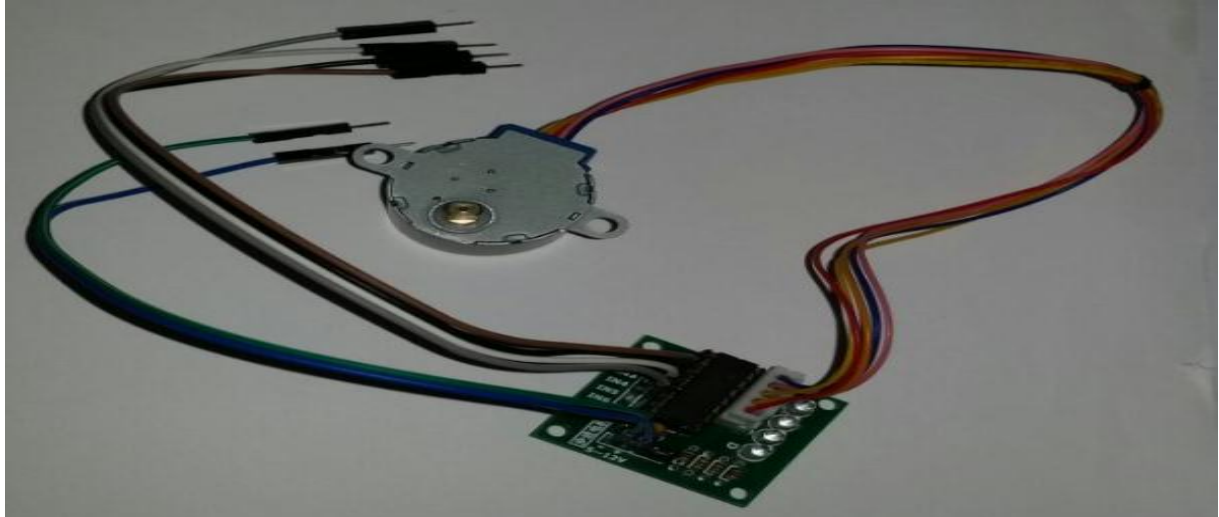


Figure III.4 : Moteur pas à pas unipolaire

## 2.3. Raisons du choix du moteur pas à pas unipolaire

- Très économique .
- Permet de motoriser précisément les petit montages.
- Il fonctionne en 5V.
- Comporte 48,64, 100 ou 200 pas par tour.
- Le couple de rotation est de 34 mN.m (~340 g.cm)
- Des diodes de visualisation permettent de contrôler le bon fonctionnement des 4 phases (A, B, C, D).
- Le driver ULN2003 fonctionne avec des moteurs unipolaires mais pas avec les moteurs bipolaires qui nécessitent un pont en H pour être pilotés [32].

## 2.4. Commande d'un moteur pas à pas :

**Unité de pilotage** → **Production des signaux de commande du moteur pas à pas** → **Amplification en puissance** → **Moteur pas à pas (déplacement angulaire).**

**Unité de pilotage :** à partir de la carte Arduino on peut commander :

- le sens de rotation.
- l'angle de rotation et donc la vitesse qui en résulte.

**Production des signaux de commande du moteur:** la carte permet de produire les signaux de commande du moteur pas à pas.

**Amplification en puissance (à base d'ULN2003):** cette fonction permet d'amplifier en puissance les signaux de commande du moteur afin de pouvoir commander le moteur pas à pas.

**Moteur pas à pas :** le moteur pas à pas permet de convertir les signaux de commande du moteur pas à pas en déplacement angulaire.

### 3. Circuit ULN2003 :

Le ULN2003A est un ensemble de sept transistors NPN Darlington capables de 500 mA, 50V en sortie. Il dispose de diodes de retour à cathode communes pour la commutation de charges inductives. Il est connu pour son haut courant et sa haute tension. Généralement, il peut être utilisé pour l'interfaçage avec un moteur pas à pas, il permet d'alimenter ce dernier avec un courant beaucoup plus intense que ce que peut tolérer la carte Arduino Uno.

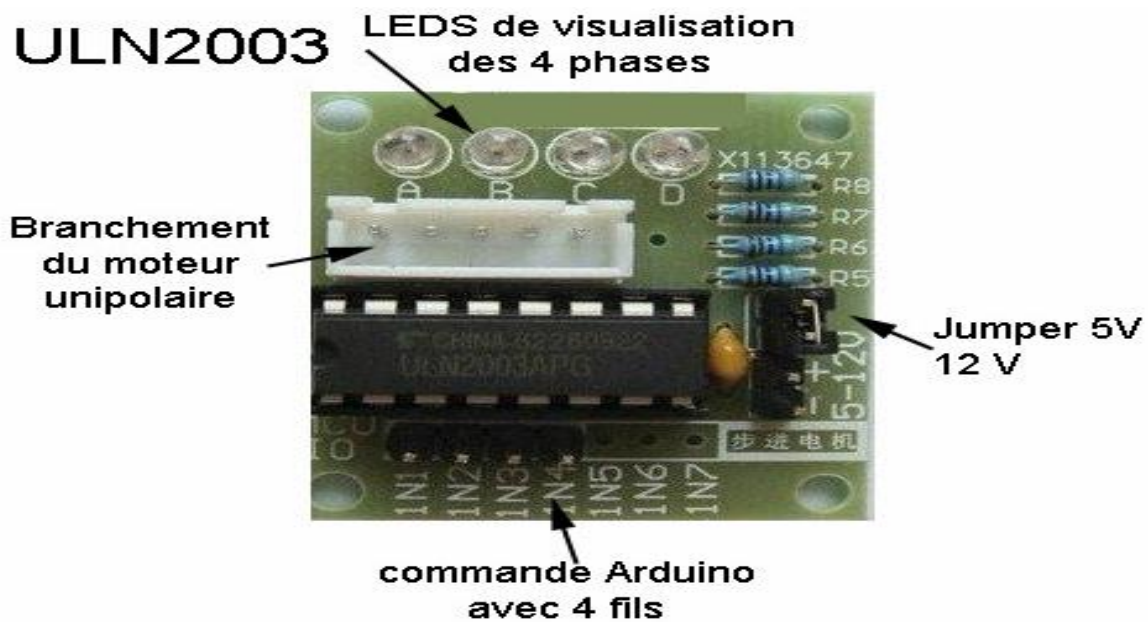


Figure III.5 : Driver ULN 2003 [32]

#### Caractéristiques

- Courant collecteur évalué 500 mA (sortie unique)
- Sortie de 50 V (il existe une version prenant en charge la sortie de 100 V)
- Comprend les diodes de retour de sortie
- Entrées compatibles avec TTL et 5-V logique CMOS [30]

#### 4. Afficheur LCD (16\*2):

Permet d'afficher tous les paramètres nécessaire (heure ; date; latitude ; longitude ; lever et coucher du soleil ; angle de suivi Nord-Sud et Est-Ouest).



Figure III.6 Affichage du l'heure et la date.



Figure III.7 Affichage de la longitude et la latitude de la ville de Fes



Figure III.8 Affichage des angles de suivi Nord-Sud et Est-Ouest

## VI. Réalisation du système :

Dans cette partie nous allons présenter les différentes étapes de réalisation de notre système de poursuite du soleil.

Dans notre système, la commande est réalisée à l'aide d'une carte Arduino Uno dans laquelle on a intégré notre programme de l'algorithme Muneer, ce dernier va calculer les angles que le collecteur cylindro-parabolique(CCP) doit avoir pour s'orienter perpendiculairement aux rayons solaires. La commande du moteur pas à pas utilisée est réalisée via un driver ULN2003.

Après plusieurs essais et on a réussi à faire fonctionner correctement le système.

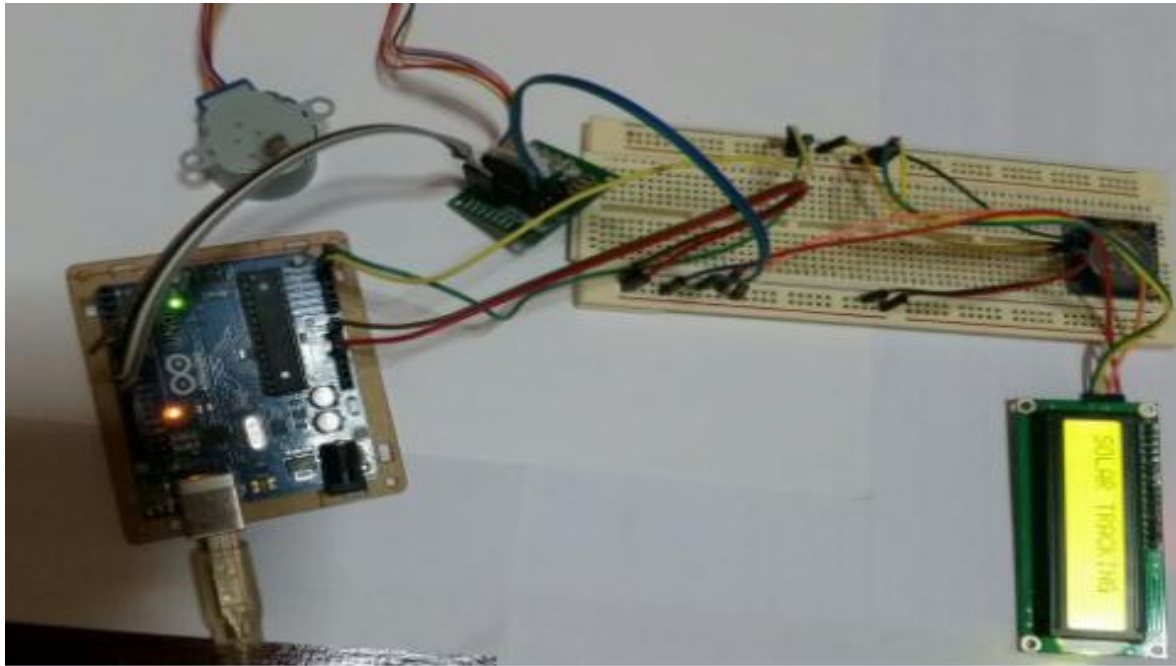


Figure III.9 : Système global

## CONCLUSION GENERALE

L'énergie solaire est l'une des disciplines mondiales les plus importantes dans le développement durable actuellement. Face à cette importance, le Maroc a lancé un programme solaire d'envergure visant la mise en place en 2020 d'une capacité de 2 GW.

Dans cette optique, nous nous sommes intéressés dans le présent travail à la conception et la réalisation d'un suiveur solaire à un seul axe à base d'équations astronomiques. Un système de poursuite solaire permet d'orienter un collecteur vers le soleil.

Le système réalisé est basé sur un programme Arduino bien développé qui transmet des impulsions à travers un circuit de puissance vers le moteur pas à pas qui assure le suivi de la trajectoire apparente du soleil pendant le jour. Une fois l'heure du coucher du soleil atteinte, le moteur remet automatiquement le collecteur dans la position du lever du soleil du jour suivant.

Comme perspectives, nous comptons passer du système démonstratif vers un système réel en utilisant des moteurs pas à pas plus précis et une structure avec un design mécanique adéquat.

## BIBLIOGRAPHIE & WEBOGRAPHIE

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_renouvelable](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable)] le 22/05/2017
- [2] <http://www.enr.fr/energies-renouvelables-dans-le-monde> le 26/05/2017
- [3] [[https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_renouvelable](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable)] le 22/05/2017
- [4] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Miroir\\_cylindro-parabolique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Miroir_cylindro-parabolique) consulté le 17/05/2017
- [5] <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16685> consulté le 19/05/17
- [6] KADDOURI Arafa memoire de projet de fin d'étude<<étude, conception et réalisation d'une d'un suiveur à deux axes>> université sidi mohammed ben abdellah FST fès département de génie électrique
- [7] <http://www.solar-tracking.fr/> consulté le 19/05/2017
- [8] Matthias Günther ,Michael Joemann, Simon Csambor ; Parabolic Trough Technology
- [9] Garg, H.P. (1987): *Advances in solar energy technology*, Dordrecht: Reidel
- [10] [http://www.gecif.net/articles/genie\\_electrique/sujets\\_bac/Bac2008\\_Suiveur%20de%20trajectoire.pdf](http://www.gecif.net/articles/genie_electrique/sujets_bac/Bac2008_Suiveur%20de%20trajectoire.pdf)(consulté le 25/05/2017)
- [11] Maouedj Rachid, Application de l'énergie photovoltaïque aupompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah, Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaïd Faculté des Sciences Département de physique 2005.
- [12] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil> (consulté le 14/05/2017)
- [13] [https://fr.vikidia.org/wiki/R%C3%A9volution\\_de\\_la\\_Terre\\_autour\\_du\\_Soleil](https://fr.vikidia.org/wiki/R%C3%A9volution_de_la_Terre_autour_du_Soleil)(consulté le 14/05/2017)
- [14] : JOSSE Eva ,SCHALLER Victor ,VILLENEUVE Amandine ; Durées des saisons et mouvement du soleil
- [15] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es\\_g%C3%A9ographiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es_g%C3%A9ographiques)(consulté le 14/05/2017)
- [16] <http://dateandtime.info/fr/citycoordinates.php?id=2548885> (consulté le 14/05/2017)
- [17] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_de\\_coordonn%C3%A9es\\_%C3%A9quatoriales#Notes\\_et\\_r.C3.A9f.C3.A9rences](https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_de_coordonn%C3%A9es_%C3%A9quatoriales#Notes_et_r.C3.A9f.C3.A9rences)(consulté le 14/05/2017)
- [18] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_de\\_coordonn%C3%A9es\\_horizontales](https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_de_coordonn%C3%A9es_horizontales)(consulté le 14/05/2017)
- [19] I. S. Sintali, G. Egbo and H. Dandakouta, Energy Equations for Computation of Parabolic-Trough Collector Efficiency Using Solar Position Coordinates, American Journal of Engineering Research, Volume-3, Issue-10, pp-25-33, 2014

- [20] [http://1.bp.blogspot.com/-JgRTfgCRt\\_U/T-Kq\\_pxIfcI/AAAAAAAAA\\_g/FwwUzD7Hp\\_Q/s1600/Solsticio+Maya1.jpg](http://1.bp.blogspot.com/-JgRTfgCRt_U/T-Kq_pxIfcI/AAAAAAAAA_g/FwwUzD7Hp_Q/s1600/Solsticio+Maya1.jpg)(consulté le 14/05/2017)
- [21] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Temps\\_solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Temps_solaire) (consulté le 14/05/2017)
- [22] Ibrahim Reda and Afshin Andreas, Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, Technical Report, NREL/TP-560-34302, National Renewable Energy Laboratory, 2008
- [23] Meeus J. , “Astronomical Algorithms”. Second edition 1998, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia, USA.
- [24] Philippe Blanc, Lucien Wald. The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period. Solar Energy, Elsevier, 88 (10), pp. Pages 3072-3083, 2012, <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00725987/document>(consulté le 22/05/2017)
- [25] T. Muneer , Solar radiation and daylight models, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004
- [26] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>(consulté le 22/05/2017)
- [27] <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno> (consulté le 22/05/2017)
- [28] [http://www.les-electroniciens.com/sites/default/files/cours/gpa668\\_pas\\_a\\_pas\\_e2011.pdf](http://www.les-electroniciens.com/sites/default/files/cours/gpa668_pas_a_pas_e2011.pdf) (consulté le 22/05/2017)
- [29] <http://sam.electroastro.pagesperso-orange.fr/dossiers/pasapas/moteurpas2.html>  
(consulté le 22/05/2017)
- [30] : <https://en.wikipedia.org/wiki/ULN2003A> (consulté le 22/05/2017)
- [32] :  
[https://www.google.com/search?q=Coordonn%C3%A9es+horizontales&source=lnms&tbn=sch&sa=X&ved=0ahUKEwi269id3aXUUhUNKywKHQzGCWQQ\\_AUIBigB&biw=1366&bih=662#imgrc=LBWR1bzKxNvE\\_M](https://www.google.com/search?q=Coordonn%C3%A9es+horizontales&source=lnms&tbn=sch&sa=X&ved=0ahUKEwi269id3aXUUhUNKywKHQzGCWQQ_AUIBigB&biw=1366&bih=662#imgrc=LBWR1bzKxNvE_M): (consulté le 04/06/2017)