



Mémoire de Projet de fin d'étude

Préparé par

Arafa KADDOURI

Pour l'obtention du diplôme

Ingénieur d'Etat en

SYSTEMES ELECTRONIQUES & TELECOMMUNICATIONS

Intitulé

*Conception et réalisation d'un suiveur
solaire à deux axes*

Encadré par :

Pr. A. AHAITOUF

Pr. A. MECHAQRANE

Soutenu le 29 Juin 2015, devant le jury composé de :

Pr. A. AHAITOUF

Pr. A. MECHAQRANE

Pr. N.ES-SBAI

Pr. H. EL MOUSSAOUI

Encadrant (FST Fès)

Encadrant (FST Fès)

Examinatrice (FST Fès)

Examineur (FST Fès)

Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience qui m'ont permis d'accomplir ce modeste travail.

*Je tiens en premier à exprimer ma grande gratitude et mes plus chaleureux et sincères remerciements à mes professeurs et encadrants **Pr. ABDELLAH MECHAQRANE** et **Pr. ALI AHAITOUF**, qui m'ont apporté leur aide et leurs valeureux conseils pour l'accomplissement de ce travail.*

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Et je présente mes sincères remerciements à tout le personnel qui m'a aidé à la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce mémoire:

À ma très chère mère qui a été la lumière de ma vie

Et Mon père

À ma chère sœur (dounia)

À âme de mes chères sœurs (aziza, fatima)

À mes chers frères (ahmed, moussef, ayoub et sabir)

*À toute ma famille et ma grande famille, pour tous les efforts et les
sacrifices qu'ils me présentent.*

*À tous mes amis (mohammed, tarik, aziz, hassane, otmane, ayoub,
rachid, youness) sans exception.*

À tous Mes professeurs et enseignants

Pour conclure, je le dédie à:

*À mon classe 3^{ème} année cycle d'ingénieur d'état système
électroniques et télécommunications et à tous ce qui m'ont aimé et
m'ont respecté*

Résumé

Le Maroc importe la plupart de ses besoins en énergie fossile (environ 96%) ce qui engendre une facture énergétique très lourde. D'un autre côté, et vue sa position géographique, le Maroc possède un gisement solaire considérable. Ces deux constats ont poussé le Royaume à lancer, en novembre 2009, un plan solaire d'envergure visant l'installation de stations solaires de production de 2000 MW d'électricité à l'horizon 2020. Les technologies adoptées sont le solaire à concentration (le CSP: Concentrating Solar Power) et le solaire photovoltaïque. La première, basée sur la concentration du rayonnement solaire direct, nécessite obligatoirement des systèmes de poursuite du soleil (suiveur solaire ou tracker solaire). Pour la seconde technologie, les panneaux peuvent être fixes mais s'ils sont dotés d'un système de poursuite, leur productivité peut être augmentée de 12 à plus de 30 % (selon la précision du suiveur utilisé). Les suiveurs solaires coûtent généralement chers. C'est pourquoi, 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, la conception et la réalisation d'un suiveur solaire à deux axes.

Notre travail sur le sujet a abouti à la réalisation de la partie électronique du suiveur utilisant une carte Arduino Mega2560 et deux drivers ULN2003 pour commander les deux moteurs pas à pas des axes vertical et horizontal.

Les premiers essais montrent un bon fonctionnement de notre système.

.

Mots clés : Energie solaire, système de poursuite, Microcontrôleur Arduino Mega2560, moteur pas à pas.

Abstract

Morocco imports most of its fossil fuel requirements (approximately 96%) which creates a very heavy energy bill. On the other hand, and with its geographical position, Morocco has considerable solar potential. These two kinds led the Kingdom to launch, in November 2009, an ambitious solar plan to install solar stations producing 2,000 MW of electricity by 2020. The technologies adopted are concentrating solar Power(CSP) and solar photovoltaics. The first technology, based on the concentration of direct sunlight, require necessarily sun tracking systems. In the second technology, the panels can be fixed, but their productivity can be increased from 12 to over 30% if they are provided with a tracking system. The solar trackers are usually expensive. Therefore, 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 was set to design and realize of a two axes solar tracker.

Our work has led to the realization of the electronic part of the follower using an Arduino Mega 2560 board and two ULN2003 drivers to control two stepper motors for vertical and horizontal axes.

The first tests show good functioning of our system.

Key words: Two axes Solar tracker, Arduino Mega 2560, ULN2003 drivers, Step motors

Table des matières

Résumé.....	5
Abstract.....	6
Table des matières	7
Table des figures.....	10
Liste des tableaux.....	12
Nomenclature.....	13
Laboratoire d'accueil	15
Introduction générale :	16
Chapitre I : Géométrie solaire-Trajectoire solaire	18
I. Introduction :	19
II. Le mouvement de la terre autour du soleil :.....	19
II.1. Le Soleil :.....	18
III. La sphère céleste :.....	21
III.1. Grandeurs géographiques et astronomiques :.....	21
III.1.1. Repérage d'un site à la surface terrestre :.....	22
III.1.1.1 Les coordonnées géographiques :	22
III.1.2. Détermination de la direction du soleil :.....	23
III.1.2.1. Les coordonnées équatoriales :.....	23
III.1.2.2. Les coordonnées horizontales :.....	25
III.2. Mouvement apparent du soleil :.....	26
IV. Les temps solaires :.....	30
IV.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V) :.....	30
IV.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M) :.....	30
IV.3. Équation du temps (Et) :.....	30
IV.4. Temps légal TL :.....	31
IV.5. Temps universel TU :	31
IV.6. Lever et coucher du soleil :.....	31
V. Détermination de la position du soleil par rapport à un plan incliné :.....	32
V.1. La hauteur du plan γ :.....	33
V.2. Azimut du plan α (ou angle d'orientation du plan) :.....	33

V.3. Angle d'incidence sur un plan quelconque :	33
V.4. L'inclinaison β :	34
VI. Rayonnement solaire au sol :	36
VI.1. Les types de rayonnements solaire :	36
VI.1.1. Le rayonnement direct :	36
VI.1.2. Le rayonnement diffus :	37
VI.1.3. Le rayonnement global :	37
VI.2. Gisement solaire au Maroc :	37
Conclusion :	38
Chapitre II : Conception du système de poursuite solaire	38
I. Introduction :	39
II. Convertisseurs solaires :	40
III. Système de poursuite solaire:	42
III.1. Introduction :	42
III.2. Etat de l'art des suiveurs solaires :	42
III.3. Les types de suiveurs solaires :	43
III.3.1. Suiveurs solaire passif :	44
III.3.2. Suiveur solaire actif :	45
III.3.2.1. Suiveur solaire mono-axe :	45
III.3.2.2. Suiveur solaire double axe :	46
IV. Méthodes et techniques de poursuite :	47
IV.1. Introduction :	47
IV.2. Les méthodes de poursuite :	47
IV.2.1. La méthode des capteurs de lumière :	47
IV.2.2. La méthode astronomique :	48
IV.3. Les Avantages et Les inconvénients des suiveurs solaires :	50
IV.3.1. Les avantages:	50
IV.3.2. Les inconvénients:	50
Conclusion :	50
Chapitre III : Réalisation du suiveur solaire	52
I. Introduction :	52
II. Description du système de poursuite :	53
III. Description des composants électroniques :	55
III.1. La carte Arduino Mega 2560 :	55
III.1.1. Spécifications techniques :	55

III.1.2. Alimentation :	56
III.1.3. Programmation :	57
III.1.4. Raisons du choix Arduino Mega 2560 :	58
III.2. Moteur pas à pas :	59
III.2.1. Spécification :	59
III.2.2. Fonction globale :	59
III.2.3. Commande d'un moteur pas à pas :	59
III.2.4. Le couple d'un moteur pas à pas:	60
III.3. Circuit ULN2003 :	60
IV. La simulation via PROTEUS_ISIS et la réalisation du système du suiveur du Soleil :....	61
IV.1. Etapes de développement du programme :	61
IV.2. Simulation par le logiciel PROTEUS_ISIS :	61
IV.2.1. La partie opérative :	61
IV.2.1. La partie de commande :	63
VI.3. Réalisation du système :	64
VI.3.1.Moteur pas à pas unipolaire	64
VI.3.2. Boutons poussoirs :	65
VI.3.3. Circuit de puissance (driver ULN2003)	65
VI.3.4. Afficheur LCD (16*2):	66
VI.3.5. Système global :	67
Conclusion :	69
CONCLUSION GENERALE.....	71
BIBLIOGRAPHIE &WEBOGRAPHIE.....	72
ANNEXES.....	74
ANNEXE 1 :	74
ANNEXE 2 :	75
ANNEXE 3 :	78

Table des figures

Chapitre I :

Figure I- 1 : Le mouvement de la terre autour du soleil	16
Figure I- 2 : La sphère céleste	16
Figure I- 3 : Les coordonnées géographiques	18
Figure I- 4 : Variations de la déclinaison du soleil en fonction du jour de l'année	19
Figure I- 5 : Variation de l'angle horaire en fonction du TSV	20
Figure I- 6 : Coordonnées horaires	20
Figure I- 7 : Variations de la hauteur au cours de l'année pour la ville de Fès ($\varphi=34^{\circ}\text{N}$ et $L=5^{\circ}\text{W}$)	21
Figure I- 8 : Coordonnées horizontales	22
Figure I- 9 : Courses particulières du Soleil	23
Figure I- 10 : Parcours particuliers du Soleil pour la ville de Fès	24
Figure I- 11 : Variation de l'équation du temps au cours de l'année à Fès	25
Figure I- 12 : Positionnement d'un plan incliné par rapport au soleil	27
Figure I- 13 : Variations de l'angle d'inclinaison au cours d'une journée à Fès	30
Figure I- 14 : Les composants du rayonnement solaire	31
Figure I- 15 : Carte du monde de l'enseilllement moyen annuel	32
Chapitre II :	
Figure II- 1 : Exemple de capteurs plans solaires	35
Figure II- 2 : Plan de l'utilisation de l'énergie solaire	36
Figure II- 3 : modèle d'un héliostat dans ses premières applications	38
Figure II- 4 : champ d'héliostat -centrale solaire Thémis France	38
Figure II- 5 : Types de suiveurs solaires	39
Figure II- 6 : Suiveur solaire passif	40
Figure II- 7 : Panneaux solaires avec système de poursuite mono-axiale	41
Figure II- 8 : Panneau solaire avec système de poursuite bi-axiale	41
Figure II- 9 : Suiveur basé sur des capteurs de lumière	43
Figure II- 10 : Méthode de poursuite astronomique	44
Chapitre III :	
Figure III- 1 : Schéma de commande d'un suiveur solaire	48

Figure III- 2 : Organigramme de l’algorithme de suiveur solaire	49
Figure III- 2 : La carte Arduino Mega 2560	51
Figure III- 3 : Adaptateur d’une prise jack 2.1mm(à gauche) et connecteur pour des piles (à droite)	52
Figure III- 4 : Interface logiciel Arduino (version 1.6.2)	52
Figure III- 5 : Schéma de fonctionnement de moteur pas à pas	54
Figure III- 6 : Schéma de commande d’un moteur pas à pas	54
Figure III- 7 : Structure interne de l’ULN2003	55
Figure III- 8 : Schéma de partie opérative via PROTEUS_ISIS	57
Figure III-9: Séquences des impulsions de sortie du circuit puissance à un instant donné	57
Figure III- 10 : Schéma de partie de commande via PROTEUS_ISIS	58
Figure III-12 : Deux moteurs pas à pas unipolaire (5 fils)	59
Figure III-13 : Boutons poussoirs	59
Figure III-14 : Drivers ULN 2003	60
Figure III-15 : Affichage de heure ; date ; temps solaire vrai(TSV) ; latitude de Fès (ffi) ; longitude de Fès(L)	60
Figure III-16 : Affichage de lever du soleil(L) ; coucher du soleil(C) ; azimut du capteur (a) ; inclinaison du capteur (b) ; état du moteur horizontal (MPPHoz) ; état du moteur vertical (MPPVer)	61
Figure III-17 : Système en mode jour	62
Figure III-18 : Système en mode nuit	63
ANNEXES :	
Figure A2- 1 : Schéma technique de la carte Arduino Mega 2560	68
Figure A2- 2 : Emplacement des pins sur la carte Arduino Mega 2560	69
Figure A2- 3 : Schéma de l'architecture globale d'Arduino Mega 2560	70
Figure A2- 4 : Schéma de l'architecture AVR CPU	71
Figure A3-1 : Schéma de fonctionnement de moteur pas à pas unipolaire (6fils)	72
Figure A3-2 : Circuits de moteur pas à pas unipolaire	72
Figure A3-3 : Schéma de fonctionnement de moteur pas à pas bipolaire (4fils)	73
Figure A3-4 : Circuits de moteur pas à pas bipolaire	73

Liste des tableaux

Chapitre I :

Table I- 1 : Caractéristiques principales du soleil20

ANNEXE 1 :

Table A1- 1 : calcul du numéro du jour67

Nomenclature

- a : Angle d'azimut solaire [°]
 β : Angle d'inclinaison de capteur [°]
DE : Décalage horaire [h]
Et : Équation du temps [h]
 φ : Latitude du lieu [°]
 γ : Angle d'orientation de capteur [°]
h : Angle hauteur du soleil [°]
i : Angle d'incidence [°]
I_{ph} : Photo-courant dépendant de l'éclairement [A]
I_D : Courant de diode. [A]
I₀ : Courant de saturation inverse d'une diode [V]
I : Courant fourni par la cellule [A]
I_p : Courant dérivé par la résistance parallèle [A]
I_d : Courant traversant la diode. [A]
I_{cc} : Courant de court-circuit [A]
j : Numéro du jour de l'année
K : Constante de Boltzmann (1,381X10⁻²³) [J/K]
L : Longitude du lieu [°]
 ω : Angle horaire [°]
R : Rendement de la cellule
R_s : Résistance en série. [Ω]
R_p : Résistance en parallèle [Ω]
R_{sh} : Résistance de shunt. [Ω]
T : Température effective de la cellule. [K]
 δ : Angle déclinaison solaire [°]
TL : Temps légal [h]

TSV : Temps solaire vrai [h]

TSM : Temps solaire moyen [h]

TU : Temps universelle [h]

Vco : Tension de circuit ouvert [A]

V : Tension à la borne de cellule. [V]

Laboratoire d'accueil

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

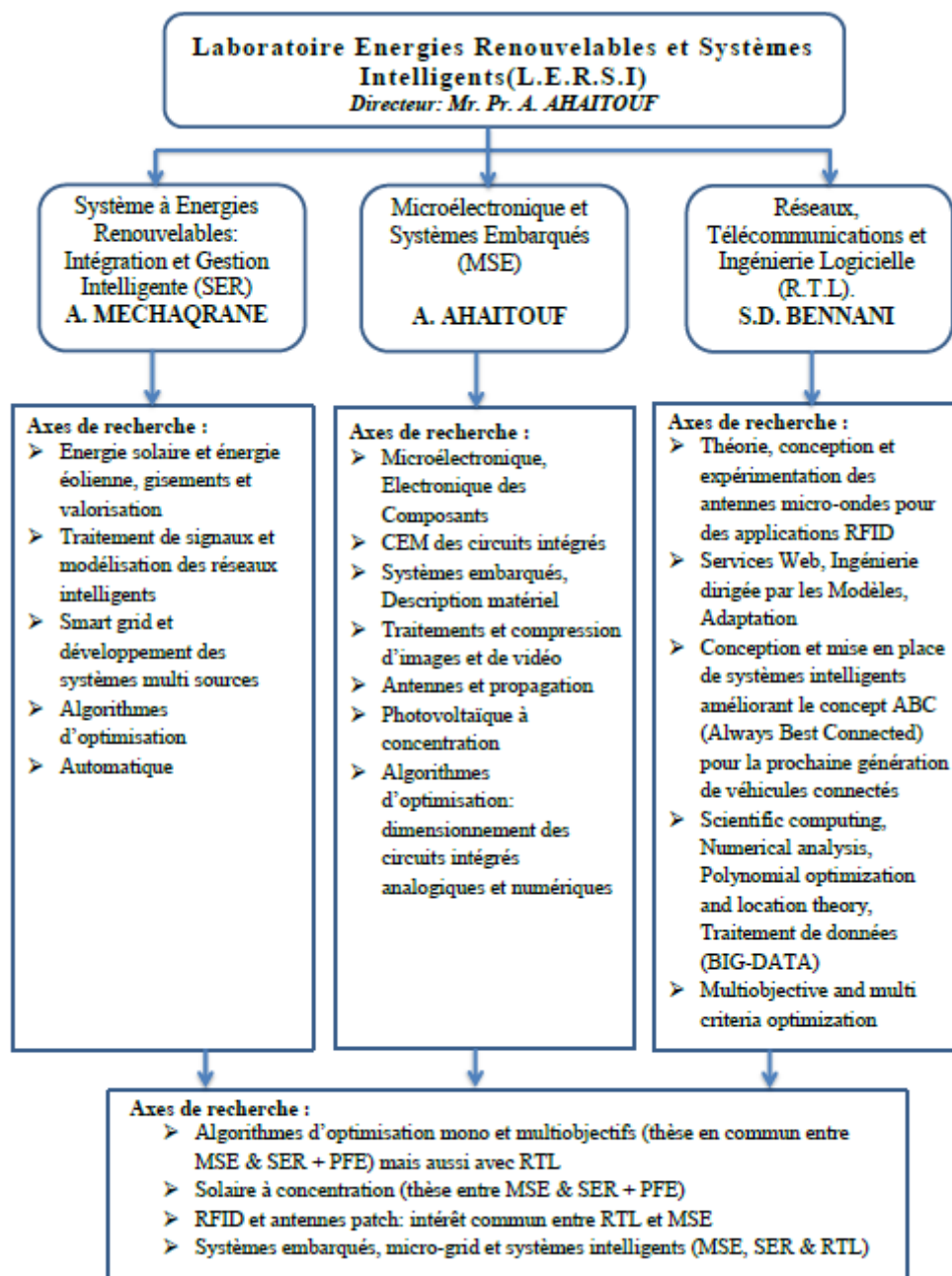


Figure 1 : Organigramme du Laboratoire Energies Renouvelables et Systèmes Intelligents(L.E.R.S.I).

J'ai effectué mon stage au sein de l'équipe Microélectronique et Systèmes Embarqués (MSE) (Pr. A. AHAITOUF) et l'équipe Système à Energies Renouvelables: Intégration et Gestion Intelligente (SER) (Pr. A. MECHAQRANE).

Introduction générale :

Les énergies renouvelables sont des énergies qui se renouvèlent assez rapidement pour être considérées comme inépuisable à l'échelle humaine du temps. Face aux prévisions d'épuisement inévitable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...), en énergie d'origine thermonucléaire (uranium, plutonium...), face aux multiples crises pétrolières, économiques, aux changements climatiques dus à l'effet de serre, la science s'est tout naturellement intéressée aux ressources dites " renouvelables " et notamment vers la plus ancienne, le Soleil, qui déverse chaque jour l'équivalent de 100 000 milliards de TEP (tonnes équivalent pétrole). Cette valeur est à comparer aux 12 717 milliards de TEP que représente la consommation annuelle mondiale en énergie primaire (2011) [1].

Au Maroc, la consommation énergétique s'est élevée à 17 millions de TEP en 2011, assurée essentiellement par les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) [1]. Or, la situation géographique du Maroc favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ses besoins à partir de l'énergie solaire. Ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées, surtout dans les applications du pompage photovoltaïque et alimentation d'électrovanne des puits de forage ... [2].

La puissance électrique produite par un capteur solaire dépend de l'intensité du flux lumineux selon la position du soleil qui varie le long de la journée.

Afin de collecter le maximum d'énergie, on utilise des dispositifs dits systèmes de poursuite solaire ou suiveur solaire ou 'tracker solaire'. Le système de poursuite solaire doit être ajusté de sorte qu'il oriente, autant que possible, le capteur perpendiculairement aux rayons solaires. Actuellement, deux types de systèmes se partagent le marché : les systèmes à un seul axe et les systèmes à deux axes. Les systèmes à un seul axe sont moins coûteux et leur commande est facile à mettre en œuvre, par contre leur efficacité est inférieure à celle des systèmes de poursuite à deux axes qui eux sont plus coûteux.

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

Notre rapport est organisé de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté en détail un aperçu sur la géométrie solaire et la trajectoire apparente du Soleil.
- Le deuxième chapitre est consacré à la conception et le fonctionnement de système poursuite solaire.
- Le troisième chapitre est consacré à la description des composants électroniques et la réalisation d'un suiveur solaire.

On termine avec une conclusion regroupant les différents aspects étudié.

Chapitre I :

Géométrie solaire-Trajectoire solaire

Dans ce chapitre nous allons présenter 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 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 permettent de maximiser la quantité d'éclairement absorbé par les panneaux photovoltaïques.

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

- Les grandeurs astronomiques.
- Les grandeurs géographiques.

II. Le mouvement de la terre autour du soleil :

II.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.

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×10^5 km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2×10^{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 [3], [4].

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 4×10^{26} W [5], [4].

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 [3], [4].

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci-dessous [6] :

Table I- 1 : Caractéristiques principales du soleil [6]

Diamètre (km)	14×10^5
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (km ²)	6.09×10^{12}
Volume (km ³)	1.41×10^{18}
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5×10^{47}

II.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 [3].

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 [3].

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].

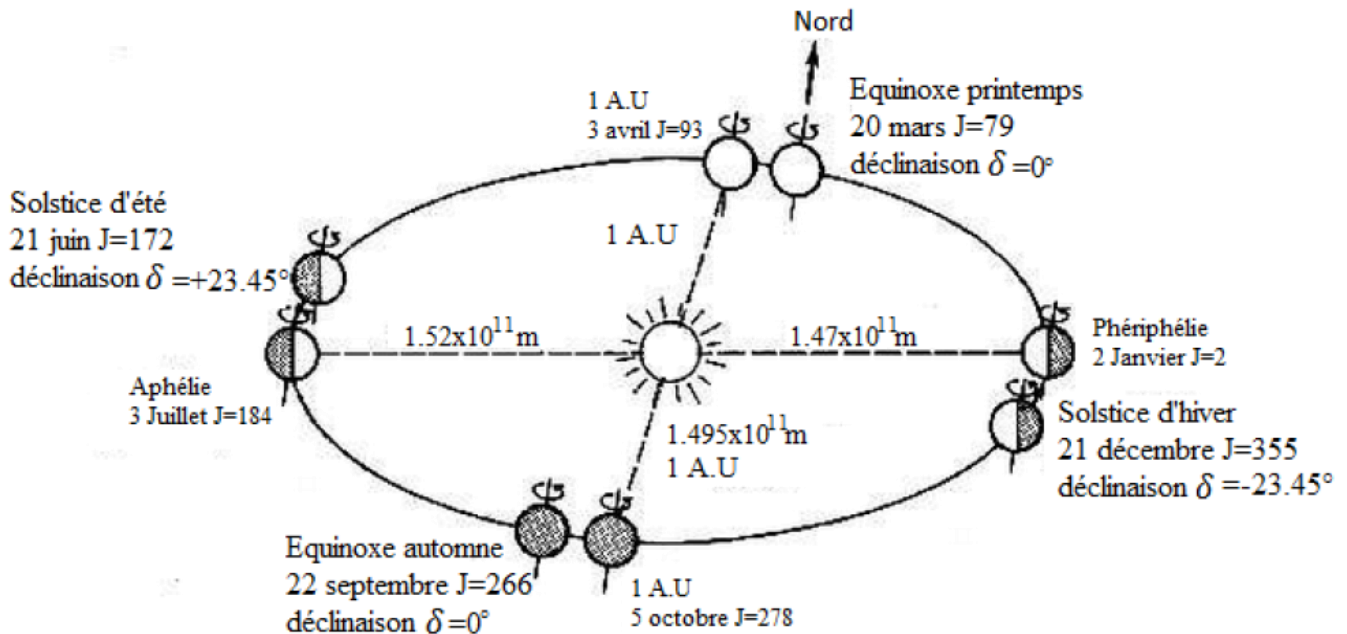


Figure I-1 : Le mouvement de la terre autour du soleil [8]

III. 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-2).

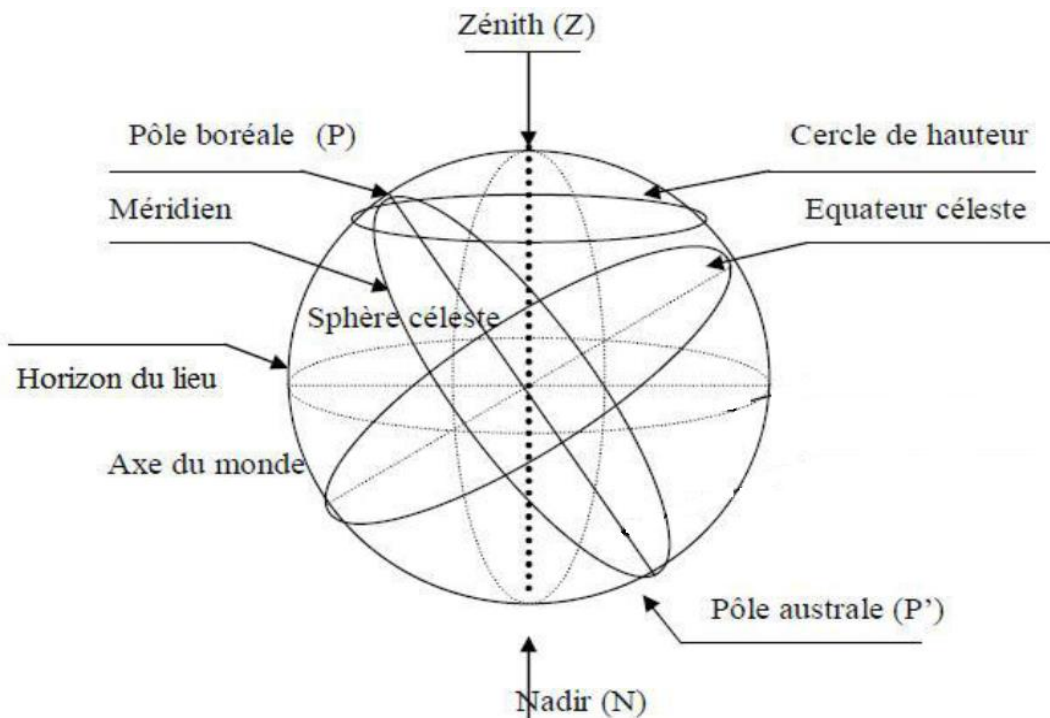


Figure I- 2 : La sphère céleste

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

III.1. Grandeurs géographiques et astronomiques :

III.1.1. Repérage d'un site à la surface terrestre :

III.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. Figure(3)

- **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° (vers l'ouest) et $+180^\circ$ (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes. [9]
- **La latitude (φ) :** 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° vers le sud [9].

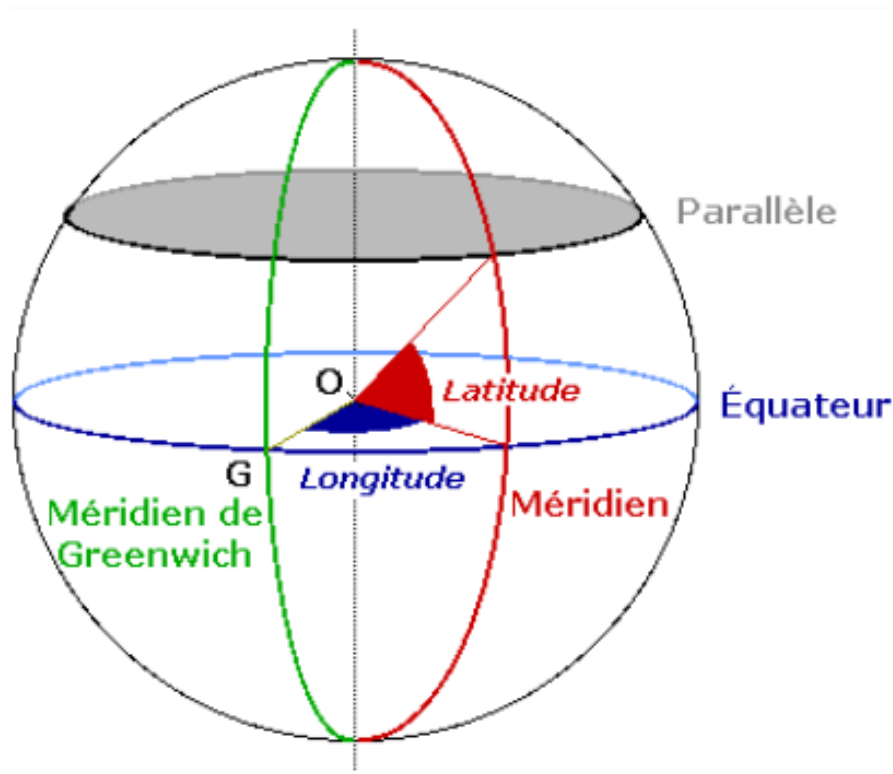


Figure I- 3 : Les coordonnées géographiques [10]

III.1.2. Détermination de 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.

III.1.2.1. 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 δ et son angle horaire ω [11].

- **La déclinaison (δ) :** 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° 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. δ est donnée par la relation suivante [12] [13] :

$$\sin \delta = \cos\left(\frac{360}{365}(j - 173)\right) \times \sin(23,45) \quad (I.1)$$

$$\delta = \arcsin\left[\cos\left(\frac{360}{365}(j - 173)\right) \times \sin(23,45)\right] \quad (I.2)$$

Cette formule donne la déclinaison en degré

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

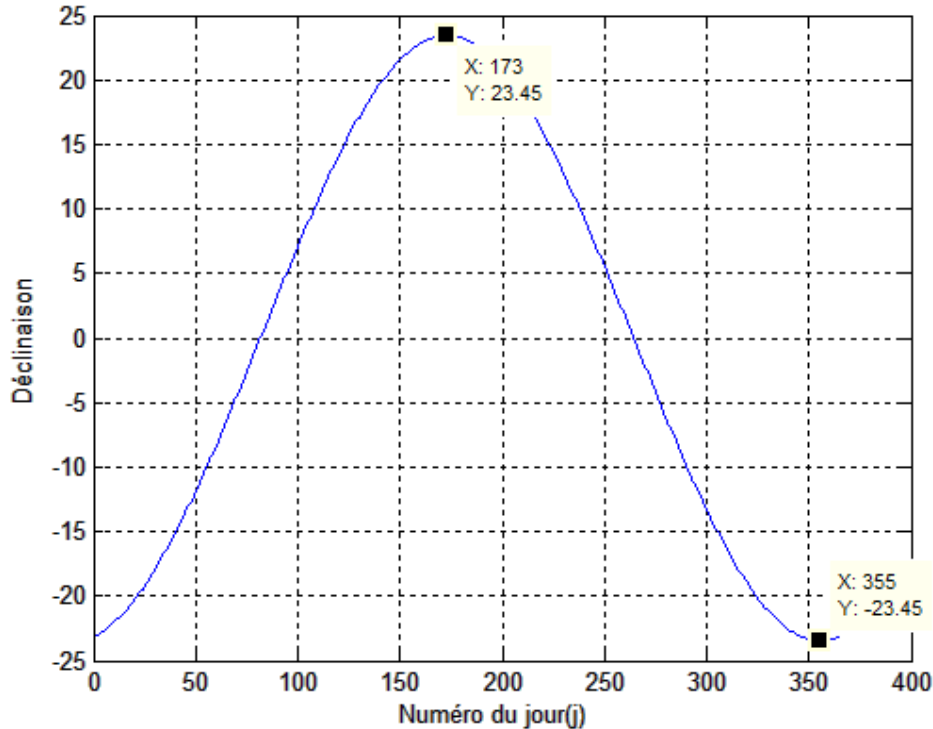


Figure I- 4 : Variations de la déclinaison du soleil en fonction du jour de l'année

- **L'angle horaire (ω)** : 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 [12]:

$$\omega = \frac{180}{12} \times (TSV - 12) = 15 \times (TSV - 12) \text{ en degrés} \quad (I.3)$$

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.

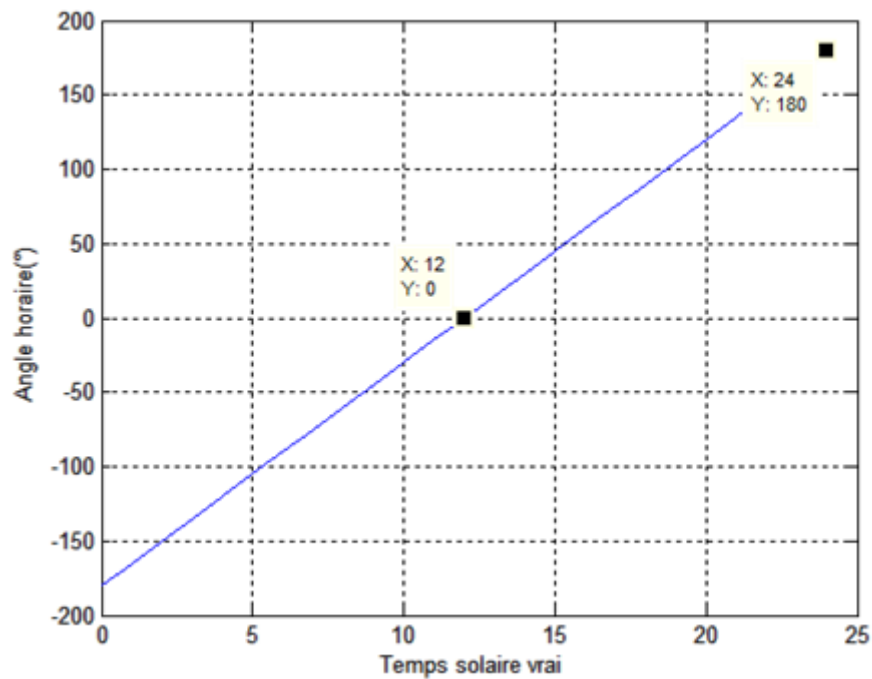


Figure I-5 : Variation de l'angle horaire en fonction du TSV

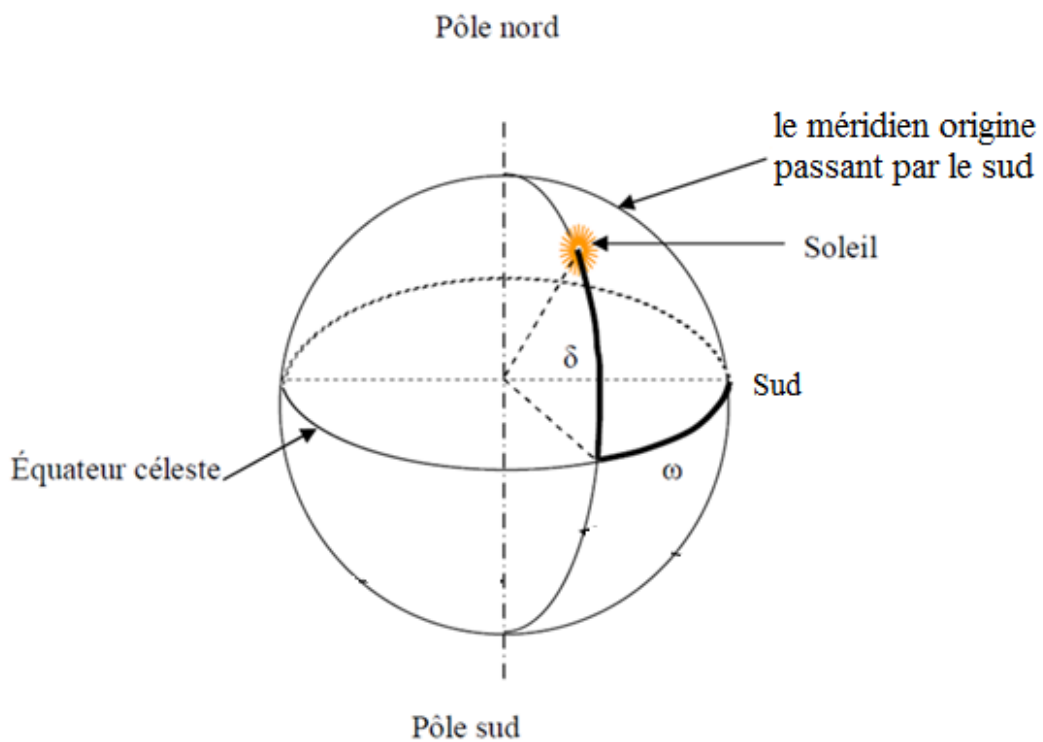


Figure I- 6 : Coordonnées horaires [12]

III.1.2.2. 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 :

- **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 [14] :

$$\text{Sin (h)} = \text{sin } (\varphi) \cdot \text{sin } (\delta) + \text{cos } (\varphi) \cdot \text{cos } (\delta) \cdot \text{cos } (\omega) \quad (\text{I.4})$$

φ : Latitude du lieu.

δ : La déclinaison du soleil.

ω : L'angle horaire.

$h > 0$ correspond au jour

$h < 0$ correspond à la nuit

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

La figure I-7 représente la variation de la hauteur au cours de l'année pour la ville de Fès à midi solaire (TSV=12).

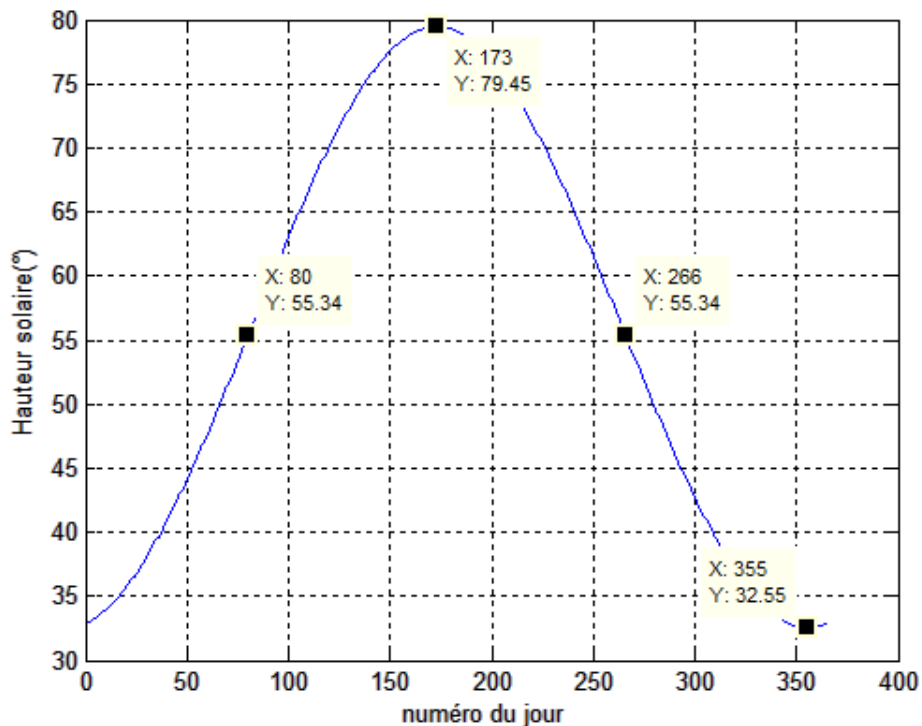


Figure I- 7 : Variations de la hauteur au cours de l'année pour la ville de Fès ($\varphi=34^\circ\text{N}$ et $L=5^\circ\text{W}$)

- **Angle de zénith θ_z en ($^\circ$)** : il est défini comme étant l'angle entre la verticale du lieu et la direction du soleil, autrement dit le complément de l'altitude solaire (h) [14] :

$$\theta_z = 90 - h(^{\circ}) \quad (I.5)$$

- **L'azimut (a)** : 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 [14] [15]:

$$A = \arccos [-(\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) - \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi)) / \cos(h)] \quad (I.6)$$

Lorsque $\sin(\omega) > 0$ $a = -A$

Lorsque $\sin(\omega) \leq 0$ $a = A$

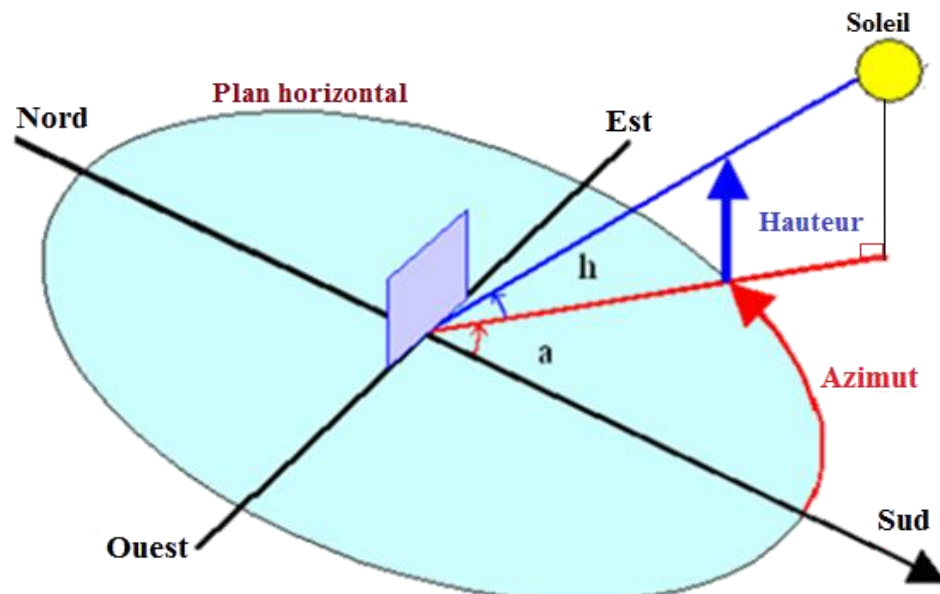


Figure I- 8 : Coordonnées horizontales [7]

III.2. 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 figure (I-9) [19].

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 [19].

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).

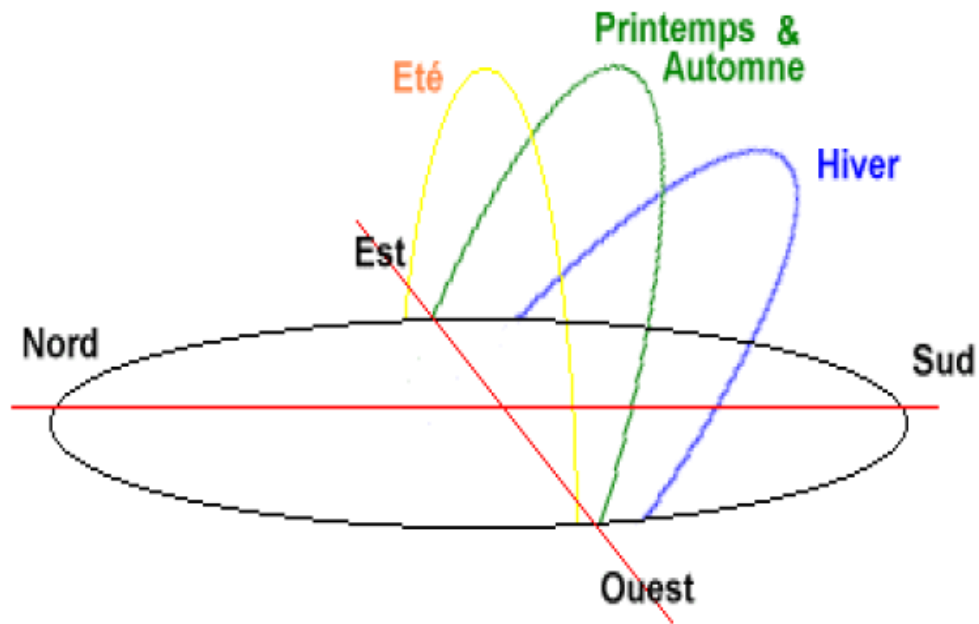


Figure I- 9 : Courses particulières du Soleil

La figure I.10 représente le mouvement du soleil au cours de la journée pour les solstices et les équinoxes pour la ville Fès (latitude 34° N, longitude 5° W).

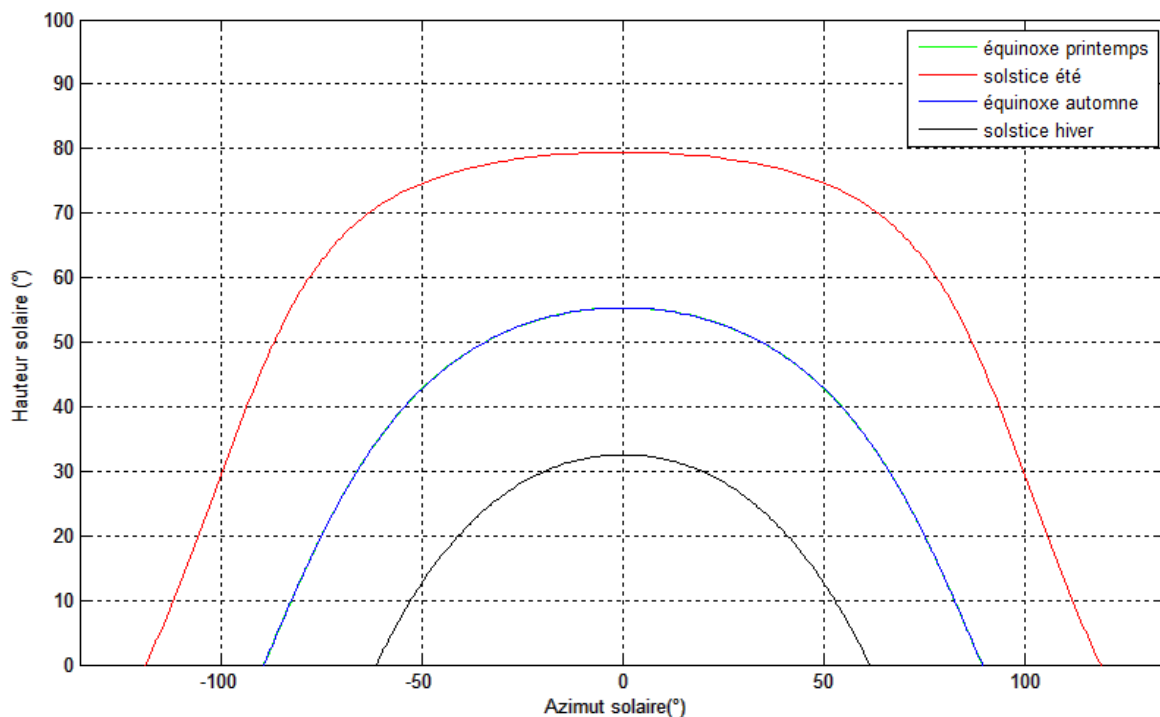


Figure I-10 : Parcours particuliers du Soleil pour la ville de Fès

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 $(360/365,25 = 0,986^\circ)$ [16]

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

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 [16]:

$$\text{TSV} = 12 + (\omega/15) \quad (\text{I.7})$$

Avec :

TSV en heure et ω 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" [10].

IV.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 [10]:

$$\text{TSM} = \text{TSV} - E_t \quad (\text{I.8})$$

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

IV.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:

$$E_t = \text{TSV} - \text{TSM} \quad (\text{I.9})$$

L'équation du temps peut être approchée par la formule suivante [17]:

$$E_t = 9.87 \sin[2N] - 7.53 \cos[N] - 1.5 \sin[N] \quad (\text{I.10})$$

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

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

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

La variation de l'équation du temps au cours de l'année est représentée par la Figure (I-11).

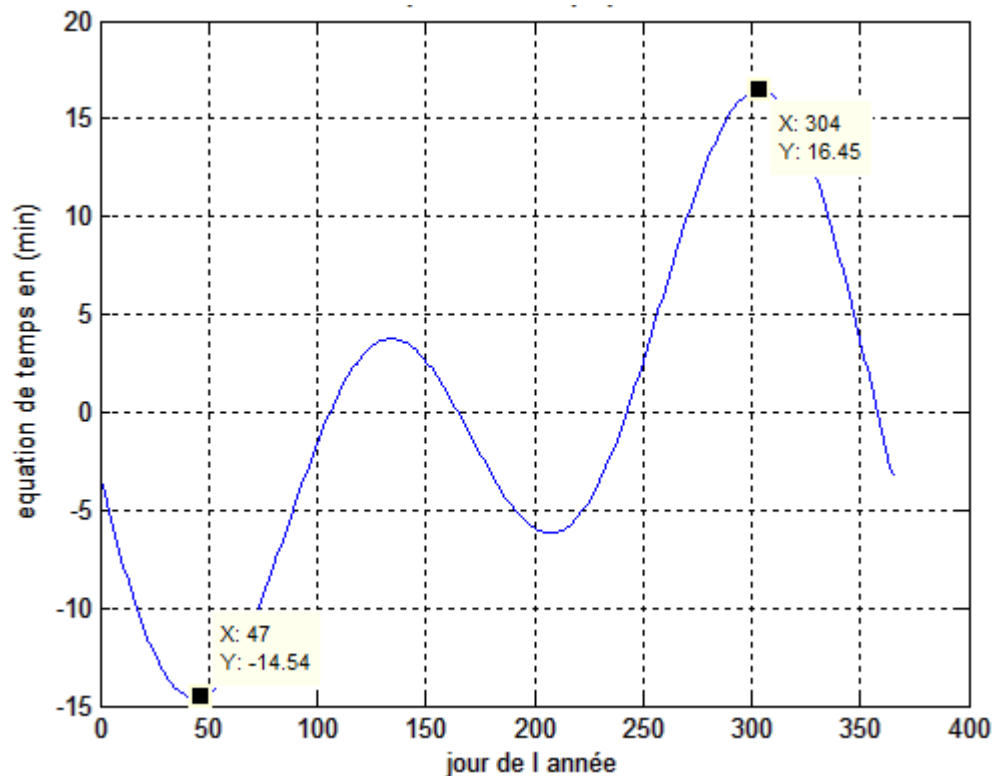


Figure I-11 : Variation de l'équation du temps au cours de l'année à Fès

IV.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° de large centré sur les méridiens dont la longitude est multiple de 15 [17]:

$$TL = TU + DE \quad (I.11)$$

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

IV.5. Temps universel TU :

C'est le temps solaire moyen du méridien fondamental (méridien de Greenwich) [17].

Pour un lieu de longitude L donnée, on a :

$$TSM = TU + (L/15) \quad (I.12)$$

Avec : L en degré

IV.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.

La durée du jour d en heures est par définition [14][15]:

$$d = (2 \times H) / 15 \quad (I.13)$$

Avec $\cos(H) = -\tan(\delta) \times \tan(\varphi)$ (I.14)

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

$$HC = (H/15) + 12 \quad (I.15)$$

Le lever du Soleil (HL) est :

$$HL = HC - d \quad (I.16)$$

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

La figure I.12 représente les paramètres de position d'un plan incliné.

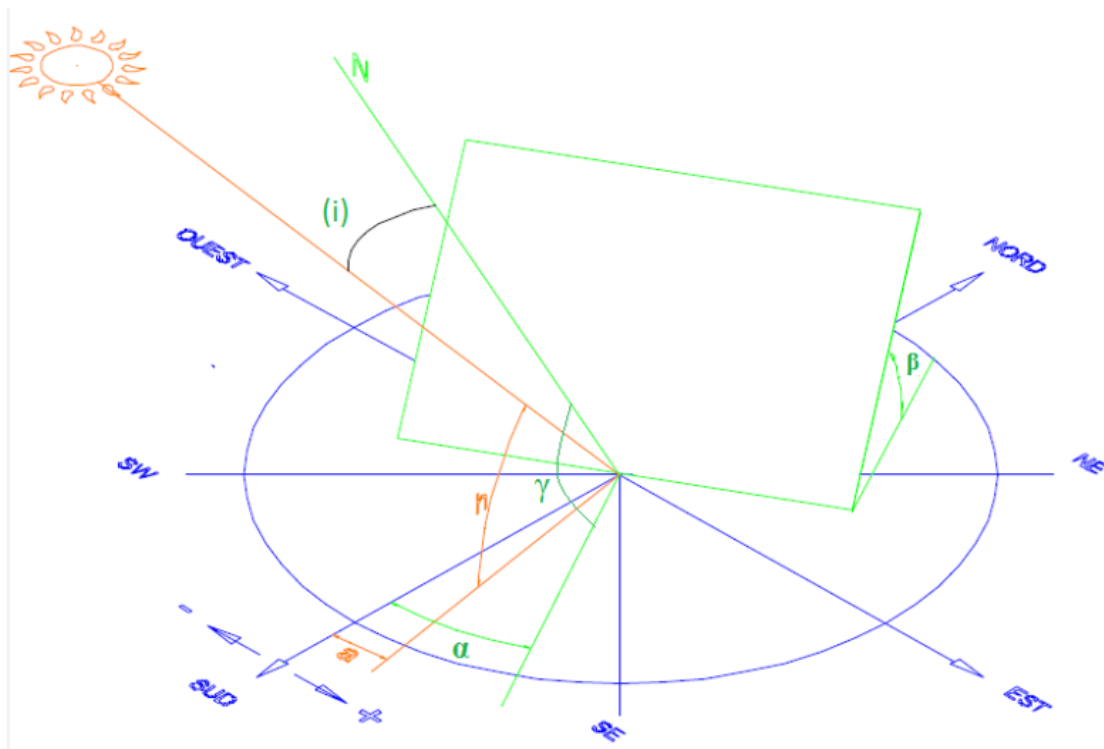


Figure I-12 : Positionnement d'un plan incliné par rapport au soleil

La position d'un plan incliné par rapport au plan horizontal est définie par deux angles (γ , α)

V.1. La hauteur du plan γ :

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

V.2. Azimut du plan α (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

V.3. 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 (figure I.12). Cet angle gouverne l'intensité du rayonnement direct interceptée par le plan. Il peut être déterminé en coordonnées horizontales ou en coordonnées horaires.

❖ **En coordonnées horizontales** : l'angle d'incidence est donné par [10]:

$$\cos i = \cos \gamma \cos h \cos (\alpha - a) + \sin \gamma \sin h \quad (I.17)$$

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

$$i = \arccos (\sin \beta \cos h \cos (\alpha - a) + \cos \beta \sin h) \quad (I.18)$$

Avec :

γ : hauteur du capteur

β : angle d'inclinaison

α : 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.

❖ **En coordonnées horaires** : l'angle d'incidence est donné par [10]:

En remplaçant dans l'équation I.17, les angles h et a par leurs expressions (équations I.4 et I.6 respectivement), on obtient la relation:

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin \alpha \sin \beta \sin \omega \cos \delta \\ & + \cos \alpha \sin \beta [\cos \omega \cos \delta \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi] \\ & + \cos \beta [\cos \omega \cos \delta \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi] \end{aligned} \quad (I.19)$$

Avec :

β : angle d'inclinaison

α : angle d'orientation du capteur

φ : Latitude du lieu.

δ : La déclinaison du soleil.

ω : L'angle horaire.

En coordonnées horaires (i) est fonction de l'angle horaire ω .

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

- **Surface horizontale: $\gamma = 90^\circ$ et $\beta = 0^\circ$:**

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

- **Surface vertical : $\gamma = 0$ et $\beta = 90^\circ$:**

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

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

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

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

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

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

- **Surface orientée vers le sud et inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontale:**

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

V.4. L'inclinaison β :

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

On peut extraire l'expression de l'inclinaison β à partir de l'équation (I.17)

Si on a angle d'incidence nulle ($i=0$) alors $\alpha = a$ en remplaçant dans l'équation (I.17) devient :

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

Or, $\beta = 90 - \gamma$

Donc l'expression de β devient :

$$\beta = 90 - h \tag{I.20}$$

Avec :

β : 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 (figure I.13).

La figure I.13 représente la variation de l'angle d'inclinaison au cours d'une journée pour la ville de Fès ($\varphi=34^\circ\text{N}$ et $L= 5^\circ\text{W}$) à équinoxe printemps 21 Mars ($j=80$)

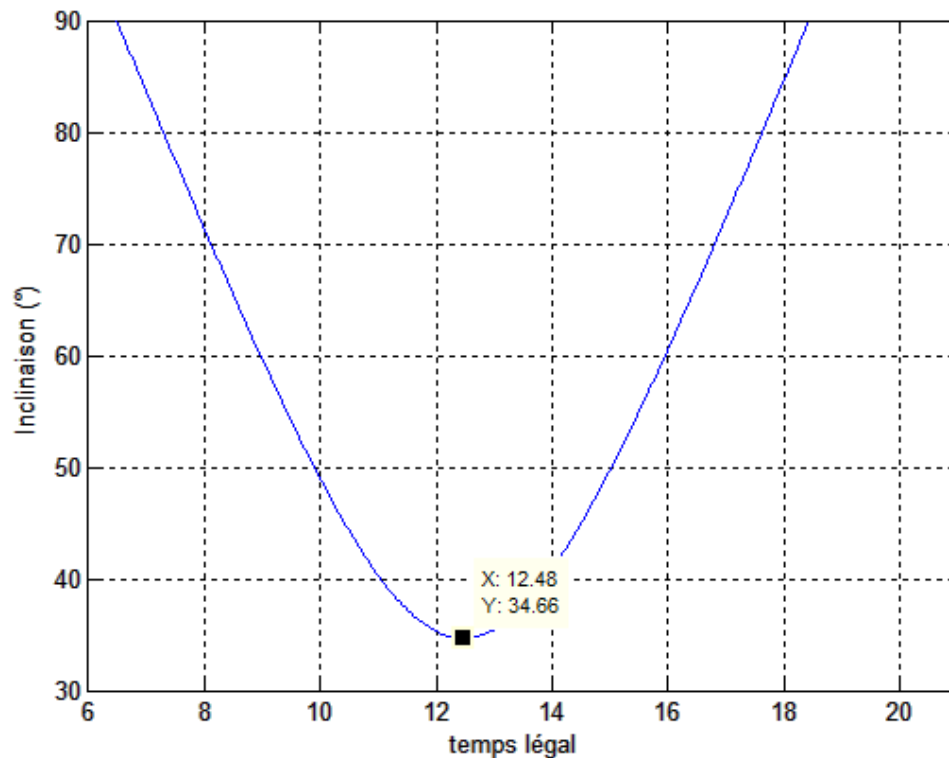


Figure I-13 : Variations de l'angle d'inclinaison au cours d'une journée à Fès

L'inclinaison est à son minimum en midi solaire (34.66°) et à son maximum en lever et coucher du soleil (90°).

VI. Rayonnement solaire au sol :

VI.1. Les types de rayonnements solaire :

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1367 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 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 (I.14) 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 [8].

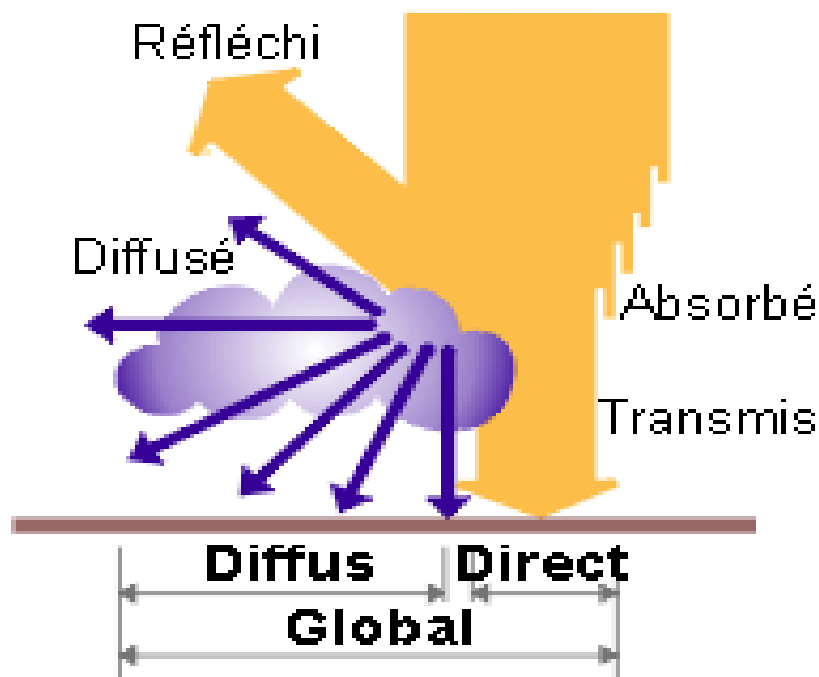


Figure I-14 : Les composants du rayonnement solaire

VI.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.

VI.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.

VI.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.

VI.2. Gisement solaire au Maroc :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée en un lieu donné. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

De par sa situation géographique, le Maroc dispose d'un gisement solaire considérable d'une capacité de 20 000 MW, avec plus de 3 000 h/an d'ensoleillement et d'un potentiel moyen 5.5 kWh/m²/jour comme le montre la figure (I-15) [1]. Vu ce potentiel important, le Maroc a lancé un programme intégré d'Energie Solaire visant l'installation d'une capacité totale de 2 000 MW, en puissance solaire connectée au réseau (centrales solaires), répartie sur 5 sites (Ouarzazate; Ain Beni Mathar ; Fom El Oud (Laâyoune) ; Boujedour ;Sebkhat Tah) à l'horizon 2020 [1].

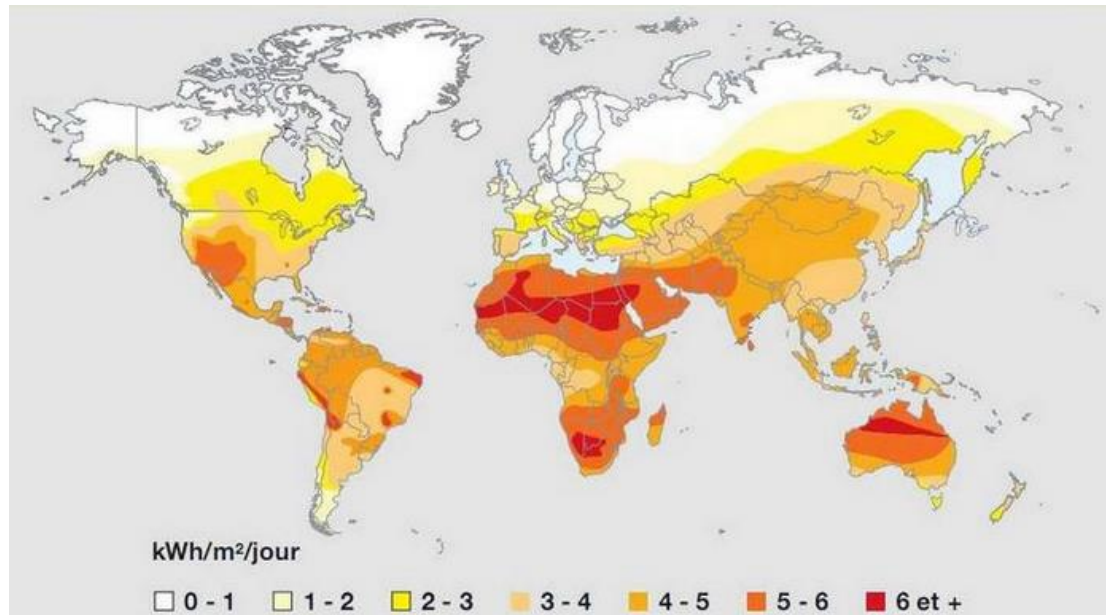


Figure I-15 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [1]

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 la conception d'un système de poursuite.

Chapitre II :

Conception du système de poursuite solaire

Dans ce chapitre, nous allons présenter les méthodes de poursuite solaire qui permettent à un capteur de suivre la trajectoire apparente du soleil et par ailleurs d'améliorer ces performances. Nous détaillerons plus la méthode basée sur le calcul des équations géométriques et astronomiques.

I. Introduction :

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables. Comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. 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.

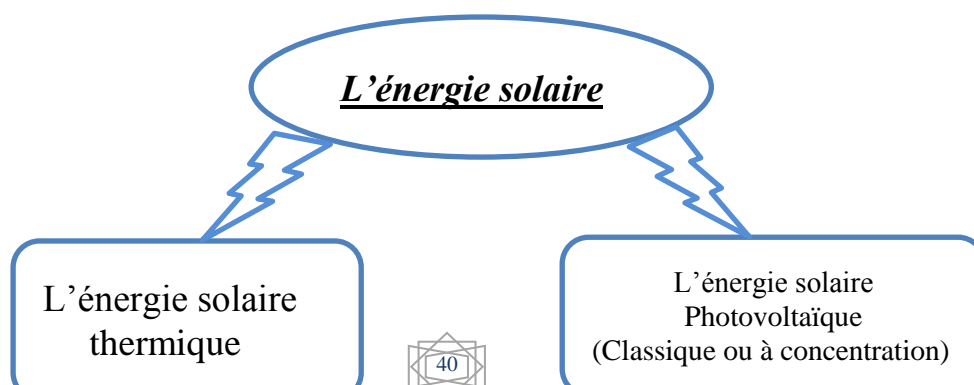
II. Convertisseurs solaires :

L'énergie solaire est utilisée par les humains sous deux formes différentes : électrique et thermique. L'énergie solaire photovoltaïque (classique ou à concentration) permet de transformer les rayons du soleil en électricité par l'utilisation des cellules solaires photovoltaïques. L'énergie solaire thermique est plutôt utilisée pour produire de la chaleur. Cette dernière peut être utilisée pour produire l'électricité (centrales solaires).



Figure II-1 : Exemple de capteurs plans solaires [20]

La figure (II-2) donne le résumé de l'utilisation d'énergie solaire.



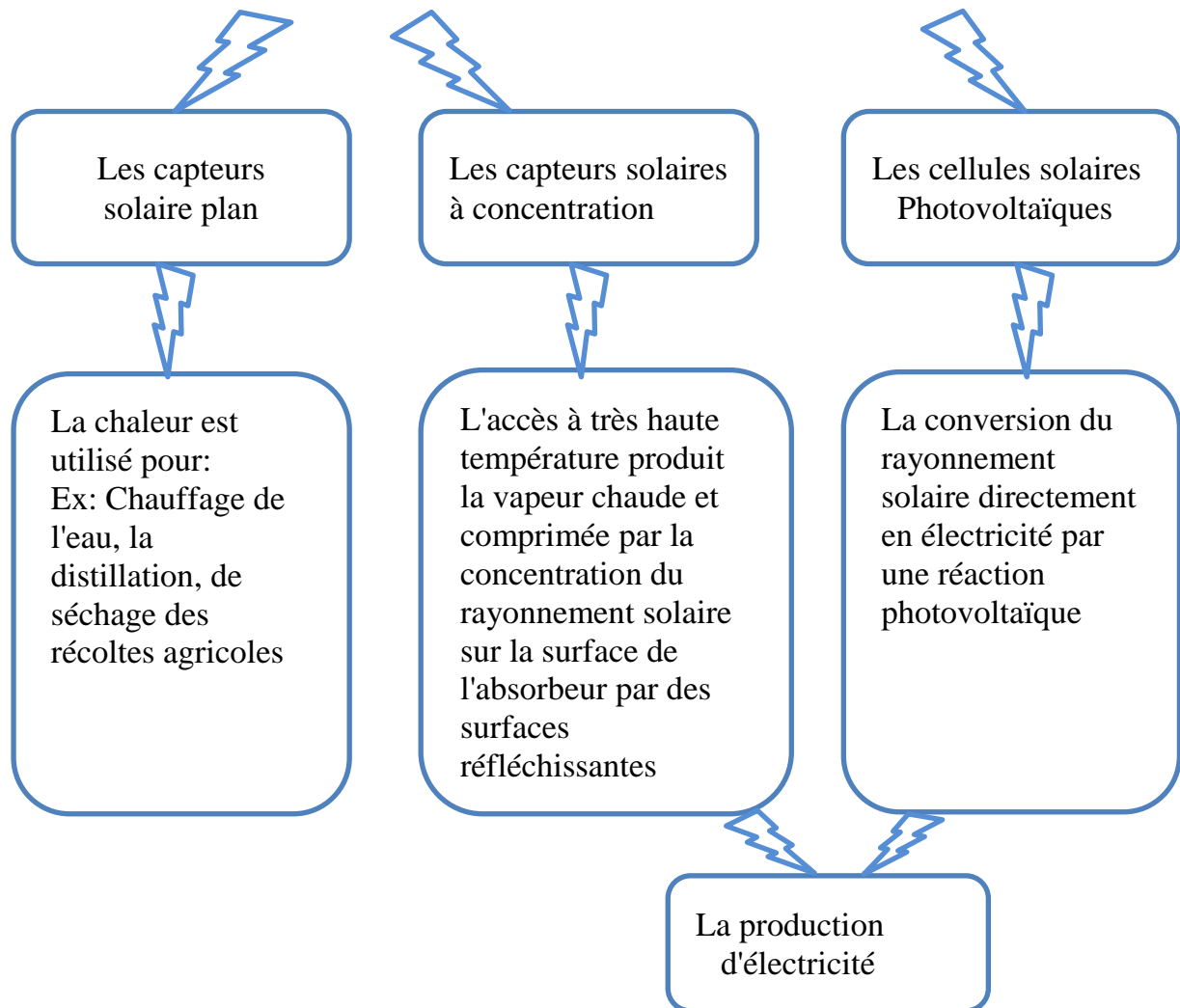


Figure II-2 : Plan de l'utilisation de l'énergie solaire

❖ **Avantage :**

- La source d'énergie solaire est une source naturelle.
- Le système est silencieux et sans danger pour les humains.
- Des formes d'aides gouvernementales peuvent aider à financer l'installation des panneaux.

❖ **Inconvénients:**

- Les prix de fabrication et d'installation des panneaux sont assez élevés.
- Il est impossible d'obtenir une autonomie énergétique complète par le biais de panneaux solaires seulement (problème de l'intermittence).
- Le rendement énergétique est plutôt faible (15% pour le classique et environ 30% pour le photovoltaïque à concentration).

Bien sûr, on peut améliorer l'apport des panneaux en les dotant d'un système de poursuite solaire.

III. Système de poursuite solaire:

III.1. Introduction :

Un tracker solaire ou suiveur solaire est un système utilisant le principe de l'héliostat. C'est une structure portante qui permet d'orienter les capteurs solaires constamment vers le soleil. Ceci permet d'en augmenter la productivité de manière substantielle.

Suivre le soleil d'une manière rigoureuse ne peut se faire que sur deux axes : en azimut (d'Est en Ouest, à mesure de l'avancée de la journée) et en inclinaison des capteurs (selon l'avancée du jour) : suiveur à deux axes. Toutefois, il existe des suiveurs à un seul axe, typiquement en azimut, l'angle d'inclinaison étant fixé selon l'optimum local.

III.2. Etat de l'art des suiveurs solaires :

Les premières applications des suiveurs solaires remontent vers les années 1750 où le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat (figure II-3). La rotation du miroir de l'héliostat est assurée par un mécanisme d'horlogerie. La plus ancienne mention du système se trouve dans des publications datant de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacob's Gravesande [27]. Un champ d'héliostats repère le mouvement du soleil en convergeant les rayons lumineux vers un même point, concentrant ainsi la lumière incidente en employant des miroirs de réflexion, tout au long de la journée. Ce principe se rencontre dans diverses installations utilisant l'énergie solaire, notamment les centrales solaires à concentration appelés champs d'héliostats. Un exemple en France est la centrale solaire Thémis qui, après avoir fonctionné de 1983 à 1986, fait l'objet d'une nouvelle expérimentation depuis 2007 [28].



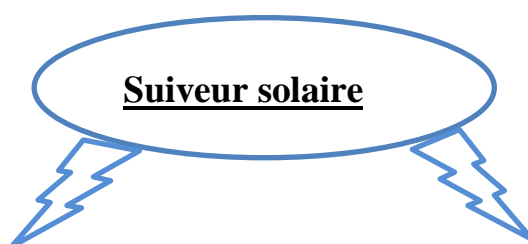
Figure II-3 : modèle d'un héliostat dans ses premières applications



Figure II-4 : champ d'héliostat -centrale solaire Thémis France [29]

III.3. Les types de suiveurs solaires :

On distingue principalement deux grandes familles de suiveurs solaires: les passifs et les actifs qui comportent les suiveurs mono-axe et double axe (Figure II-5).



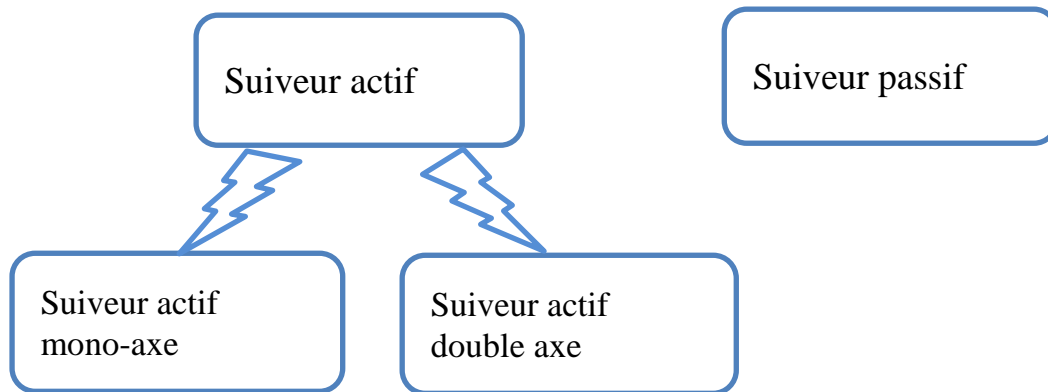


Figure II-5: Types de suiveurs solaires

III.3.1. Suiveurs solaire passif :

Un suiveur solaire passif est constitué dans son architecture de deux tubes en cuivre montés sur les côtés Est et Ouest du capteur. Le tube de matière cuivre (figure II-6) est rempli de fluides chimiques capables de se vaporiser à basse température. En effet, lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente, la température d'un côté du panneau augmente et le composé dans le tube en cuivre se vaporise [30]. La partie gazeuse du composé occupe un plus grand volume interne, et sa partie liquide est décalée vers le côté ombragé. Cette opération de transfert de masse ajuste l'équilibre du capteur en le faisant tourner vers la source des rayons solaires. Ce type de suiveur ne consomme aucune énergie pour le repositionnement du panneau.

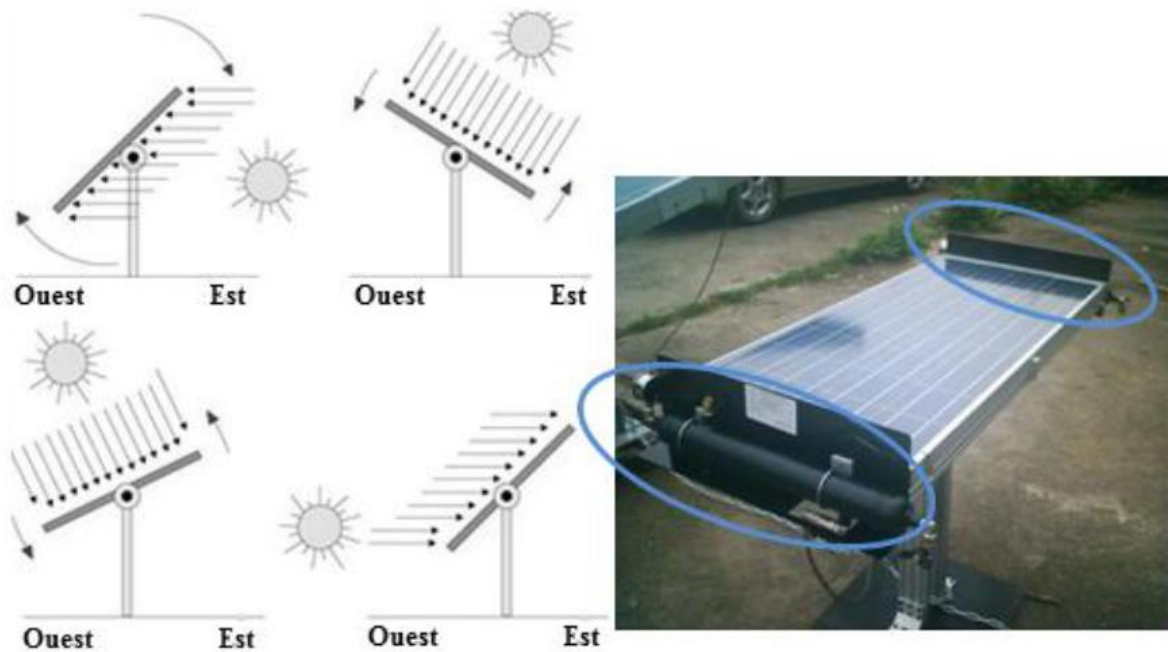


Figure II-6 : Suiveur solaire passif

III.3.2. Suiveur solaire actif :

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

III.3.2.1. Suiveur solaire mono-axe :

Comme son nom l'indique, le suiveur solaire tourne autour d'un axe simple. Le trajet 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. Il est placé selon la latitude du lieu où est disposé le capteur. Ainsi, l'angle d'inclinaison du panneau reste constant mais son azimut varie au cours de la journée. Le système de poursuite mono-axial est la solution la plus simple et la plus utilisée [31].

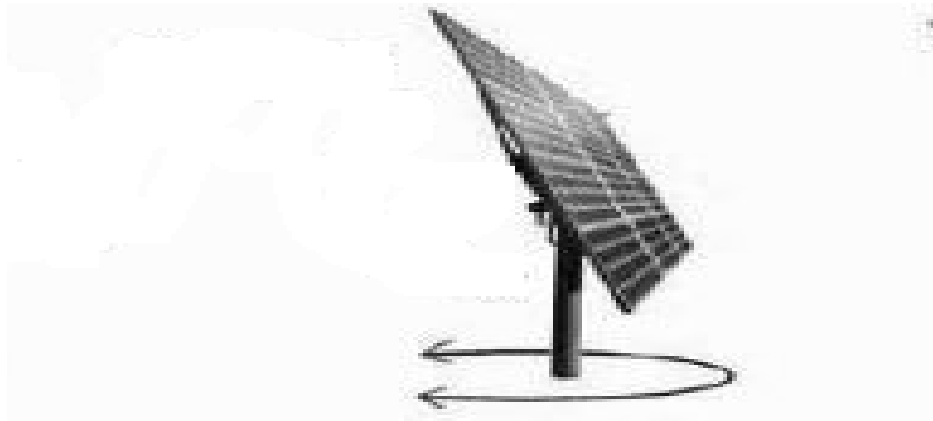


Figure II-7: Panneaux solaires avec système de poursuite mono-axiale

III.3.2.2. Suiveur solaire double axe :

Contrairement au précédent, 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.



Figure II-8 : Panneau solaire avec système de poursuite bi-axiale

IV. Méthodes et techniques de poursuite :

IV.1. Introduction :

Les suiveurs solaires sont une solution parfaite pour améliorer le rendement des capteurs solaires, mais il faut choisir le système le plus adapté. Le système mono-axial permet un gain d'environ 20%, il est moins imposant que le suiveur bi-axial, moins coûteux et permet d'installer plus de puissance sur un terrain donné. Quant au traqueur bi-axial, il permet un gain d'environ 30%, ce qui représente tout de même 10% de plus que le mono-axial [18].

IV.2. Les méthodes de poursuite :

La technologie des systèmes de poursuites actuels sont différentes d'un concepteur à un autre.

Il existe deux grandes méthodes pour assurer le suivi:

IV.2.1. La méthode des capteurs de lumière :

Cette méthode est basée sur des capteurs de lumière ou photorésistances pour déterminer la position du soleil à tout moment, permettant ainsi un suivi instantané et notamment une orientation optimale du panneau (Figure II-9).

Dans ce type de techniques, la poursuite s'effectue indépendamment de la zone dans laquelle le système sera situé.

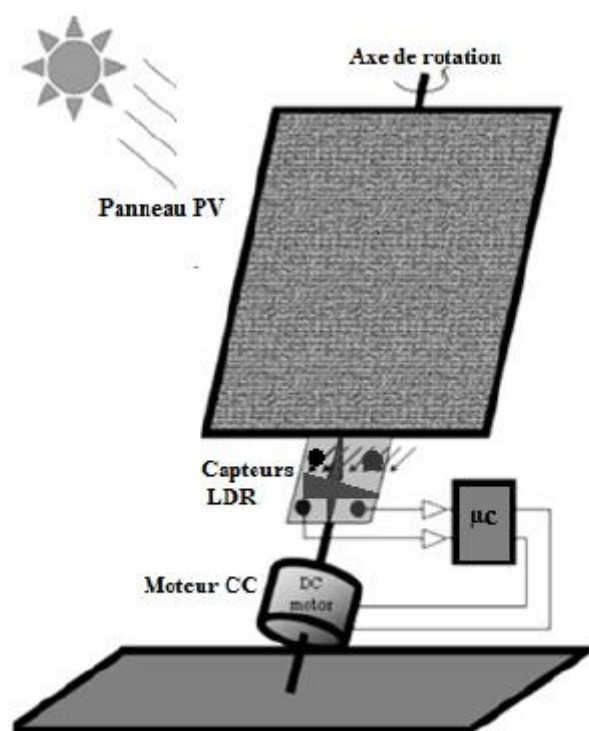


Figure II-9 : Suiveur basé sur des capteurs de lumière

IV.2.2.La méthode astronomique :

Cette méthode repose sur le 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.

C'est cette méthode qui a fait l'objet de notre PFE. La FigureII-10 donne l'organigramme de cette méthode.

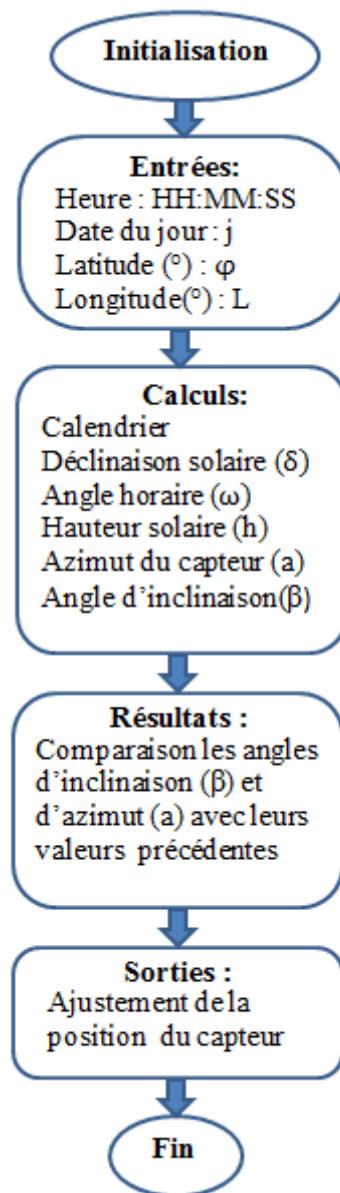


Figure II-10 : Méthode de poursuite astronomique

Les étapes de fonctionnement :

- La première étape : Il faut saisir l'heure, la date du jour, la latitude et la longitude du lieu considéré.
- La deuxième étape : On calcule d'abord le calendrier (temps solaire vrai, temps du lever et du coucher du Soleil et numéro du jour). Puis, à partir du calendrier nous calculons tous les angles géométriques : l'angle d'inclinaison du panneau par rapport au plan horizontal qui permet d'assurer le mouvement vertical du panneau et l'angle d'orientation horizontale du panneau par rapport au sud (ou l'azimut)).

- La troisième étape : le système fait la comparaison des deux derniers angles avec leurs valeurs précédentes pour ajuster la nouvelle position du moteur horizontal (angle d'azimut) et du moteur vertical (angle d'inclinaison).

IV.3. Les Avantages et Les inconvénients des suiveurs solaires :

IV.3.1. Les inconvénients:

- Le coût d'investissement initial (surtout pour les trackers à 2 axes) est élevé,
- La maintenance des trackers, car les systèmes mécaniques atteignent rarement une durée de vie de 20 ans
- Pour des raisons de sécurité, les panneaux solaires doivent être parallèles au sol lors de vents forts

IV.3.2. Les avantages:

- Les systèmes de suivi solaires sont utilisés pour orienter les capteurs continuellement vers le soleil et peuvent aider à minimiser l'investissement en augmentant le rendement des capteurs.
- Pour le photovoltaïque, le rendement des panneaux est accru de 30 à 40%
- La surface du parc solaire est réduite tout en gardant le même potentiel.
- Le temps de retour sur investissement est réduit (amortissement du système en 4 ans (en moyenne)).
- Exploitation optimale du rayonnement solaire même en présence des nuages.
- Gain intéressant, notamment aux heures de la journée les moins ensoleillées
- Simplicité de mise en œuvre.

Conclusion :

Dans cette partie, nous avons présenté les méthodes de poursuite mono-axe et double-axe qui permettent d'optimiser les performances d'un capteur solaire.

Deux méthodes se partagent le marché actuellement: suiveurs avec capteurs LDR et suiveurs à base d'équations astronomiques. C'est cette dernière méthode qui est l'objet de notre présent travail.

Chapitre III :

Réalisation du suiveur solaire

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

I. Introduction :

Dans cette partie nous présentons la procédure de réalisation de notre suiveur solaire à base d'équations astronomiques. Le dispositif électronique comprend deux moteurs pas à pas, un circuit de commande microcontrôleur Arduino (Arduino-Mega 2560), un circuit de

puissance (ULN2003) qui permet de lier le microcontrôleur Arduino aux deux moteurs pas à pas et un afficheur LCD permettant d'afficher la date, l'heure, la latitude et la longitude du lieu. Le système d'orientation est basé sur la programmation en logiciel Arduino du déplacement du panneau solaire à des intervalles de temps prédéfinis (entre le lever et le coucher du soleil) conformément à la trajectoire du soleil au cours de la journée, de manière à garder la surface active du panneau perpendiculaire aux radiations solaires (angle incidence nulle).

II. Description du système de poursuite :

Notre système de poursuite contrôle le mouvement d'un capteur solaire au moyen d'un programme informatique. Le module est orienté à l'aide de deux axes pour suivre automatiquement le soleil sur une trajectoire bien définie grâce à 'des équations astronomiques' traduite en programme sur un microcontrôleur Arduino. Notre système de commande est schématisé par la figure (III-1).

Il est constitué de deux parties: la partie commande et la partie opérative. La partie commande comporte un microcontrôleur Arduino Mega 2560. La partie opérative comporte un circuit de puissance composé de deux drivers ULN2003 qui sont liés avec deux moteurs pas à pas, l'un assure le mouvement horizontal du module par la variation de l'angle azimut et l'autre assure le mouvement vertical par la variation de l'inclinaison.

Les informations concernant la trajectoire à suivre seront traitées par le microcontrôleur Arduino Méga et envoyées sous forme d'impulsions pour être exécutées par un circuit de puissance ULN2003. Les entrées de ce dernier suivent selon une table logique les impulsions livrées par les sorties du microcontrôleur Arduino Mega lui permettant de diriger les moteurs afin de repositionner le panneau face au rayonnement solaire.

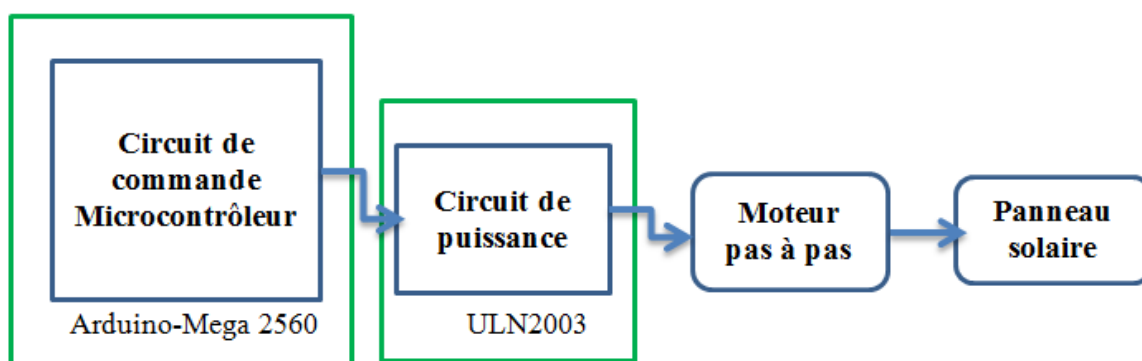


Figure III-1 : Schéma de commande d'un suiveur solaire

La figure III.2 représente l'algorithme de notre système.

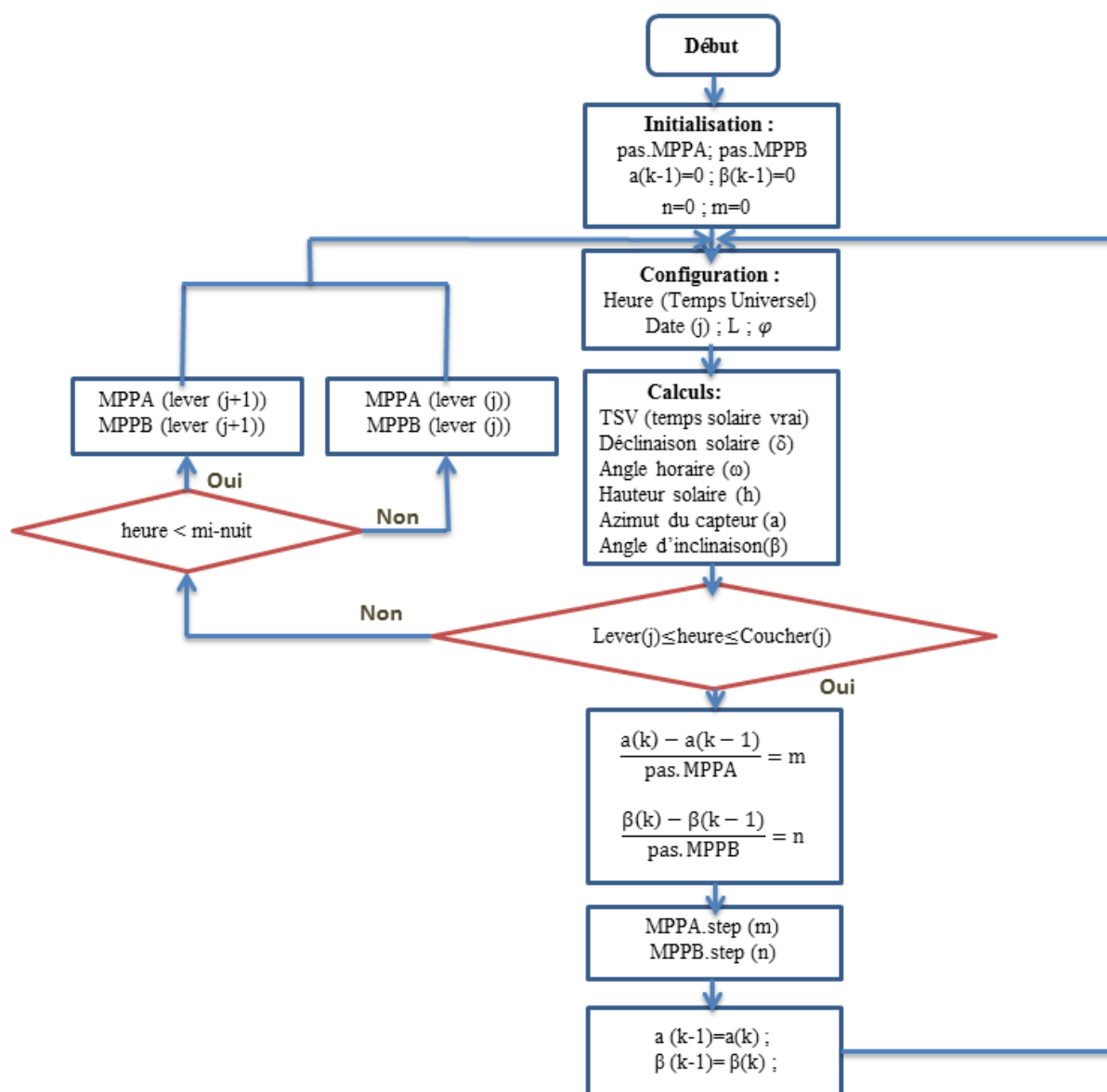


Figure III- 2 : Organigramme de l'algorithme de suiveur solaire

Où :

pas.MPPA : le pas du moteur pas à pas qui assure le mouvement horizontal (angle azimut).

Pas.MPPB : le pas du moteur pas à pas qui assure le mouvement vertical (angle d'inclinaison).

α : l'angle d'azimut du capteur.

β : l'angle d'inclinaison du capteur

L : longitude du lieu

φ : latitude du lieu

MPPA.step(m): Moteur horizontal tourne m pas.

MPPB.step(n) : Moteur vertical tourne n pas.

III. Description des composants électroniques :

III.1. La carte Arduino Mega 2560 :

III.1.1. Spécifications techniques :

La carte Arduino Mega 2560 est une carte à microcontrôleur basée sur un ATmega2560, elle dispose [33]:

- 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").
- d'un bouton de réinitialisation (reset).
- de mémoire programme FLASH (de 256 KB dont 8KB sont utilisés par le bootloader.
- De mémoire SRAM (mémoire volatile) de 8KB.
- De mémoire EEPROM (mémoire non volatile) de 4KB.

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur. Pour pouvoir l'utiliser, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB [ANNEXE 2].

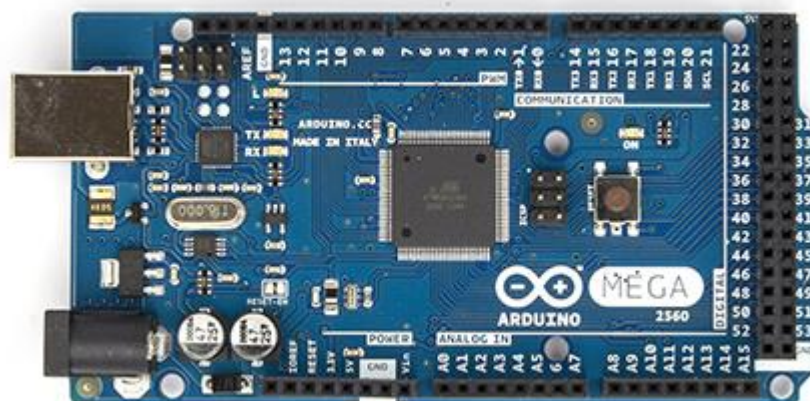


Figure III- 3 : La carte Arduino Mega 2560

III.1.2. Alimentation :

La tension de fonctionnement de la carte Arduino Mega 2560 est de 5V et son courant maximal disponible par broche entrée/sortie est de 40 mA. Elle peut être alimentée soit via la connexion USB (qui fournit 5V jusqu'à 500mA) soit à l'aide d'une alimentation externe. La source d'alimentation est sélectionnée automatiquement par la carte.

L'alimentation externe (non-USB) peut être soit un adaptateur secteur (pouvant fournir typiquement de 3V à 12V sous 500mA) ou des piles (9V). L'adaptateur secteur peut être connecté en branchant une prise jack 2.1mm positif au centre dans le connecteur jack de la carte.

Les fils en provenance d'un bloc de piles ou d'accus peuvent être insérés dans les connecteurs des broches de la carte appelées Gnd (masse ou 0V) et Vin (Tension positive en entrée) du connecteur d'alimentation.

La carte peut fonctionner avec une alimentation externe de 6 à 20 volts. Cependant, si la carte est alimentée avec moins de 7V, la broche 5V pourrait fournir moins de 5V et la carte pourrait être instable. Si on utilise plus de 12V, le régulateur de tension de la carte pourrait chauffer et endommager la carte. Aussi, la plage idéale recommandée pour alimenter la carte est entre 7V et 12V.



Figure III- 4 : Adaptateur d'une prise jack 2.1mm(à gauche) et connecteur pour des piles (à droite)

III.1.3. Programmation :

La carte Arduino Mega2560 est une carte programmable, elle peut être programmée avec le logiciel Arduino. Il suffit de sélectionner "Arduino Mega" dans le menu Outils > type de carte.

La figure III.5 représente l'interface du logiciel Arduino.

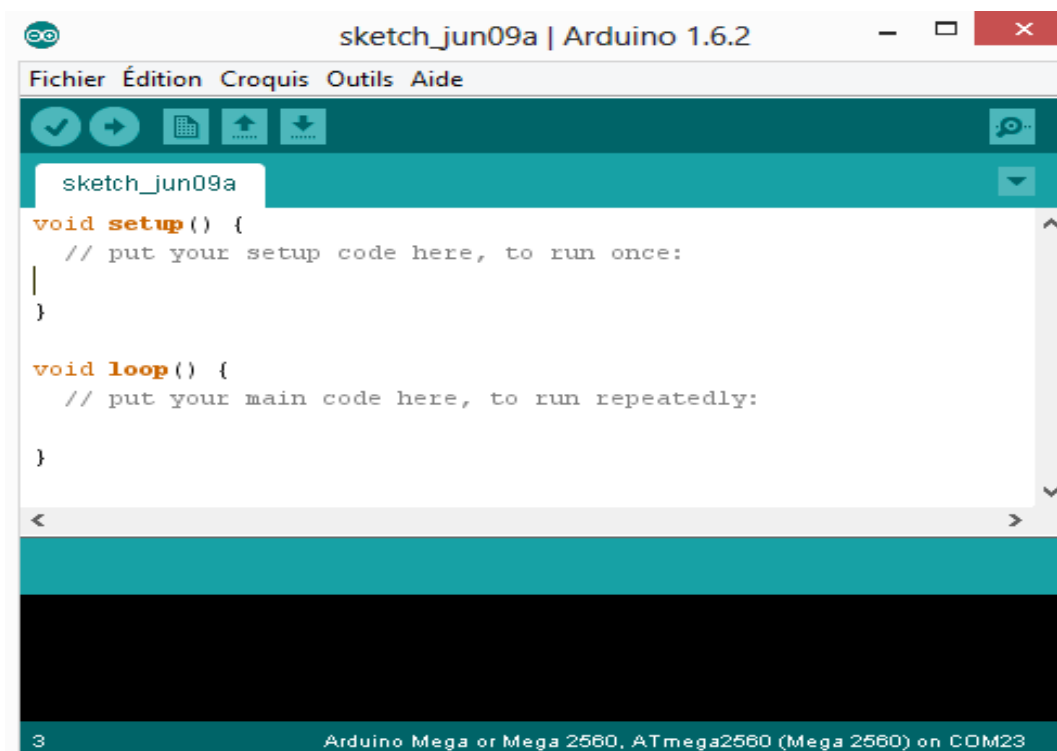


Figure III- 5 : Interface logiciel Arduino (version 1.6.2)

III.1.4. Raisons du choix Arduino Mega 2560 :

Dans notre projet, nous avons utilisé la carte Arduino Mega 2560 pour les raisons suivantes :

- Elle offre décidément une capacité de mémoire et un nombre de broches numériques d'entrée/sortie impressionnants, à même de couvrir tous les besoins envisageables pour un développement complexe.
- 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.
- La carte Mega2560 a été conçue pour être compatible avec la plupart des circuits imprimés des modules prévus pour les cartes Uno, Diecimila ou Duemilanove.
- Un environnement de programmation clair et simple : l'environnement de programmation Arduino est facile.
- Elle capable de supporter des programmes complexes qui contiennent les fonctions trigonométriques (cos, sin, arc cos, arc sin...), par contre la carte Arduino Uno ne peut pas de supporter ces fonctions complexes.

III.2. Moteur pas à pas :

III.2.1. Spécification :

Un moteur pas à pas est un moteur dont la partie mobile se déplace d'une quantité élémentaire appelée PAS chaque fois que le moteur reçoit une impulsion de courant convenable. Un moteur pas à pas est utilisé pour les positionnements angulaires précis (imprimantes, scanners, disques durs ...). Contrairement aux moteurs à courant continu, il ne nécessite pas de boucle d'asservissement et sont plus simples à commander. Il existe deux types de moteur pas à pas : moteur pas à pas unipolaire qui contient cinq ou six fils et moteur pas à pas bipolaire qui contient de quatre fils.

Dans tous les types de moteur, on positionne le rotor en modifiant la direction d'un champ magnétique créé par les bobinages du stator. Ils nécessitent un circuit de commande qui comporte une partie logique et une commande de puissance. La partie logique détermine pour chaque pas quelles sont les bobines alimentées et le sens de rotation. La fréquence de l'horloge du circuit logique détermine la vitesse de rotation.

III.2.2. Fonction globale :

La figure III.6 représente le schéma de fonctionnement de moteur pas à pas.



Figure III- 6 : Schéma de fonctionnement de moteur pas à pas

III.2.3. Commande d'un moteur pas à pas :

La figure III.7 représente le schéma de commande d'un moteur pas à pas.

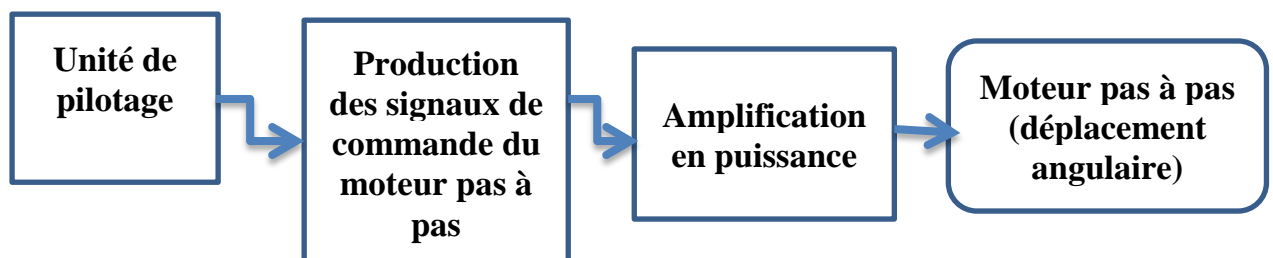


Figure III- 7 : Schéma de commande d'un moteur pas à pas

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 des moteurs pas à pas. Ces signaux dépendent du choix du mode de fonctionnement du moteur.

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. Cette fonction dépend des caractéristiques du 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.

III.2.4. Le couple d'un moteur pas à pas:

Le couple d'un moteur pas à pas est proportionnel à l'intensité du champ magnétique généré par les enroulements du stator. Il peut être augmentée en ajoutant plus de tours dans la bobine ou d'augmenter le courant dans chaque phase [ANNEXE3].

III.3. Circuit ULN2003 :

L'ULN est un composant qui a pour rôle de commander les relais thermiques. Il comporte deux transistors, deux diodes et deux résistances.

L'ULN est capable d'écouler un courant max de 500mA par transistor et supporte une tension max de 50V. Ainsi on peut connecter directement la majorité des relais sans problème.

L'ULN2003 regroupe sur un même circuit intégré 7 transistors, ce qui permet d'alimenter un moteur avec un courant beaucoup plus intense que ce que peut tolérer un microcontrôleur comme l'Arduino [34].

L'ULN2003 fonctionne très bien pour des moteurs pas à pas unipolaires (ceux qui sont munis de 5 ou 6 fils), mais il n'est pas du tout conçu pour piloter des moteurs pas à pas bipolaires (ceux qui ne comportent que 4 fils). Pour un moteur bipolaire, il faudra utiliser un autre circuit intégré, comme par exemple le L293D ou le L297.

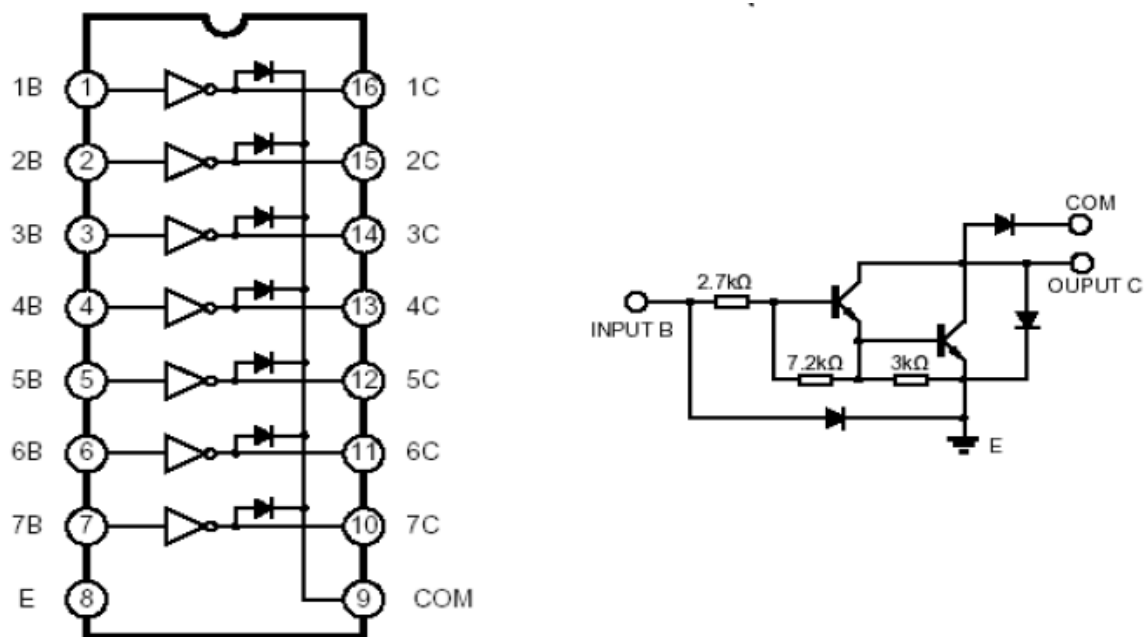


Figure III- 8 : Structure interne de l'ULN2003

IV. La simulation via PROTEUS_ISIS et la réalisation du système du suiveur du Soleil :

IV.1. Etapes de développement du programme :

➤ Etape 1 :

- Activation du logiciel Arduino 1.6.2,
- Programmation de notre système suiveur,
- Compilation de notre programme. Dans notre cas nous avons utilisé le logiciel de compilation « Arduino ATmega2560».

➤ Etape 2 : Après l'obtention d'un programme compilé, le besoin de simuler son bon déroulement devient une nécessité puisqu'il nous permet d'avoir une idée claire sur le côté matériel. De plus, nous pouvons visualiser le comportement de l'Arduino Mega 2560 avec ses périphériques. Dans notre cas nous avons opté pour le logiciel « Proteus_ISIS» qui nous permettra de charger facilement le programme compilé dans l'Arduino.

IV.2. Simulation par le logiciel PROTEUS_ISIS :

IV.2.1. La partie opérative :

Cette partie comporte deux ULN2003 qui permettent d'alimenter les moteurs pas à pas unipolaires avec un courant beaucoup plus intense que ce que peut tolérer un Arduino. Les deux circuits ULN2003 exécutent les informations envoyées par le microcontrôleur Arduino Mega sous forme d'impulsions (haut & bas)

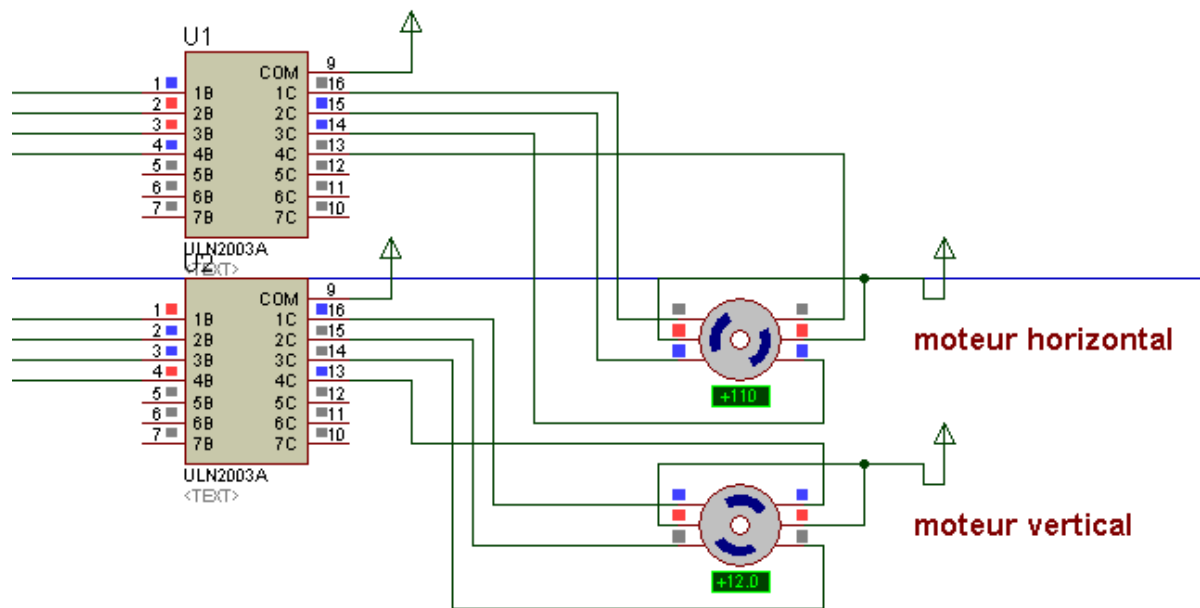


Figure III- 9 : Schéma de partie opérative via PROTEUS_ISIS

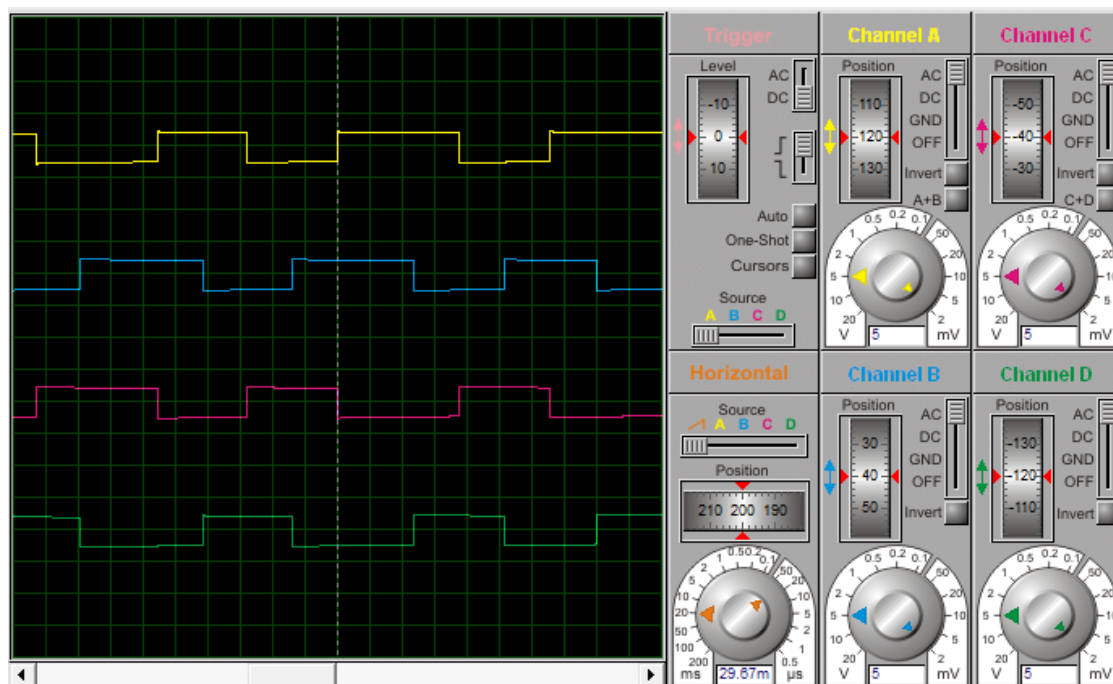


Figure III- 10 : Séquences des impulsions de sortie du circuit puissance à un instant donné

IV.2.1. La partie de commande :

La partie commande comporte un Arduino Mega programmée par logiciel Arduino1.6.2. Grâce de cette dernière, nous contrôlons les deux moteurs pas à pas unipolaires utilisés. Le système démarre en suivant la position du Soleil et suit sa position durant toute la journée. Au coucher du Soleil, les moteurs retournent automatiquement en position du lever du jour suivant.

L'heure, la date, la latitude et longitude de lieu peuvent être modifiés manuellement à l'aide de boutons poussoir intégrés dans notre système.

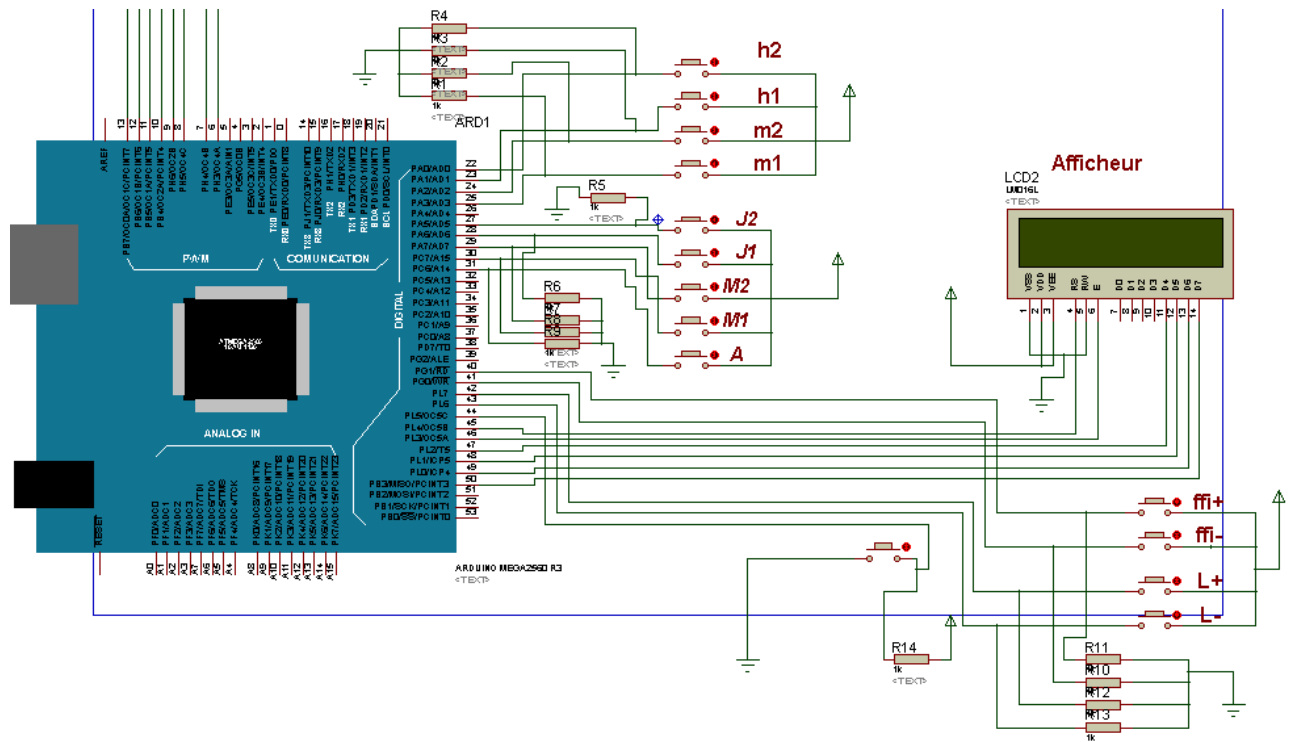


Figure III- 11 : Schéma de partie de commande via PROTEUS_ISIS

VI.3. Réalisation du système :

VI.3.1. Moteur pas à pas unipolaire

Dans notre projet, on a utilisé les deux moteurs pas à pas unipolaire (7.5° par pas; 12V; 0.5A)

La figure (III.12) représente les deux moteurs, l'un assure le mouvement horizontal et l'autre le mouvement vertical.



Figure III-12 : Deux moteurs pas à pas unipolaire (5 fils)

VI.3.2. Boutons poussoirs :

On a utilisé les boutons poussoirs pour modifier et régler manuellement la date, l'heure, la latitude et la longitude.

La figure (III.13) représente le branchement des boutons poussoirs en maquette d'essai de notre système.

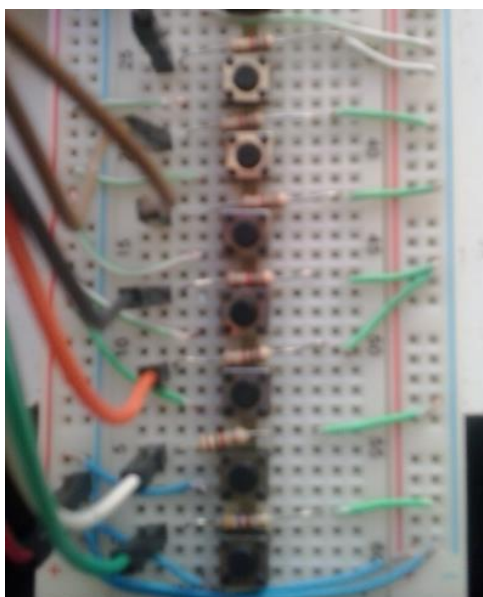


Figure III-13 : Boutons poussoirs

VI.3.3. Circuit de puissance (driver ULN2003)

On a utilisé deux drivers ULN2003 qui permettent de relier les moteurs avec la carte Arduino Mega 2560

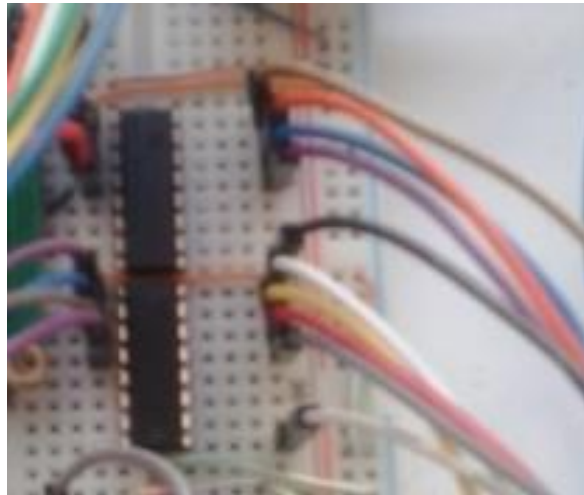


Figure III-14: Drivers ULN 2003

VI.3.4. Afficheur LCD (16*2):

On a intégré un afficheur LCD dans notre système, qui permet d'afficher tous les paramètres nécessaire (heure ; date; temps solaire vrai(TSV) ; latitude ; longitude ; lever et coucher du soleil ; azimut et inclinaison et l'état des moteurs).

Les figures (III.15) et (III.16) représentent l'affichage des paramètres sur LCD dans un instant de fonctionnement (23 /06/2015 et à heure 10 :02:06s)



Figure III-15 : Affichage de heure ; date ; temps solaire vrai(TSV) ; latitude de Fès (ffi) ; longitude de Fès(L)



Figure III-16 : Affichage du lever du soleil(L) ; coucher du soleil(C) ; azimut du capteur (a) ; inclinaison du capteur (b) ; état du moteur horizontal (MPPHoz) ; état du moteur vertical (MPPVer)

VI.3.5. Système global :

Dans notre système on a ajouté deux diodes électroluminescentes (LED) comme un indicateur de mode nuit (led rouge allumée et vert éteinte) et mode jour (led vert allumée et rouge éteinte).

La figure (III.17) représente notre système en mode jour (les moteurs fonctionnent dans leur cas normal).

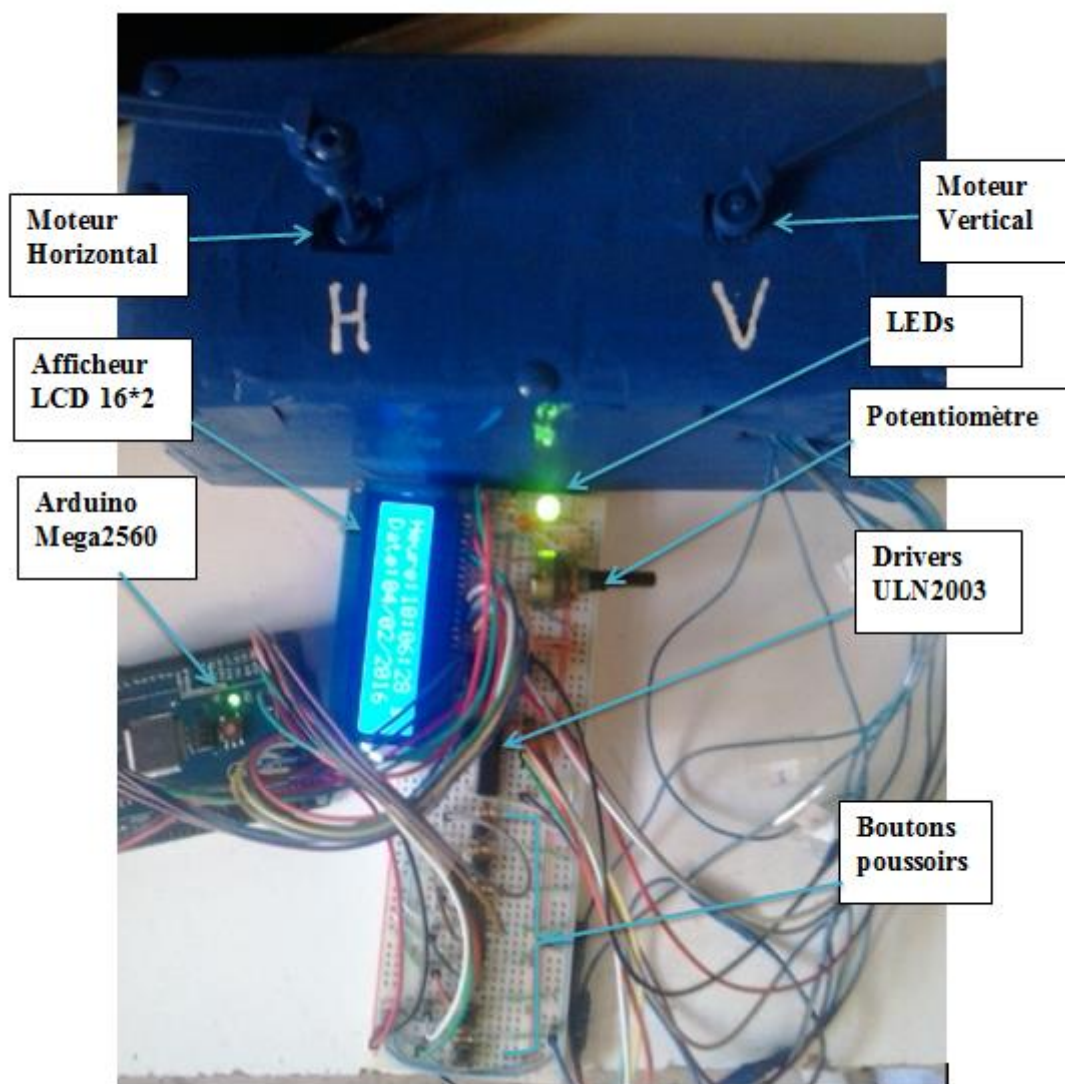


Figure III.17 : Système en mode jour

La figure (III.18) représente notre système en mode nuit (les moteurs sont arrêtés).

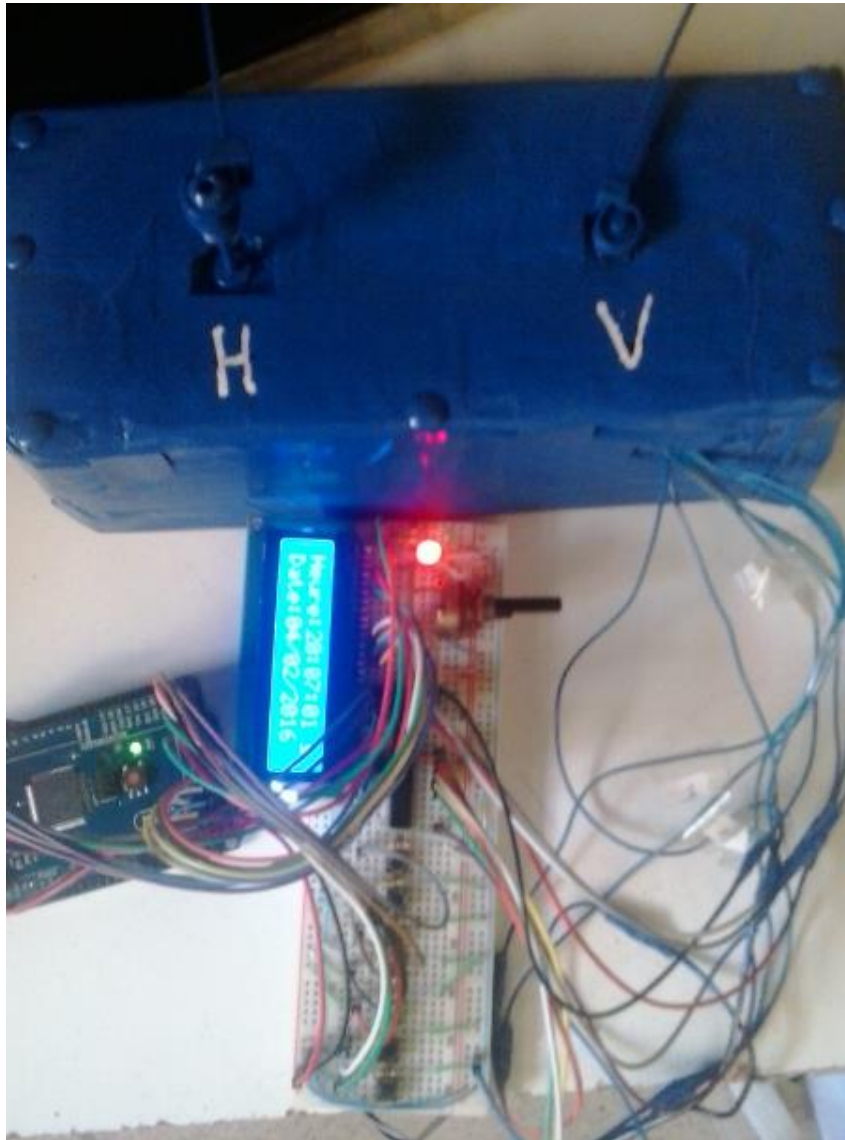


Figure III.18 : Système en mode nuit

Le système fonctionne correctement, dès le lever du soleil, les moteurs commencent la poursuite du soleil et quand l'heure du coucher est atteinte, les deux moteurs se remettent dans la position du lever du soleil du jour suivant.

Conclusion :

Dans cette partie nous avons présenté 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 Mega dans laquelle on a intégré notre programme de calcul des angles qu'un capteur doit avoir pour s'orienter perpendiculairement aux rayons solaires. La commande des moteurs pas à pas

utilisés est réalisée via deux drivers ULN2003 qui permettent d'alimenter les moteurs avec un courant beaucoup plus intense que ce que peut tolérer la carte Arduino Mega.

Nous avons intégré dans notre système, des boutons poussoirs pour régler la date, l'heure et les coordonnées géographiques du site d'installation.

Nous avons fait plusieurs essais et avons constaté le bon fonctionnement de notre système.

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 deux axes à base d'équations astronomiques. Un système de poursuite solaire permet d'orienter un capteur constamment vers le soleil et est indispensable pour les systèmes à concentration et améliore d'une manière significative les performances des capteurs plans.

Le système réalisé est basé sur un programme Arduino bien développé qui transmet des impulsions à travers deux circuits de puissance vers les deux moteurs pas à pas qui assurent le suivi de la trajectoire apparente du soleil pendant le jour. Une fois l'heure du coucher du soleil atteinte, les deux moteurs remettent automatiquement le capteur dans la position du lever du soleil du jour suivant.

Les tests effectués montrent le bon fonctionnement de notre système.

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] : <http://www.masen.org.ma/upload/communiqués/FichesVF.pdf>.
- [2] : BENMOHAMMADI zahra memoire de projet de fin d'étude << etude, conception et réalisation d'une commande d'un tracker solaire (suiveur solaire) >> université sidi mohammed ben abdellah FST fès département de génie électrique
- [3] : J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [4] : R. Bernard; G. Menguy; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier , 2^{ème} édition 1980.
- [5] : J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [6] : S. Saadi, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC, 2010.
- [7] : [www . Définition ; Les coordonnées horizontale.html](http://www. Définition ; Les coordonnées horizontale.html) (Consulté le 04/2015)
- [8] : MR Maouedj Rachid, Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah, Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaïd Faculté des Sciences Département de physique 2005.
- [9] : Michel Daguenet: les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris ; 1985.
- [10] : Michel Capderou , Atlas solaire de l'Algérie, tome 1,2 ;O.P.U. 1986.
- [11] : M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [12] : www.Energie solaire photovoltaïque Semaine 08 (Consulté le 05/2015)
- [13] : Yves Jannot. Thermique solaire. Paris (2007).
- [14] : <http://web.laghuniv.dz/web/fr/doc/publications/ouvrage/techno/Mesri.pdf> (05/2015)
- [15] : Introduction to solar energie : [http:// www.Newport cooperation. Com/Introduction-ac-rayonnement-solaire/ 411919/1036/ catalog.aspx](http://www.Newport cooperation. Com/Introduction-ac-rayonnement-solaire/411919/1036/catalog.aspx)
- [16] : DUFFIE J. A. , BECKMAN W. A., Solar energy thermal processes, John Wiley and Sons, New York,1974.
- [17]: Coordonnées célestes: [sciences- physiques.ac-dijon.fr /astronomie/Lexique-astronomique /lexique-astro/c/coordonnees_celestes.html](http://sciences-physiques.ac-dijon.fr/astronomie/Lexique-astronomique/lexique-astro/c/coordonnees_celestes.html). (Consulté le 04/2015)
- [18] : Article Projet de Physique P6 STPI/P6/2012 - n° 7// insa<< Innovation technologique: Traqueur Solaire photovoltaïque>>
- [19] : Ciel et Terre : le mouvement apparent du soleil .html. (Consulté le 04/2015)

- [20] : Sekhri Toufik, Mémoire de fin d'étude, «Etude comparatif entre deux concentrateur solaire» Université de Ouargla, 2012.
- [21] : CHIBA younes, «Etude de l'utilisation d'un bassin d'eau comme capteur solaire» mémoire de magister, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE 2005
- [22] : Statistiques (2011) de IEA : International Energy Agency www.iea.org/statistics
Consulté le 02/2014
- [23] : Soufi Adel, Mémoire de fin d'étude « Modélisation et Control System photovoltaïque par l'espace d'ETA », Université de Ouargla, 2012
- [24] : « Energie solaire photovoltaïque».doc / B. Flèche - D. Delagnes .2007
- [25] : Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa (2014) 87 – 92 87
<< Evaluation de l'influence de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système hybride>>
- [26] : le-rendement-d-un-panneau-solaire-photovoltaïque.html (Consulté le 05/2015).
- [27] : Thomas B. Greenslade, Jr., « Heliostats », Jules-Célestin Jamin — « Cours de physique de l'École polytechnique. Tome 3 - Fasc. 2 » Gauthier-Villars et fils (Paris) - 1885-1906
- [28] : Practical Solar - Technology- février 2008.
- [29] : <http://www2.cnrs.fr/en/863.html>. (Consulté le 06/2015)
- [30] : Sukhraj Singh Cheema (06/2012).Simulation Studies on Dual Axis Solar Photovoltaic Panel Tracking System. THAPAR UNIVERSITY PATIALA.
- [31] : <http://www.solar-tracking.fr>. (Consulté le 06/2015)
- [32]: R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine Academy,Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.].
- [33]: <http://www.arduino.cc>. (Consulté le 06/2015)
- [34]: Texas Instruments ULN2003A, ULN2004, ULN2028 Quadruple H drivers SLRS008C

ANNEXES

ANNEXE 1 :

Table A1- 1 : calcul du numéro du jour

<u>Mois</u>	<u>Numéro du jour</u>	
Janvier	J	
Février	J + 31	
Mars	J + 59	
Avril	J + 90	
Mai	J + 120	
Juin	J + 151	
Juillet	J + 181	
Août	J + 212	
Septembre	J + 243	
Octobre	J + 273	
Novembre	J + 304	
Décembre	J + 334	
Equinoxes et Solstices		
	<u>Date</u>	<u>Numéro du jour</u>
équinoxe printemps	21 mars	80
solstice été	21 juin	172
équinoxe automne	23 septembre	266
solstice hiver	21 décembre	355

ANNEXE 2 :

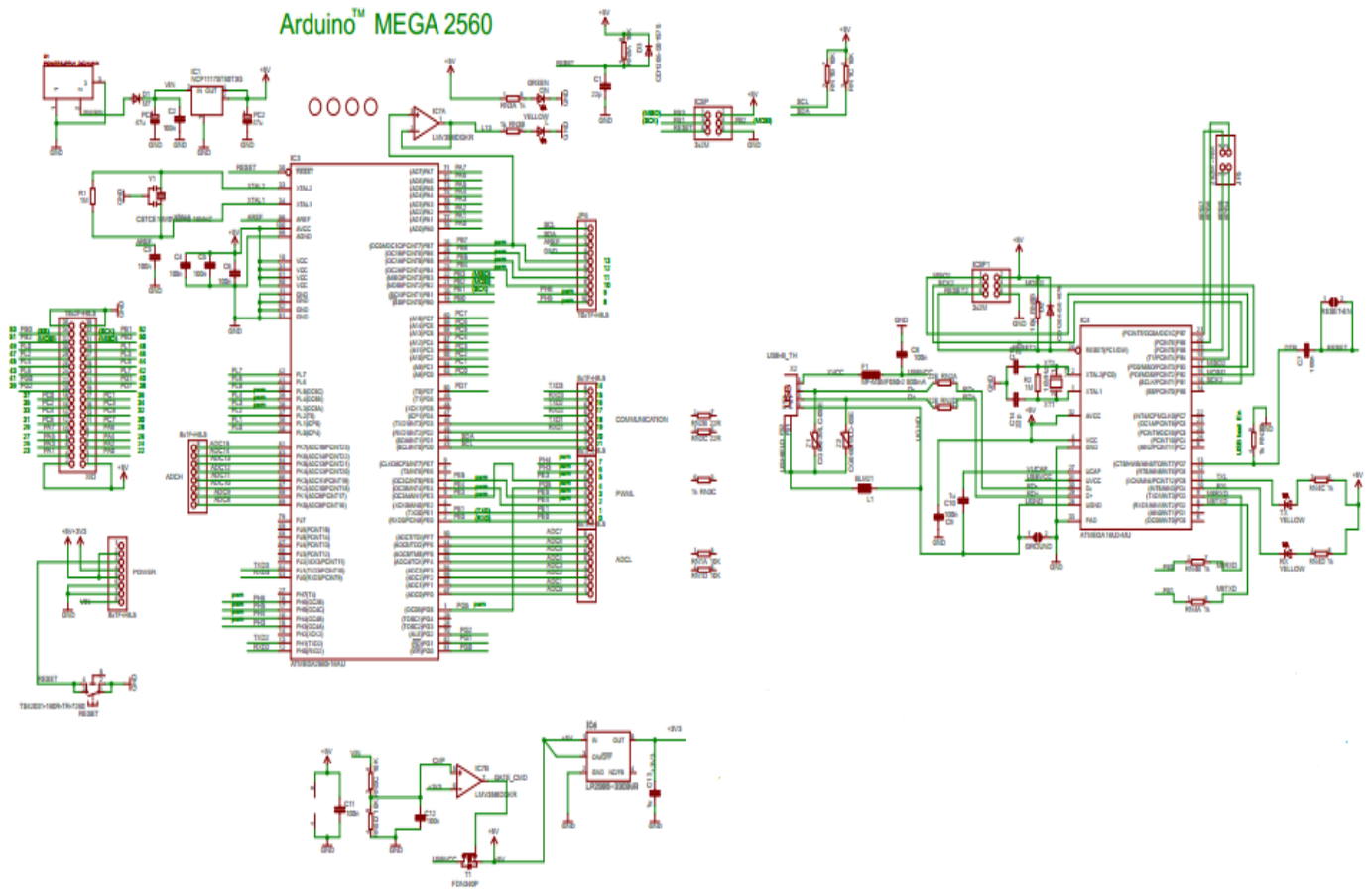


Figure A2-1 : Schéma technique de la carte Arduino Mega 2560

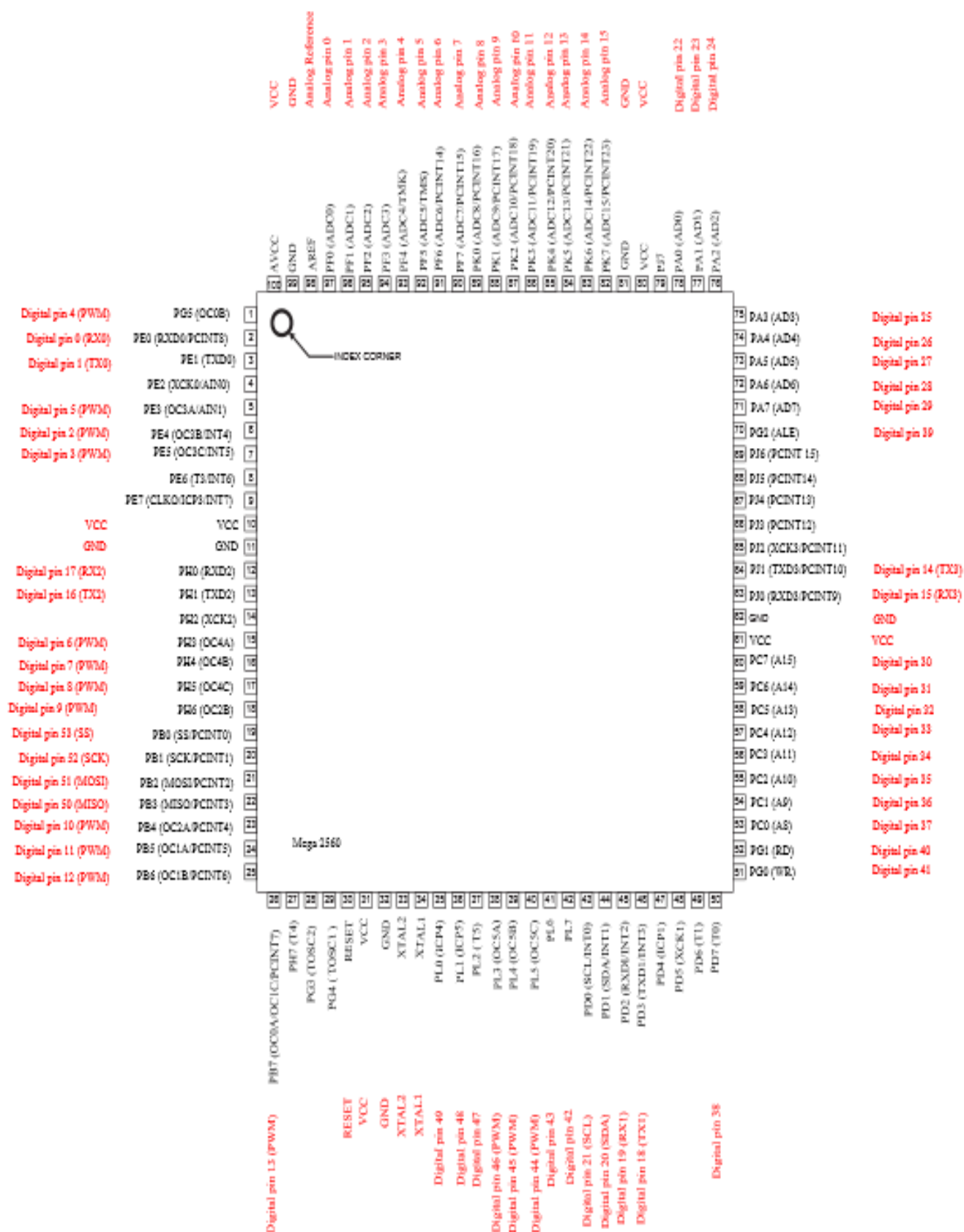


Figure A2-2 : Emplacement des pins sur la carte Arduino Mega 2560

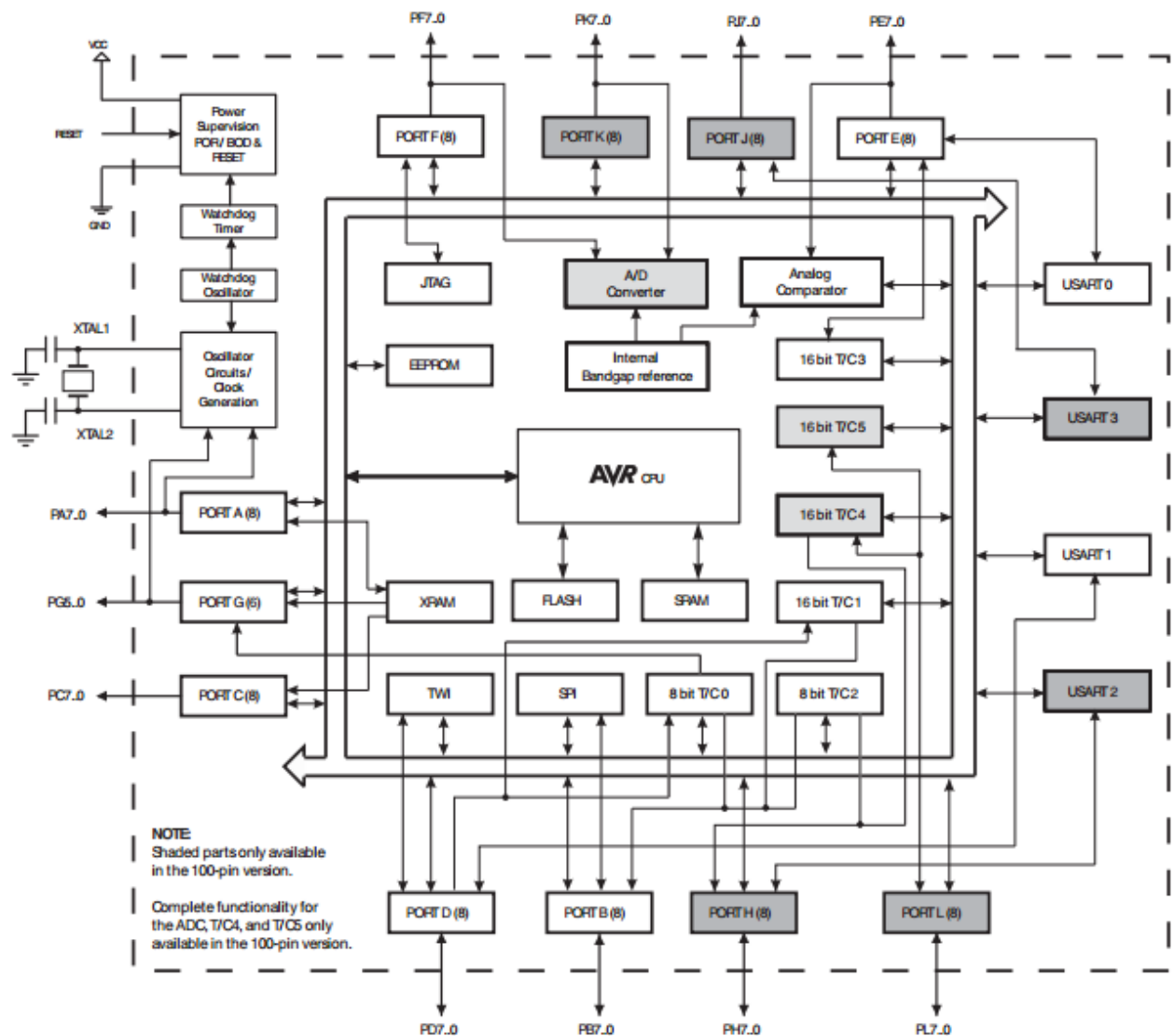


Figure A2- 3 : Schéma de l'architecture globale d'Arduino Mega 2560

Architecture AVR CPU :

Cette section traite de l'architecture de base AVR en général. La fonction principale du noyau du CPU est de veiller à l'exécution correcte du programme. Le CPU doit donc être en mesure d'accéder à des mémoires, effectuer des calculs, des périphériques de contrôle, et de traiter les interruptions.

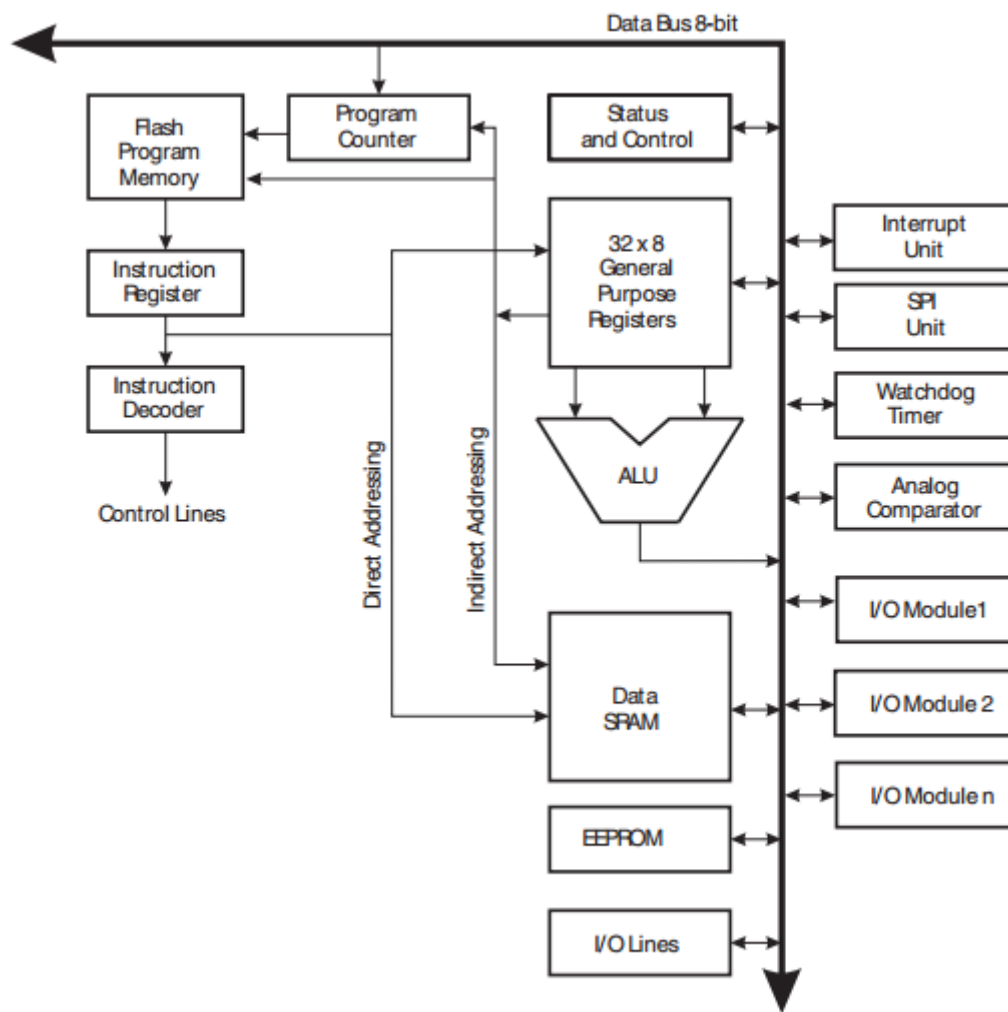


Figure A2- 4 : Schéma de l'architecture AVR CPU

ANNEXE 3 :

Principe de fonctionnement de moteur pas à pas :

- Moteur qui sous l'action d'une impulsion électrique de commande effectue une fraction de tour (ou "pas").
- La valeur du pas est défini: – par un angle par pas (ex.: 1.8° par pas); – en nombre de pas par tour (ex.: 200 pas par tour).
- L'excitation du moteur se fait via les bobines du stator.
- Le nombre de pas dépend:
 - Du nombre de phases (groupe de bobine).
 - Du nombre de pôles du rotor et du stator.
 - De la séquence des commutations des phases du moteur.

Moteur unipolaire :

Le rotor est constitué par un aimant permanent (en ferrite par exemple) comportant une paire de pôles. Le stator, comprend deux circuits magnétiques décalés de 90°. Les enroulements à point milieu sont alimentés avec une polarité toujours du même signe, d'où le nom d'unipolaire.

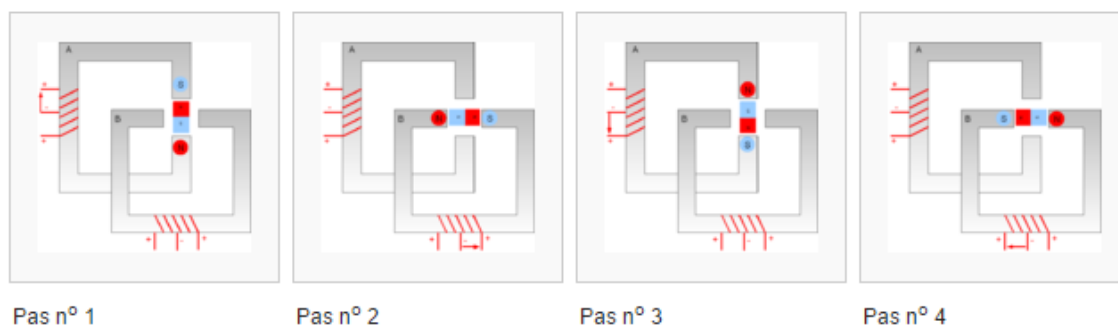


Figure A3-1 : Schéma de fonctionnement de moteur pas à pas unipolaire (6fils)

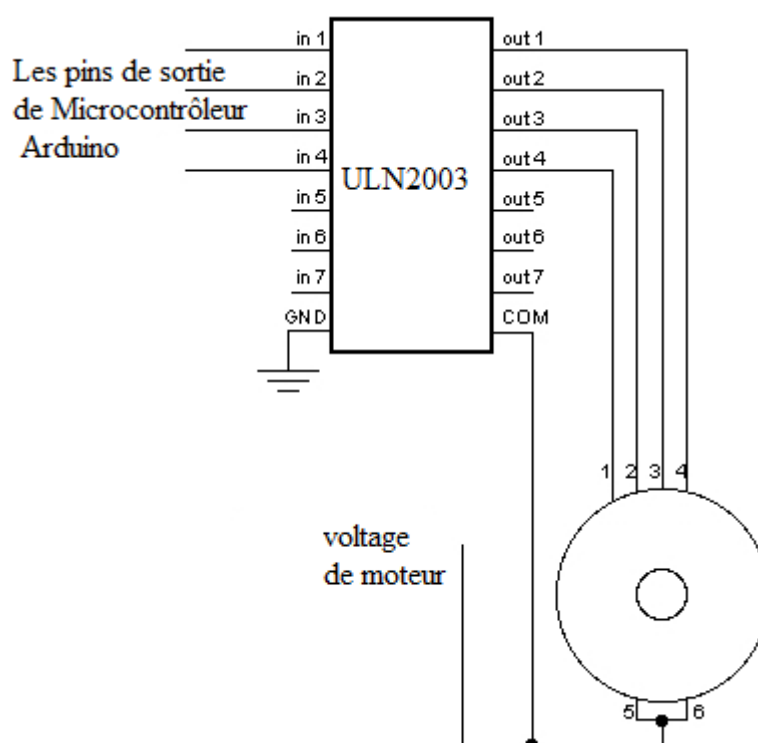


Figure A3-2 : Circuits de moteur pas à pas unipolaire

Moteur bipolaire:

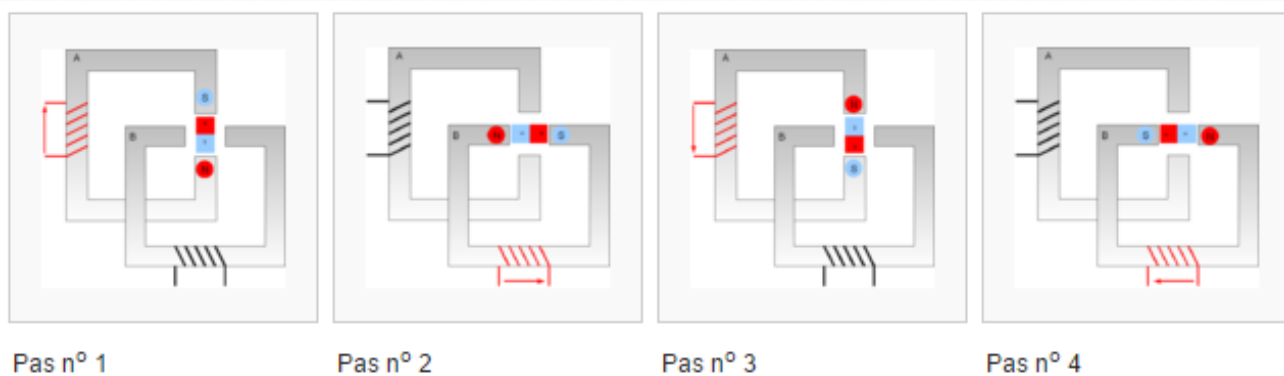


Figure A3- 3 : Schéma de fonctionnement de moteur pas à pas bipolaire (4fils)

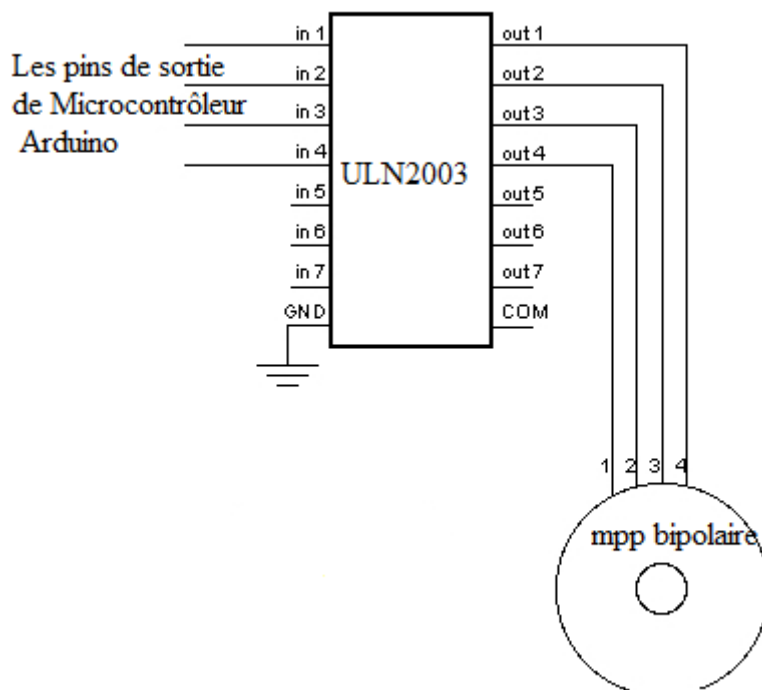


Figure A3-4 : Circuits de moteur pas à pas bipolaire