



REPUBLIQUE DU NIGER
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION
**UNIVERSITÉ DAN DICKO DANKOULO DO DE
MARADI**



Faculté des Sciences et Techniques
Département de Physique

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE POUR L'OBTENTION DE MASTER
**Spécialité : Système Énergétique Durable pour Société en Développement
(2SED)**

**Thème : Conception d'un système de suivi solaire automatique
pour le four à double concentration du CNES**

Présenté par
Adamou BOUEYE ABDOU

Encadré par
Dr Mahamadou HAMIDINE

Supervisé par
Prof. Amadou SEIDOU H. MAÏGA

Soutenu devant le jury composé de :

Saïdou MADOUGOU, Professeur Titulaire, UAM/NIGER (Président)

Amadou SEIDOU H. MAÏGA, Professeur Titulaire, UGB/Sénégal (Membre)

Mahamadou HAMIDINE, Maître-Assistant, UDDM/Niger (Membre)

Année académique 2019-2020

Dédicaces

Nous dédions ce document à :

- Nos parents qui depuis notre naissance n'ont cessé de nous reconforter et de nous donner des bons conseils.
- Nos frères et sœurs, qui malgré la distance nous ont toujours soutenus et n'ont jamais été absents même dans les moments difficiles de notre scolarité.

Remerciements

Je souhaite exprimer ici toute ma gratitude à celle et ceux qui, de près ou de loin, auront contribué à l'aboutissement de ce présent travail.

- Je tiens tout d'abord à remercier particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance à mon encadreur académique Dr **Mahamadou HAMIDINE**, Maître-Assistant, UDDM/Niger, pour le temps qu'il m'a consacré pendant la période d'élaboration du présent mémoire sachant répondre à toutes mes interrogations, sans oublier sa participation au cheminement de ce dernier.
- J'adresse mes remerciements à :
 - **Saïdou MADOUGOU**, Professeur Titulaire, UAM/NIGER ;
 - **Amadou SEIDOU H. MAÏGA**, Professeur Titulaire, UGB/Sénégal ;qui me font l'honneur de participer au jury de mon mémoire.
- Je remercie également :
 - Mme Sido Mariama Directrice du centre national de l'énergie solaire pour m'avoir accepté au sein de son service.
 - M. Ousmane Chayaou ingénieur au département de l'énergie pour son encadrement et sa rigueur pour l'obtention d'un travail bien fait.
 - Les personnels du CNES pour l'aide et les conseils qu'ils m'ont apportés concernant les travaux évoqués dans ce rapport, je n'ai rencontré que des gens sympathiques, désireux de me faire partager leurs connaissances.
- Ma reconnaissance va également à tous les enseignants chercheurs de l'université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi en général et à ceux du département de physique en particulier pour leur formation tout au long de notre cycle, bien sûr, sans eux, rien ne serait fait.
- Je remercie enfin très chaleureusement ma famille pour m'avoir écouté, aidé et encouragé tout au long de mon parcours académique.

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux.....	viii
Sigles et abréviations :	ix
Résumé	x
Abstract.....	x
Introduction générale	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES DE SUIVI SOLAIRE.....	3
I. Aperçu de la ressource solaire.....	4
II. Repérage du soleil dans le ciel.....	4
II.1. Rotation de la terre.....	4
II.2. Les coordonnées solaires.....	5
III. Le rayonnement solaire.....	7
IV. Etat de l'art sur les systèmes de suivi solaire	7
IV.1. Classification des systèmes de suivi solaire	8
IV.1.1. Classification selon le modèle	8
IV.1.2. Classification selon la méthode de suivi	8
IV.1.2.1. Systèmes basés sur la pré-programmation de la trajectoire.....	8
IV.1.2.2. Systèmes basés sur l'asservissement	9
IV.1.2.3. La commande	10
IV.1.3. Autre critère de classification.....	12
CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE ET MODELISATION DU FOUR SOLAIRE DU CNES	13
I. Historique et missions du CNES.....	14
I.1. Historique du CNES.....	14
I.2. Missions du CNES.....	15
II. Etude du four solaire du CNES	15
II.1. Constitution du système	15
II.2. Principe de fonctionnement	16
II.3. Modélisation du système.....	18
II.3.1. Modélisation en 2D.....	18
II.3.2. Modélisation en 3D.....	20
II.4. Les pièces en mouvement du miroir.....	23
II.5. Optimisation de la partie mécanique.....	24

II.5.1.	Etude des mécanismes d'entraînement	24
II.5.2.	Choix et conception du mécanisme d'entraînement	25
II.5.3.	Support mécanique	27
CHAPITRE III : SUIVEUR SOLAIRE.....		28
I.	Suiveurs actifs	29
I.1.	Suiveurs asservis.....	29
I.1.1	Principe général.....	29
I.1.2	Organigramme du suiveur asservi	30
I.2.	Suiveur préprogrammé.....	31
I.2.1	Equation astronomiques	31
I.2.2	Principe du suiveur préprogrammé.....	32
I.2.3	Organigramme du suiveur préprogrammé	33
II.	Etude du suiveur retenu.....	34
II.2.	Description du suiveur.....	35
II.2.1.	Contraintes	35
III.	Etude des différentes parties du suiveur	36
III.1.	La détection de la lumière.....	37
III.1.1.	Détecteurs optoélectroniques.....	37
III.1.2	Choix du dispositif de détection	38
III.1.3.	Description du dispositif.....	38
III.1.4.	Schéma électrique du détecteur de lumière	39
III.1.5.	Fonctionnement du circuit de détection.....	40
III.2.	Circuit de commande	41
III.2.1.	La carte Arduino	41
III.3.	Le circuit de puissance.....	43
III.3.1.	Le circuit intégré L293D	43
III.3.2.	Principe de fonctionnement du pont H.....	44
III.4.	Le moteur à courant continu	45
III.5.	Réducteur de vitesse	45
III.6.	Dimensionnement de l'alimentation du moteur	46
III.6.1.	Estimation des besoins journaliers en électricité.....	46
III.6.2.	L'irradiation journalière.....	46
III.6.3.	Détermination de la puissance crête.....	47
III.6.4.	Choix de la tension du fonctionnement	47
III.6.5.	Estimation de la capacité de stockage.....	47
III.6.6.	Choix du régulateur de tension.....	47

CHAPITRE IV : SIMULATION ET RESULTATS	49
I. Circuit de commande du suiveur	50
II. Programme	51
III. Fonctionnement	52
Conclusion	54
Références	55
ANNEXES	57
ANNEXE 1: Circuit électrique de la commande du suiveur	A
ANNEXE2 : schéma simplifié de la carte arduino [25]	B
ANNEXE3 : Equation entrée-sortie de quelques amplificateurs	D

Liste des figures

FIGURE 1. 1: ROTATION DE LA TERRE AUTOUR DE SON AXE ET ORBITE ELLIPTIQUE AUTOUR DU SOLEIL [3]	4
FIGURE 1. 2: VARIATION DE L'ANGLE DE DECLINAISON SOLAIRE PENDANT UNE ANNEE [3]	5
FIGURE 1. 3: REPRESENTATION DE LA HAUTEUR ET DE L'AZIMUT	6
FIGURE 1. 4: COMPOSANTE DU RAYONNEMENT SUR UNE SURFACE INCLINEE	7
FIGURE 1. 5: PRINCIPE DU SUIVEUR PREPROGRAMME	9
FIGURE 1. 6: PRINCIPE DU SUIVEUR ASSERVI	10
FIGURE 1. 7: SUIVEUR A BASE D'AMPLIFICATEURS	11
FIGURE 2. 1: IMAGE DU MIROIR REFLECTEUR	15
FIGURE 2. 2: IMAGE DE LA PARABOLE	16
FIGURE 2. 3: LES COMPOSANTS DU FOUR A DOUBLE CONCENTRATION	17
FIGURE 2. 4: PRINCIPE DE LA DOUBLE REFLEXION	18
FIGURE 2. 5: MIROIR REFLECTEUR	19
FIGURE 2. 6: LA PARABOLE	19
FIGURE 2. 7: SYSTEME D'ENROULEMENT	20
FIGURE 2. 8: TIGE FILETEE	20
FIGURE 2. 9: MODELE 3D DES COMPOSANTS DU FOUR	22
FIGURE 2. 10: MODELE 3D DU SYSTEME A DOUBLE CONCENTRATION	23
FIGURE 2. 11: MODELE DU SYSTEME D'ENROULEMENT POUR LA ROTATION	23
FIGURE 2. 12: MODELE DE LA TIGE FILETEE	24
FIGURE 2. 13: SYSTEME POULIES-COURROIE	24
FIGURE 2. 14: SYSTEME PIGNON-CHAINE [24]	25
FIGURE 2. 15: SYSTEME PIGNON-CHAINE [24]	25
FIGURE 2. 16: SYSTEME DE ROTATION SUIVANT L'AZIMUT	26
FIGURE 2. 17: SYSTEME DE ROTATION SUIVANT LA HAUTEUR	26
FIGURE 2. 18: SYSTEME MECANIQUE OPTIMISE	27
FIGURE 3. 1 : TYPES DE SUIVEURS	29
FIGURE 3. 2: ORGANIGRAMME DU SUIVEUR ASSERVI	30
FIGURE 3. 3: ANGLE D'INCIDENCE θ ET ANGLE D'INCLINAISON α	33

FIGURE 3. 4: ORGANIGRAMME DU SUIVEUR PREPROGRAMME	34
FIGURE 3. 5: ORGANIGRAMME DE FONCTIONNEMENT DU SUIVEUR	36
FIGURE 3. 6: <i>VARIATION DE LA RESISTANCE EN FONCTION DE L'ECLAIREMENT D'UNE PHOTORESISTANCE</i>	37
FIGURE 3. 7: SYMBOLE ET IMAGE D'UNE PHOTORESISTANCE	38
FIGURE 3. 8: EMPLACEMENT DES DETECTEURS DE LUMIERE	39
FIGURE 3. 9: CIRCUIT DE DETECTION	39
FIGURE 3. 10: SUPPORTS DES DETECTEURS OPTOELECTRONIQUE	40
FIGURE 3. 11: PRINCIPE DE LA DETECTION	41
FIGURE 3. 12: CARTE ARDUINO	42
FIGURE 3. 13: BROCHAGE ET IMAGE DU L293D	44
FIGURE 3. 14: VARIATION DE SENS DU MOTEUR PAR PONT EN H.....	44
FIGURE 4. 1: COMMANDE DU SUIVEUR.....	50
FIGURE 4. 2: MODE NUIT	52
FIGURE 4. 3: MODE JOUR SANS CAPTEUR DE FIN DE COURSE.....	53

Liste des tableaux

Tableau 1: Description du brochage du L293D	44
Tableau 2 :consommation journalière du moteur	46
Tableau 3: Tableau de tension recommandé en fonction de la puissance crête	47

Sigles et abréviations :

CNES : Centre National de l'Energie solaire

CNREN : Centre National de Recherche en Energies Nouvelles et Renouvelables

EPA : Etablissement Public à caractère Administratif

EPIC : Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial

ONERSOL : Office de l'Energie Solaire

E : Energie du soleil

h : hauteur du soleil

H : Angle horaire

α : Angle d' inclinaison

β : Angle d' incidence

φ : La latitude du lieu

δ : Déclinaison solaire

AC : Alternatif curent

DC : Direct curent

GND : Ground

MLI : Modulation par Largeur d'Impulsions

PWM : Pulse Wide Modulation

LDR : light dependant resistor

TSV : Temps Solaire Vrai

PV : panneau photovoltaïque

θ_z : L'angle de Zénith solaire

2D : dimension deux

3D : dimension trois

TL : temps local

DE : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

M : Moteur à courant continu

P : Puissance

w : watt

Pt : puissance totale

Résumé

L'énergie solaire est devenue l'une des énergies renouvelables la plus prometteuse de nos jours. Dans le but de mieux exploiter cette énergie et d'atteindre une performance optimale, le photovoltaïque et le solaire thermique nécessite d'être équipés par des systèmes appelés systèmes de poursuite solaire. En effet chaque système de concentration solaire doit se repositionner constamment suivant le changement de la position du soleil.

Ce présent document porte sur l'étude d'une de ces techniques de suivi solaire. Il présente l'étude d'un système de suivi solaire automatique bi-axial pour un four à double concentration. La partie commande est élaborée par une carte électronique (arduino) programmée à partir du logiciel arduino et simulée avec ISIS proteus. Des mini moteurs à courants continus sont utilisés pour faire pivoter le système mécanique.

Abstract

Solar energy has become one of the most promising renewables today. In order to better exploit this and achieve optimal performance, photovoltaics and solar thermal all need systems called solar tracking systems. Indeed each solar concentration system must reposition itself constantly according to the change in the position of the sun.

This document present the study of one of these solar tracking techniques. It present the study of a dual-axis automatic solar tracking system for a dual-concentration oven.

The control part is elaborated by an electronic card programmed from the arduino software and simulated with ISIS proteus. Mini DC motors are used to rotate the mechanical system.

Introduction générale

La demande énergétique mondiale a connu une évolution croissante dans ces dernières décennies. Cette hausse de la demande est due à l'effet de la croissance démographique et de l'augmentation de la consommation moyenne par habitant. Une grande partie de cette énergie est fossile, mais en plus des bienfaits qu'elle apporte, cette énergie n'est pas sans conséquences sur l'environnement et sur les êtres qui y vivent. En effet elle est une des sources de la pollution atmosphérique, et son exploitation occasionne l'émission d'une grande quantité de gaz à effet de serre. Une autre alternative se présente de nos jours qui est celle des énergies renouvelables. Ces dernières occupent de plus en plus une place importante dans l'avenir énergétique mondial du fait de leur durabilité pour l'humanité et parce qu'elles permettent entre autres de répondre à cette demande énergétique croissante ; de minimiser l'utilisation des combustibles fossiles pour ralentir leur épuisement ; de diminuer l'émission des gaz à effet de serre et de contribuer à l'hybridation de l'énergie. Une des sources de ces énergies renouvelables est le soleil dont le rayonnement peut subir soit une transformation photo-thermique ou photoélectrique.

Dans le cadre de ses travaux de recherches et développement, le Centre National de l'Energie Solaire a mis au point différents systèmes d'exploitation de l'énergie solaire parmi lesquels le four solaire à double concentration utilisant la transformation photo-thermique pour convertir en chaleur le rayonnement issu du soleil. Le principe de ce four, est de capter les rayons solaires à travers un capteur plan, de renvoyer ces rayons sur un concentrateur parabolique, qui à son tour les canalise sur un récepteur pour produire de la chaleur.

Le rendement énergétique d'un capteur solaire dépend de l'angle d'exposition de la surface du capteur par rapport aux rayonnements solaires. Des études ont montré qu'une variation de cet angle de 30 à 75 degrés peut entraîner une perte de puissance allant de 13.4 à plus de 70% de la puissance totale [1]. Afin de collecter le maximum d'énergie possible, des dispositifs dits systèmes de poursuite solaire sont utilisés pour suivre le mouvement du soleil. Le système de poursuite solaire doit être ajusté de sorte qu'il soit toujours visé avec précision face au soleil.

La partie mobile du four à double concentration dont dispose le CNES est muni d'un système de guidage manuel qui permet de l'orienter suivant les deux axes pour le positionnement du capteur solaire. Cependant cette technique n'est pas très fiable et nécessite des interventions très fréquentes compte tenu du changement de la position du soleil au cours de la journée et aussi durant l'année. Pour pallier ce problème un système de suivi automatique est nécessaire. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude qui est la conception d'un suiveur solaire automatique pour ce four à double concentration. Après des études sur les différents types de

suiveurs solaires, le suiveur solaire automatique asservi bi-axial s'est avéré être le plus approprié pour une poursuite fiable et aussi présente une grande souplesse dans sa mise en œuvre.

Pour mener à bien ce travail nous le subdivisons en des parties :

- Des généralités sur les mouvements du soleil et ses différents types de coordonnées qui permettent de déterminer la trajectoire du soleil.
- Un état de l'art sur les systèmes de suivi au cours duquel nous allons exposer et analyser les différentes techniques de poursuite afin de faire un choix répondant aux exigences de notre système (le four à double concentration).
- Une étude du système à double concentration : Cette partie sera consacrée à la présentation des différentes parties du four, à la présentation de son fonctionnement et à la modélisation des différentes parties en utilisant le logiciel de conception mécanique SolidWorks. Ensuite une optimisation de la partie mécanique sera proposée et modélisée pour faciliter l'implémentation du système de suivi.
- Dans la dernière partie, le système de suivi solaire asservi bi- axial sera retenu sur la base de l'état de l'art établi précédemment. Cette partie fera l'objet de l'étude et de la simulation du suiveur. Le logiciel de programmation Arduino et le logiciel ISIS Proteus combinés permettront de suivre le fonctionnement du suiveur.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES DE SUIVI SOLAIRE

I. Aperçu de la ressource solaire

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de $2 \cdot 10^{27}$ tonnes. Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde $564 \cdot 10^6$ tonnes d'hydrogène en $560 \cdot 10^6$ tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E = mc^2$), ce qui représente une énergie totale de $36 \cdot 10^{22}$ kW. La Terre étant à une distance de $150 \cdot 10^6$ km du Soleil, elle reçoit une énergie de $1,8 \cdot 10^{17}$ W. La valeur du flux de rayonnement solaire E reçue par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne E_0 est appelée la *constante solaire*, elle vaut $E_0 = 1353 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. En première approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année j par :

$$E = E_0 \left[1 + 0,033 \cos (0,984 j) \right] \quad (1.1) \quad [2]$$

II. Repérage du soleil dans le ciel

II.1. Rotation de la terre

La terre effectue un mouvement presque circulaire autour du soleil. Ce mouvement s'effectue en un an dans un plan appelé écliptique. En plus de ce mouvement la terre subit un mouvement de rotation sur elle-même autour de son axe appelé axe polaire ; dont chaque tour dure 24 heures. Suite à cette rotation la terre occupe différentes positions au cours de son trajet. La connaissance des coordonnées horaires, horizontales, et géographiques du soleil est primordiale pour l'étude de sa trajectoire.

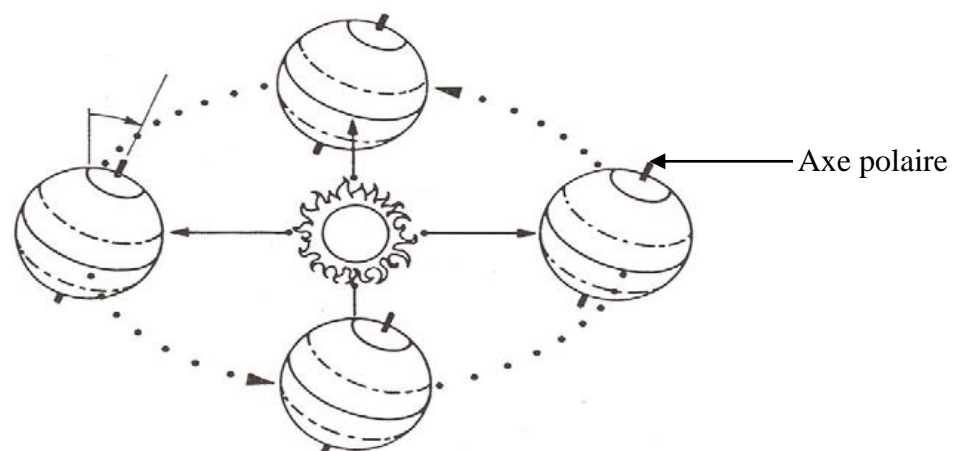


Figure 1. 1: Rotation de la terre autour de son axe et orbite elliptique autour du soleil [3]

II.2. Les coordonnées solaires

◆ Déclinaison

Au cours de son évolution autour du soleil, la terre ne présente pas toujours la même configuration face au soleil, elle change d'orientation. La déclinaison solaire est l'angle entre la direction du soleil et le plan de l'équateur de la terre. Cette variation entraîne les saisons. La déclinaison varie de $+23,45^\circ$ à $-23,45^\circ$. Elle atteint sa valeur maximale le 21 Juin. Ce jour s'appelle le solstice d'été dans l'hémisphère nord. La valeur minimale est atteinte le 21 Décembre. Ce jour marque le solstice d'hiver. La valeur de cette déclinaison est nulle aux équinoxes : 21 Mars et 21 Décembre. La formule approchée proposée par Chr. Perrin Brichambaut donne la déclinaison par :

$$\delta = 23,45 \sin\left[360\left(\frac{284+n}{365}\right)\right] \quad (1.2) \quad [4]$$

Où n est le jour de l'année

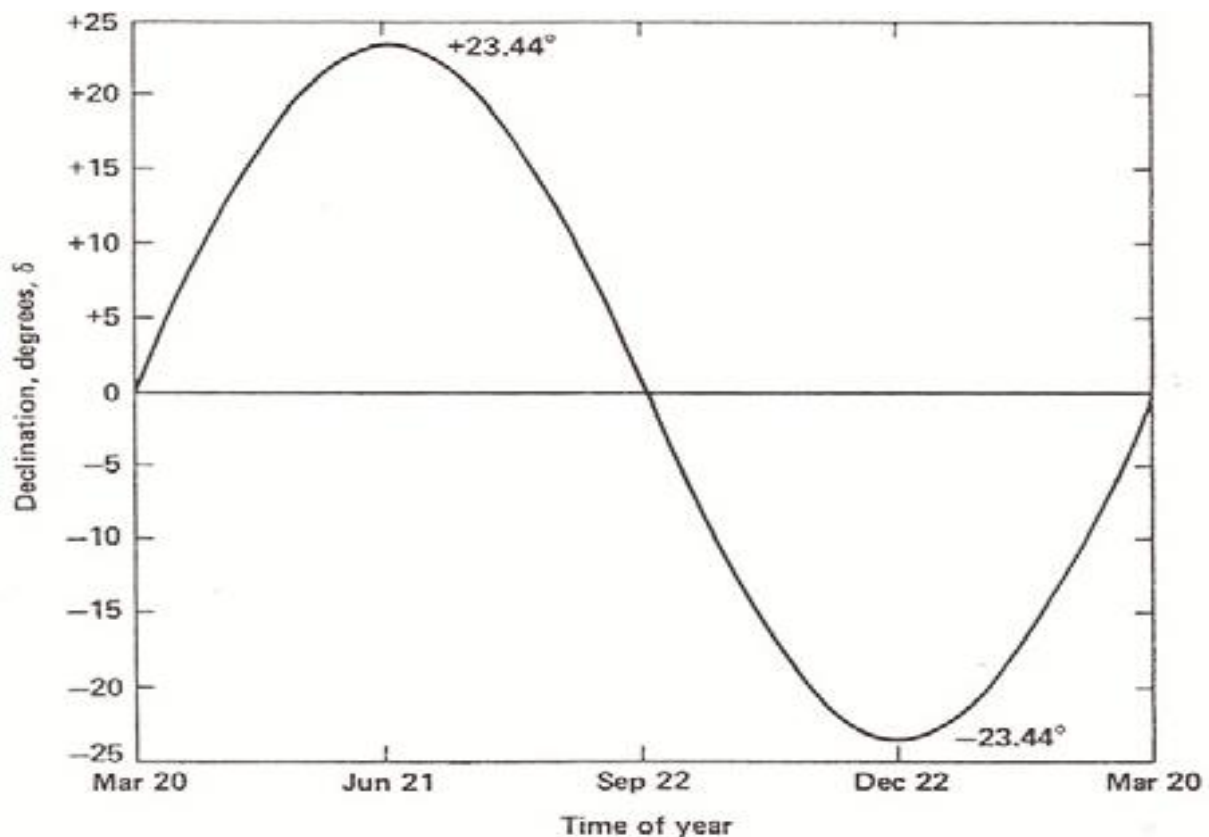


Figure 1. 2: Variation de l'angle de déclinaison solaire pendant une année [3]

◆ Hauteur

Au cours de la journée, le soleil atteint son point culminant vers le sud (dans l'hémisphère Nord) à midi, heure solaire. Cependant cette hauteur du soleil varie selon l'époque de l'année.

La hauteur est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal. Elle est fonction de la déclinaison que nous avons vue précédemment.

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos H + \sin \varphi \cdot \sin \delta \quad (1.3) \quad [5]$$

H : angle horaire

h: hauteur variant entre -90° et $+90^\circ$

◆ Angle de Zénith

L'angle de Zénith solaire θ_z est l'angle entre la verticale d'une surface avec la direction du soleil. En fait c'est l'angle complémentaire à la hauteur du soleil. Il est donné par l'équation suivante :

$$\theta_z = 90 - h \quad (1.3) \quad [2]$$

◆ Angle d'Azimut

Pendant la journée le soleil suit une direction sur l'horizon. L'Azimut est l'angle entre le point cardinal sud et la projection sur le plan horizontal de la ligne reliant le soleil à la terre. Cet angle se mesure suivant la direction des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord ; il est donc négatif le matin et positif dans l'après-midi.

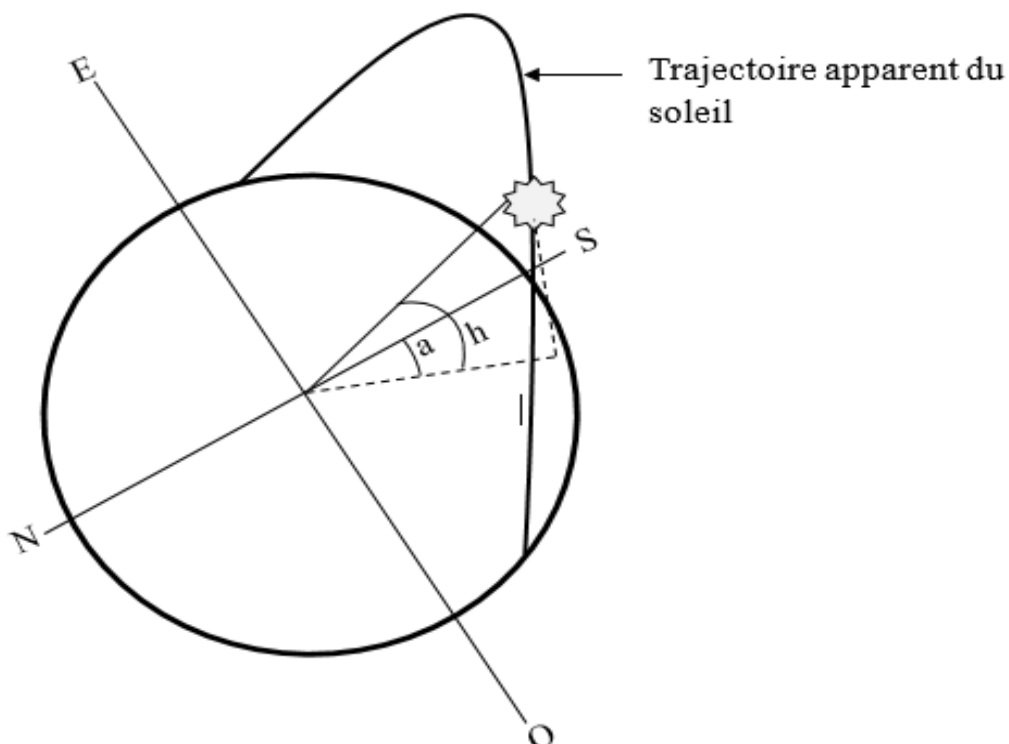


Figure 1. 3: Représentation de la hauteur et de l'azimut [6]

III. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Au-delà de l'atmosphère terrestre, le soleil donne un éclairage énergétique à peu près constant et égal à 1367w/m^2 , appelé de ce fait constante solaire. [7]

Cette énergie radiative du soleil subit de profondes modifications en traversant l'atmosphère en raison de l'absorption et de la diffusion, phénomènes provoqués par l'interaction avec les constituants gazeux et les particules en suspension. Par conséquent seulement une partie de ce rayonnement émis par le soleil arrive directement sur terre, l'autre est due à la diffusion par l'atmosphère. Le rayonnement solaire qui arrive au sol se décompose donc en deux parties. Le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

✚ Rayonnement direct

Il correspond aux rayons qui arrivent du disque solaire sans être diffusés : ils sont seulement réfractés légèrement par l'atmosphère.

✚ Rayonnement diffus

C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère

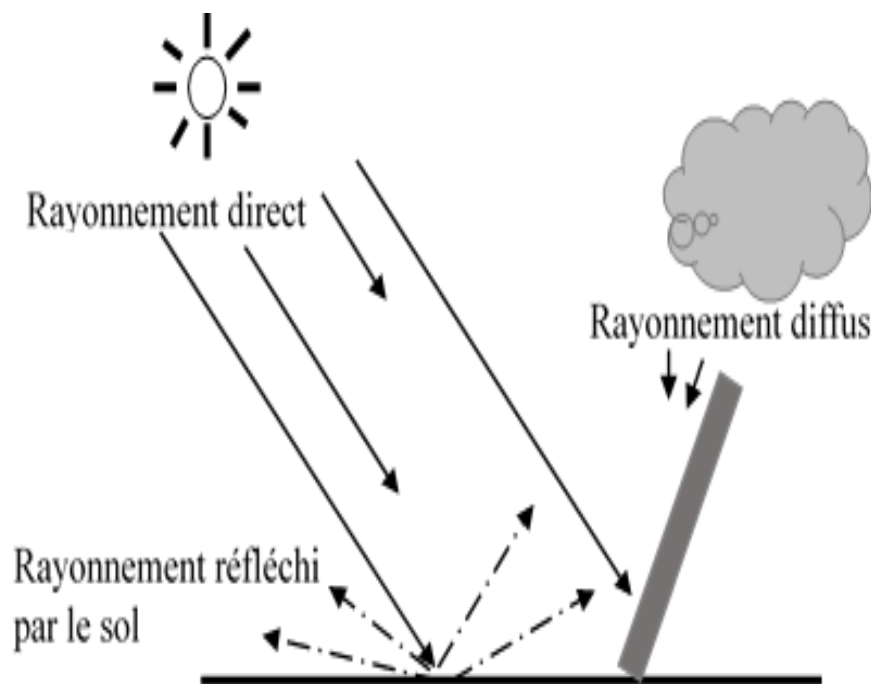


Figure 1. 4: Composante du rayonnement sur une surface inclinée [8]

IV. Etat de l'art sur les systèmes de suivi solaire

L'optimisation par le système de suivi solaire permet de mieux exploiter l'énergie du soleil. En effet, la puissance perdue dépend de l'angle du capteur avec le rayonnement direct du soleil.

C'est ainsi que beaucoup de travaux centrent leur intérêt pour maximiser l'ensoleillement en gardant la surface du capteur perpendiculaire au rayonnement solaire.

Les techniques de suivi sont diverses et peuvent être classées selon plusieurs critères.

IV.1. Classification des systèmes de suivi solaire

IV.1.1. Classification selon le modèle

◆ Suiveur mono-axial

Le système mono-axial permet de suivre le soleil suivant une seule direction, généralement d'Est en Ouest. Il ne s'intéresse pas à la variation de la hauteur du soleil au cours de l'année. Ce qui fait sa souplesse, mais ne prend pas en compte les pertes de puissances dues à la déclinaison solaire.

◆ Suiveur bi-axial

Quant aux systèmes bi-axiaux, ils s'intéressent non seulement à la variation de la position du soleil pendant la journée et aussi au cours de l'année. Ils sont donc plus performants que les précédents.

IV.1.2. Classification selon la méthode de suivi

Selon la méthode du suivi, Les systèmes de poursuite solaire peuvent être principalement subdivisés en deux grandes catégories, les unes basées sur l'asservissement, les autres sur la pré-programmation de la trajectoire.

IV.1.2.1. Systèmes basés sur la pré-programmation de la trajectoire

Généralement appelés systèmes de poursuite aveugles, ils sont basés sur le fait que le soleil a un trajet relativement périodique pour un observateur situé à un endroit donné sur terre. Le système d'orientation est basé sur la programmation du déplacement du capteur solaire à des intervalles de temps prédéfinis conformément à la trajectoire du soleil. Ceci de manière à garder la surface active du capteur perpendiculaire aux rayons solaires. Ces systèmes sont programmés pour suivre le mouvement du soleil en utilisant des équations appelées équations astronomiques. Un algorithme est créé à base de ces équations et celui-ci permet à partir des données telles que la latitude, la longitude, l'heure, d'obtenir l'azimut et la hauteur du soleil. Différentes techniques de commande peuvent être utilisées pour élaborer un système de ce genre. La **Figure 1. 5** donne le principe du suiveur aveugle.

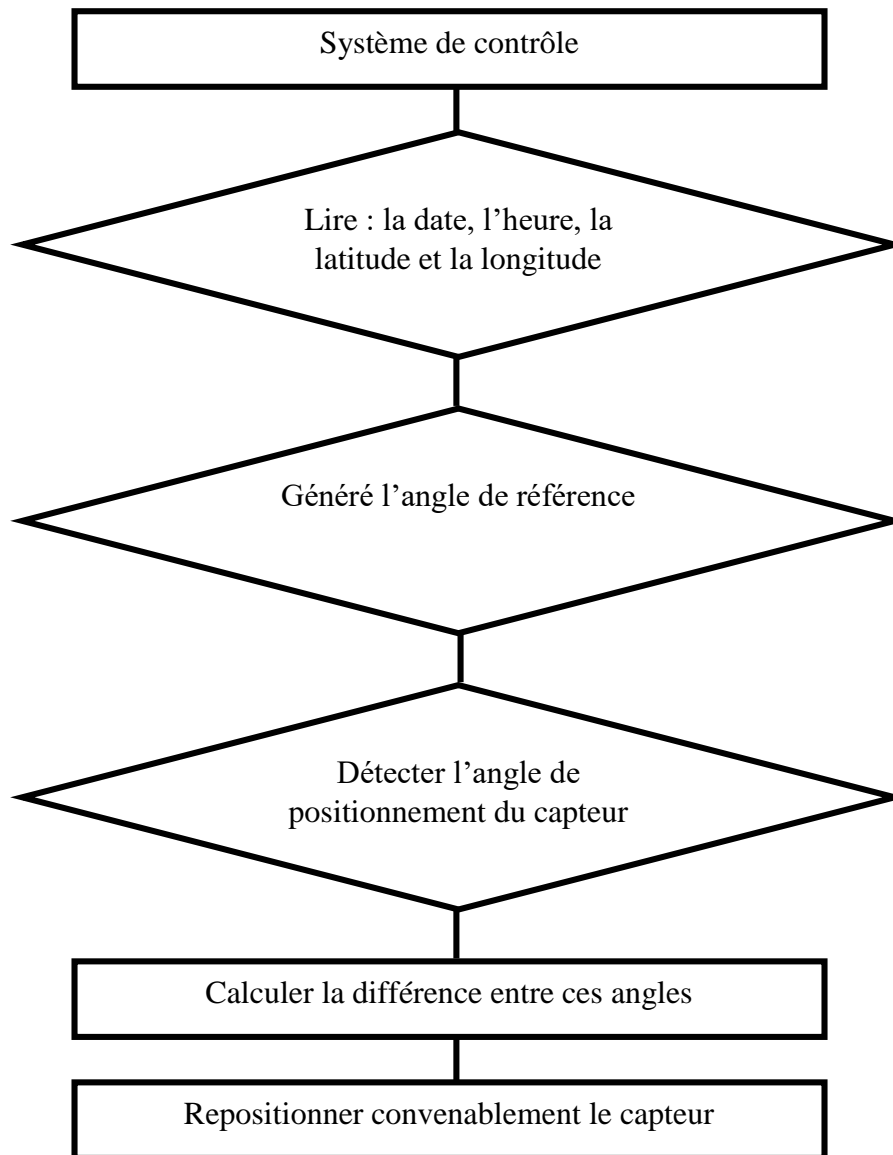


Figure 1. 5: Principe du suiveur préprogrammé

IV.1.2.2. Systèmes basés sur l'asservissement

Pour cette catégorie de système, des capteurs optoélectroniques qui détectent la position du soleil à tout instant sont utilisés. La poursuite s'effectue indépendamment de la zone dans laquelle le système sera situé. Le système de commande est à tout instant actif et la poursuite est plus précise. Les capteurs utilisés sont généralement les photorésistances ou les photodiodes dont la résistance varie en fonction de la lumière. La **Figure 1. 6** donne le principe du suiveur asservi.

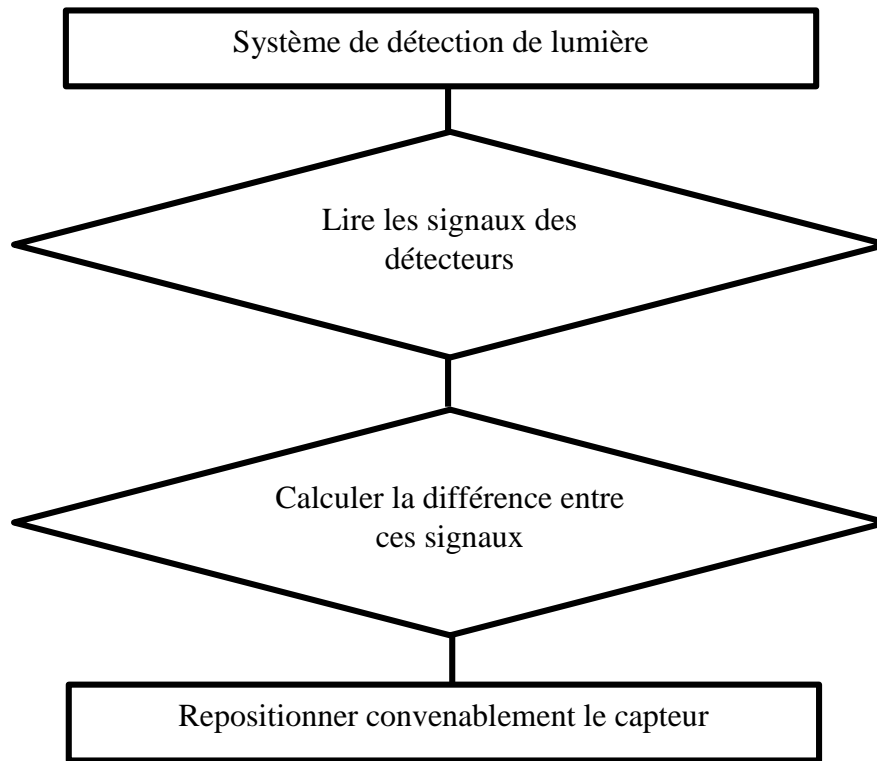


Figure 1. 6: Principe du suiveur asservi

IV.1.2.3. La commande

La technique de commande demeure la même pour les systèmes préprogrammés et pour les systèmes asservis. Elle peut se faire de différentes manières.

◆ Utilisation de la carte Arduino

La carte Arduino est un circuit imprimé en matériel libre sur lequel se trouve un microcontrôleur programmable pour analyser et produire des signaux électriques de manière à effectuer des tâches très diverses. Les signaux délivrés par les détecteurs optoélectroniques sont utilisés au niveau des entrées analogiques de la carte et sont traités par le programme. Un circuit intégré de puissance permet de relier le moteur à la carte. Les travaux [[8], [9]] utilisent la carte arduino pour l'élaboration de la commande du suiveur.

◆ Utilisation d'amplificateur

Dans cette technique présente dans les travaux[[10], [11] [12]]; un système électronique composé d'une chaîne d'amplificateurs est utilisé pour assurer la commande du suiveur. Ce système traite les signaux issus des détecteurs pour fournir une commande des moteurs en passant par différentes étapes. La **Figure 1. 7** représente une technique de commande des deux moteurs pour le suivi en hauteur et en azimuth du soleil.

- Le premier étage comporte les capteurs optoélectroniques(photorésistances) qui délivrent une tension qui varie en fonction de l'intensité lumineuse.

- Le deuxième étage représente l'amplification du signal issu des capteurs de lumière qui est de quelques millivolts. Le signal de chacun de quatre détecteurs est amplifié séparément.
- Après cette amplification les signaux de chaque paire de détecteurs de lumières sont utilisés à l'entrée d'un amplificateur différentiel (3^e étage) qui permet d'obtenir à la sortie une différence de tension.
- Le 4^e étage représente un comparateur. Il permet de faire une comparaison entre la différence des tensions issues du 2^e étage et une tension de référence (ici 0 volt). Il délivre ensuite une tension égale à la tension de saturation du comparateur positive ou négative pour commander le moteur. Donc dans ce cas précis, la tension d'alimentation du moteur doit être égale à la tension de saturation de l'amplificateur.

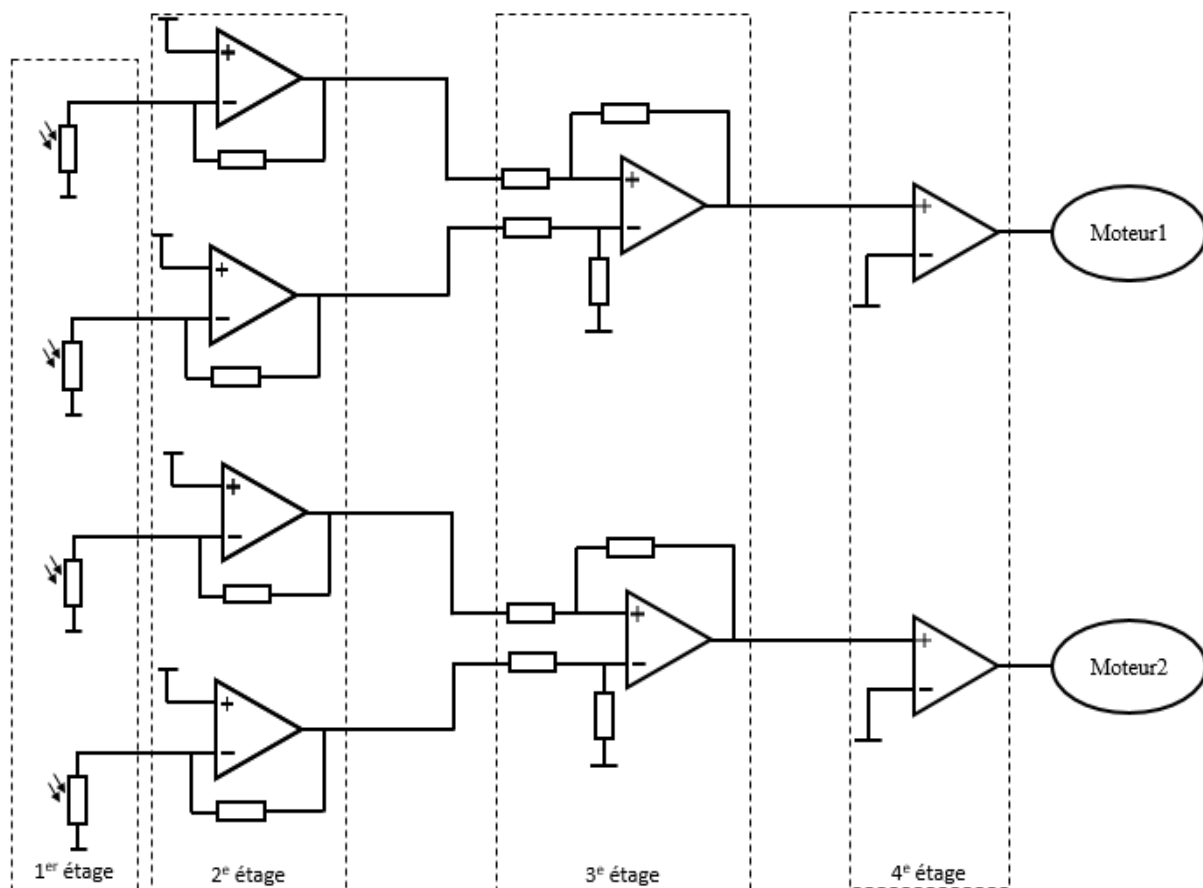


Figure 1. 7: *suiveur à base d'amplificateurs [11]*

◆ Utilisation d'un microcontrôleur

Le microcontrôleur qui est une unité de traitement de l'information est un système complet à base du microprocesseur fabriqué dans un circuit intégré. Une liaison avec un ordinateur permet de programmer celui-ci. Cette commande est élaborée à travers l'implémentation d'algorithme

de contrôle grâce à l'utilisation d'un microcontrôleur et parfois suivi d'une horloge à temps réel. Ces genres de techniques sont utilisées dans les travaux [[13], [14], [15], [16]]

Comme dans le cas de la carte arduino, Le programme du microcontrôleur servira dans ce cas de comparateur entre les signaux issus des capteurs de lumières (photodiodes) pour ensuite élaborer un signal à la sortie. Ce dernier servira de commande pour le circuit de puissance après amplification. Dans ce genre de système, un circuit d'interfaçage approprié doit être réalisé pour le bon fonctionnement du microcontrôleur.

IV.1.3. Autre critère de classification

En plus de ces deux classifications, il existe une autre catégorie de suiveurs, connu sous le nom de suiveurs passifs. Ces derniers sont généralement utilisés sur les panneaux PV et leur principe repose sur l'évaporation d'un fluide. Deux tubes contenant chacun un fluide chimique capable de se vaporiser à basse température, sont mis sur le deux côtés du panneau. Le fluide contenu dans le tube exposé au rayonnement solaire se vaporise et sa partie liquide occupe le côté ombragé. Cette opération de transfert de masse ajuste l'équilibre du capteur.

**CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE ET
MODELISATION DU FOUR SOLAIRE
DU CNES**

I. Historique et missions du CNES

I.1. Historique du CNES

Le Centre a été créé en mai 1965 et portait à l'origine l'appellation de « Office de l'Energie Solaire », sous l'acronyme « ONERSOL » et sous le statut d'Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC). Ce statut conférait à la structure les missions de mener à la fois des activités de :

- ✓ Recherche/Développement de systèmes dont le fonctionnement dérive de l'énergie solaire ;
- ✓ Et d'expérimentation, fabrication et commercialisation des prototypes retenus pour leur fonctionnalité.

L'entité connaîtra, avec la création d'une usine de production d'équipements solaires, particulièrement celle du chauffe-eau solaire, de retentissants succès tant au plan national que sous régional. Ainsi, de la date de création de l'usine en 1976 et 1989, l'ONERSOL a produit et commercialisé :

- ✓ 570 chauffe-eau de 200 litres/jour ;
- ✓ 100 filtres (réservoirs en aluminium) pour le Ministère de la Santé Publique (M.S.P) ;
- ✓ 100 bacs – glaciaires en aluminium pour le M.S.P;
- ✓ 1 572 mètres carrés de capteurs plans thermiques.

Dans le domaine de la Recherche/Développement, l'Office peut se targuer d'avoir conçu et mis au point des technologies qui anticipaient déjà sur l'avenir de l'énergie solaire en Afrique voire même dans le monde. Il s'agit notamment des technologies de capteurs plans à multiples vitrages, des concentrateurs solaires devant constituer les sources chaudes des moteurs thermiques.

En 1982, une restructuration de l'Office s'est imposée du fait en particulier de la faillite de la Section Fabrication et Commercialisation. Il est ainsi décidé de transformer la Section Recherche en un EPA sous l'appellation de « Centre National de Recherche en Energies Nouvelles et Renouvelables (CNREN) » et la Section Fabrication et Commercialisation en une société d'économie mixte, la « Société Nigérienne d'Energies Nouvelles (SONIEN) ».

Malheureusement les textes préparés à cet effet n'ont pas été adoptés par les autorités compétentes et la restructuration en question n'a pas été effective, même avec la disparition de

la Section Fabrication. En effet, celle-ci est liquidée en 1985 avec le licenciement de son personnel.

C'est dans cette situation de réforme engagée et inachevée et de conjoncture économique peu favorable que l'ONERSOL a continué à fonctionner tant bien que mal jusqu'en 1997, année au cours de laquelle sa restructuration fut à nouveau engagée avec l'adoption de la loi n° 97-024 du 08 Juillet qui crée en lieu et place de l'ONERSOL, le Centre National d'Energie Solaire (CNES), sous le statut d'Etablissement Public à caractère Administratif (EPA) placé sous la tutelle du Ministère en charge de l'Energie, alors que l'ONERSOL était sous la tutelle du Ministère chargé de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

I.2. Missions du CNES

Suite au changement de statut, la nouvelle structure s'est vue attribuer les missions de :

- ✓ Mener des travaux de recherche sur l'utilisation des Energies Renouvelables, notamment l'énergie solaire, et d'assurer la vulgarisation des résultats ;
- ✓ Participer à la réalisation d'études prospectives et diagnostiques en matière d'utilisation des Energies Renouvelables pour tous les secteurs de l'économie nationale ;
- ✓ Participer à la formation en matière d'Energies Renouvelables.

II. Etude du four solaire du CNES

II.1. Constitution du système

◆ Le miroir réflecteur (Héliostat)

C'est la partie du système qui reçoit directement le rayonnement provenant du soleil. Ce miroir a une forme plane. Cette géométrie permet de mieux recevoir les rayons solaires tout au long de la journée. Il est maintenu par un cadrage pour assurer sa protection.



Figure 2. 1: Image du miroir réflecteur

◆ La Parabole

La parabole est fixe et permet de concentrer les rayons reçus du miroir réflecteur et de les renvoyer sur le récepteur situé en son point focal. Cette géométrie parabolique permet d'avoir une meilleure concentration du fait que tous les rayons convergent vers un seul point qui représente le foyer. La surface interne de cette parabole est recouverte en feuille d'aluminium, un matériau qui réfléchit la quasi-totalité de la lumière qu'il reçoit et qui peut toutefois être remplacé par des morceaux de vitres.



Figure 2. 2: image de la parabole

◆ Le récepteur

Le récepteur solaire reçoit le rayonnement solaire concentré et sa température se voit élevée. Le récepteur est donc le composant le plus chaud du système. Il doit, du fait, avoir des bonnes caractéristiques thermiques sélectives. Ce récepteur est en acier trempé à cause de la forte température pouvant aller jusqu'à 350°C qu'il reçoit. Il est en couleur noire pour une meilleure absorptivité des rayons solaires qu'il reçoit.

◆ Support

C'est la structure métallique qui tient tous les composants précédemment cités. Il comporte un ensemble de pièces qui permettent de faire mouvoir le système. Il est en acier et tôle.

II.2. Principe de fonctionnement

Le four du CNES est un four à double concentration muni d'un miroir réflecteur plan, d'une parabole et d'un récepteur placé au foyer de la parabole. Le fonctionnement de ce four est relativement simple ; il repose sur le principe de la double réflexion. Le miroir placé face au soleil reçoit les rayons provenant du soleil et les renvoie sur la parabole. Cette dernière

concentre ces rayons issus du miroir pour produire de la chaleur en son foyer où se trouve le récepteur. Cette chaleur peut être utilisée pour des fins de cuisson ou pour la production d'électricité selon le niveau de température atteint. La **Figure 2. 3** et la **Figure 2. 4** donnent respectivement les différents éléments du four et le principe de la double réflexion.



Figure 2. 3: les composants du four à double concentration

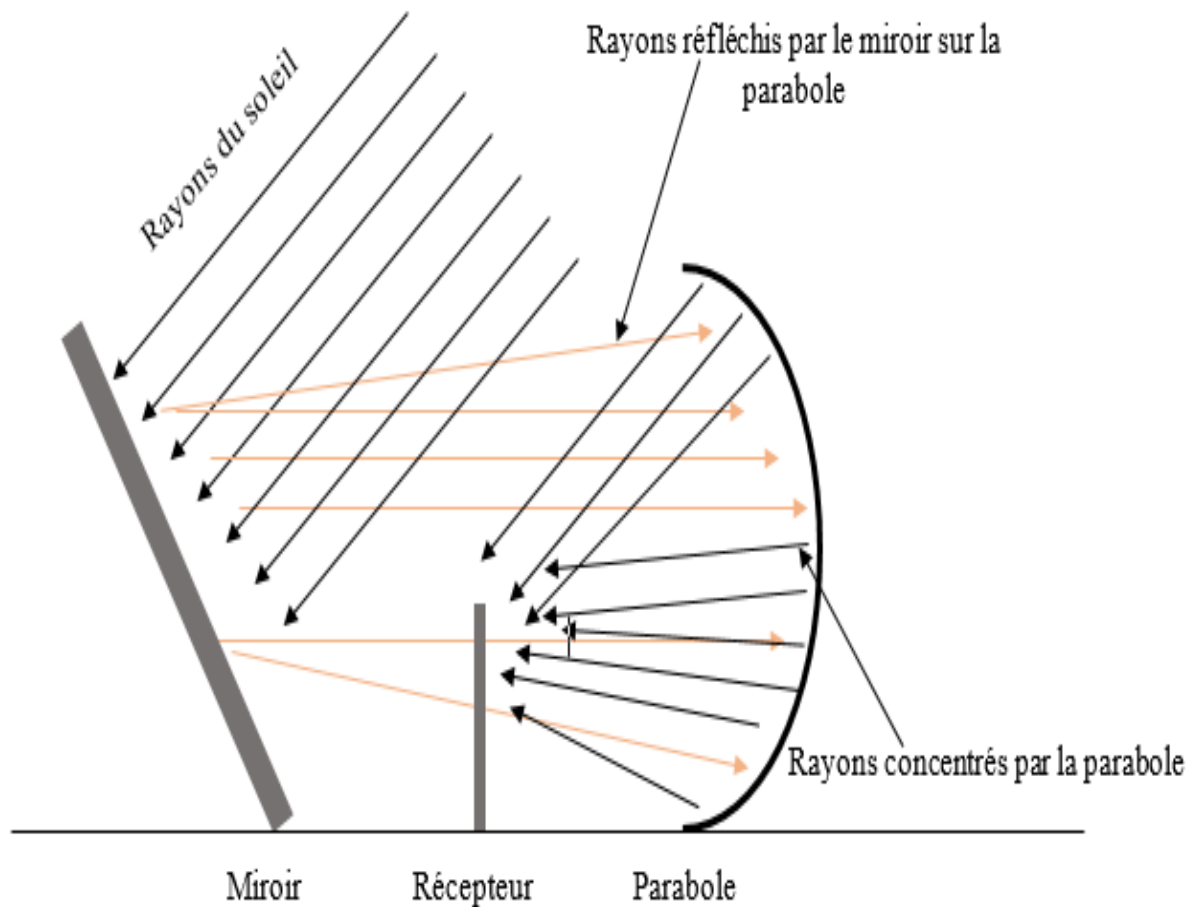


Figure 2. 4: Principe de la double réflexion

II.3. Modélisation du système

Pour une bonne compréhension de son fonctionnement, un modèle en 3D de ce four est élaboré. L'outil utilisé pour la réalisation de ce modèle est le logiciel de conception mécanique SolidWorks, outil qui permet de réaliser des schémas en 2D et 3D. Ce logiciel présente des avantages car ces différentes extensions permettent la vérification du fonctionnement du modèle au niveau de son mécanisme, la simulation physique sur le modèle ou encore la mise en plan des pièces.

Le four à modéliser est composé de différentes parties dont certaines fixes et d'autres mobiles.

II.3.1. Modélisation en 2D

Le modèle 2D doit normalement être utilisé pour l'obtention du modèle 3D. Mais dans notre cas, nous disposons avec le logiciel SolidWorks une option de mise en plan qui permet de passer du modèle 3D en 2D. cette option a permis d'obtenir le modèle 2D de toutes les pièces du système. Les figures ci-dessous donnent clairement les dimensions des différentes pièces.

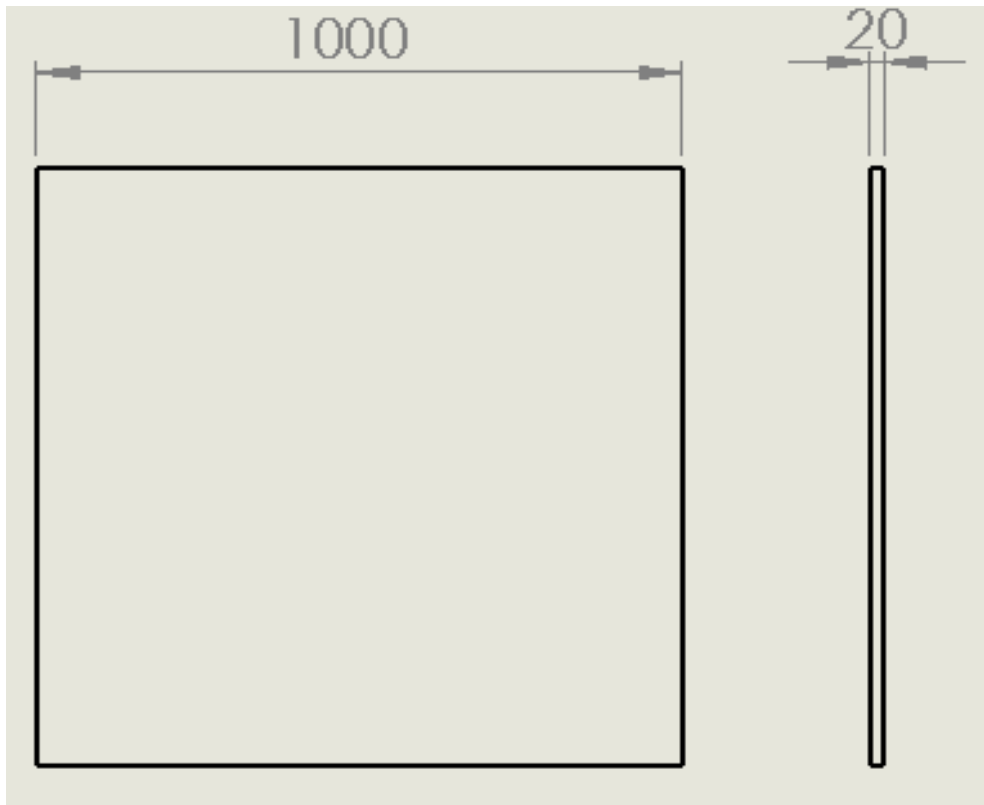


Figure 2. 5: Miroir réflecteur

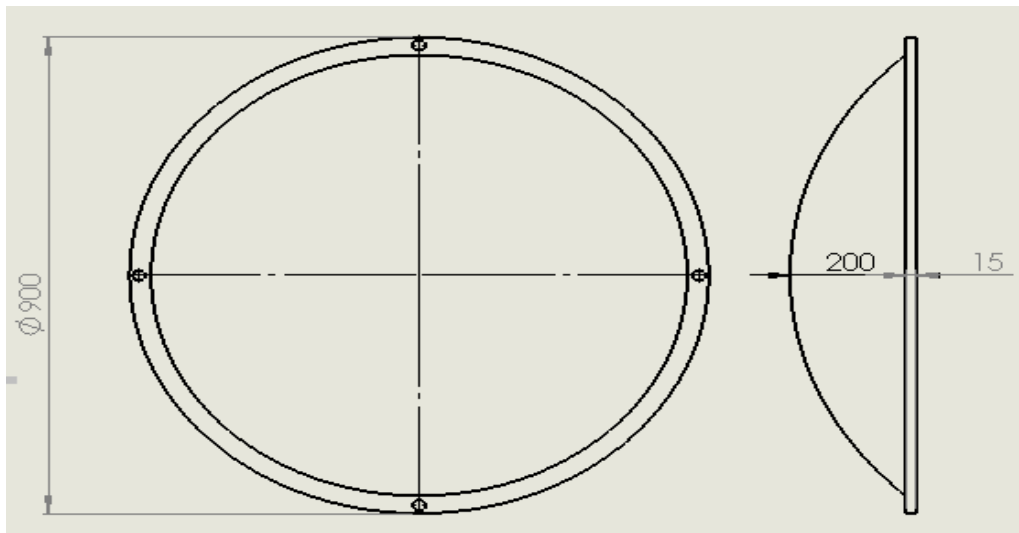


Figure 2. 6: la parabole

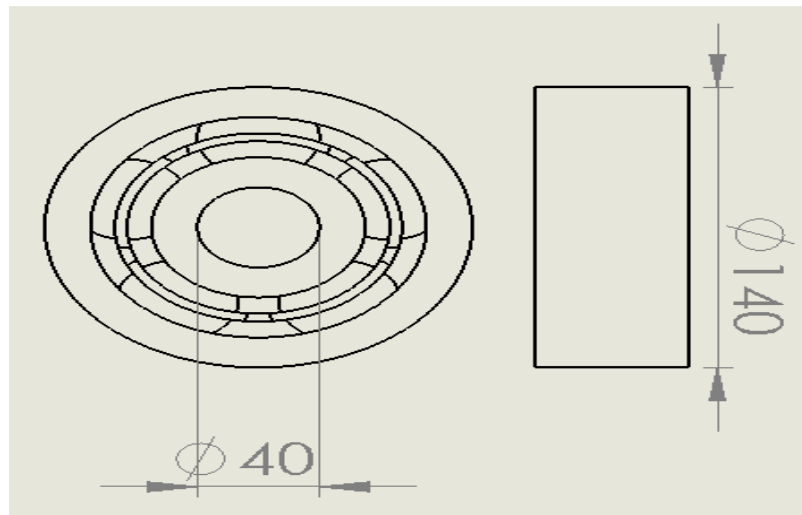


Figure 2. 7: système d'enroulement

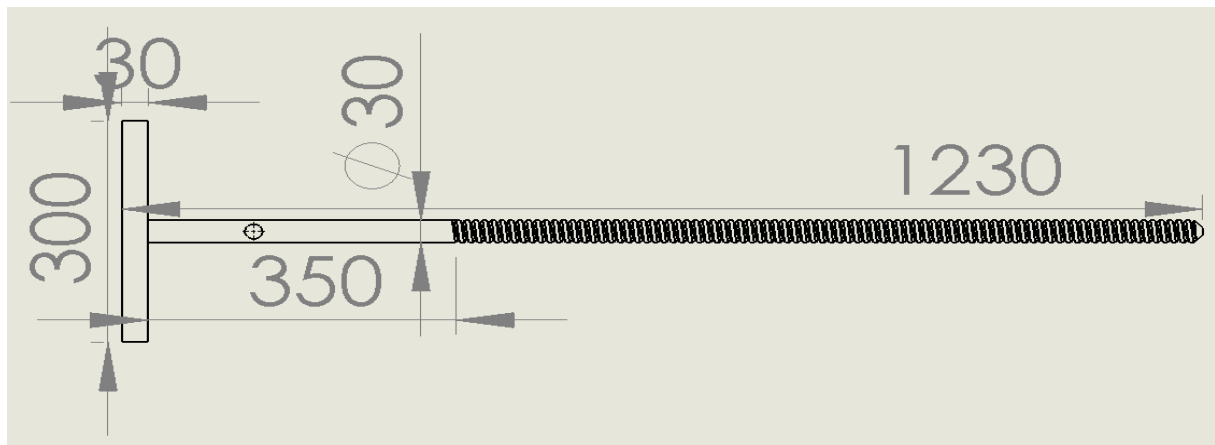


Figure 2. 8: tige filetée

II.3.2. Modélisation en 3D

Cette modélisation a consisté à effectuer un assemblage des pièces en 3D pour avoir le modèle complet du four. La partie du four la plus concernée par le présent travail est la partie mobile. Elle représente le miroir réflecteur muni des mouvements rotatifs.

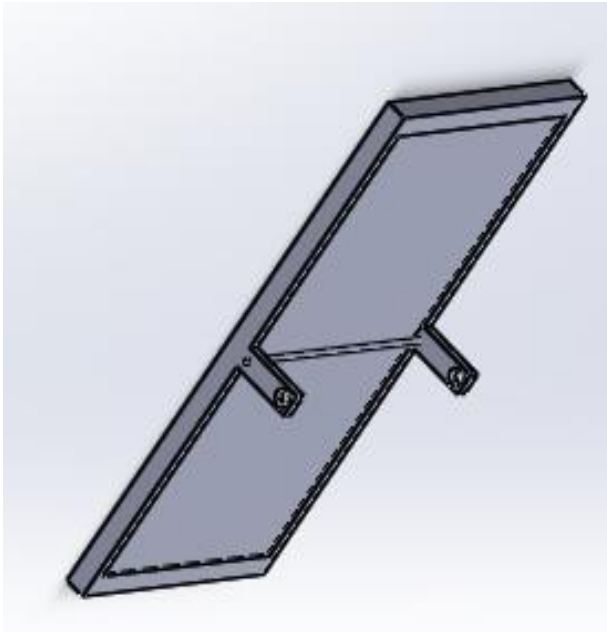


Fig.2.9.a : miroir

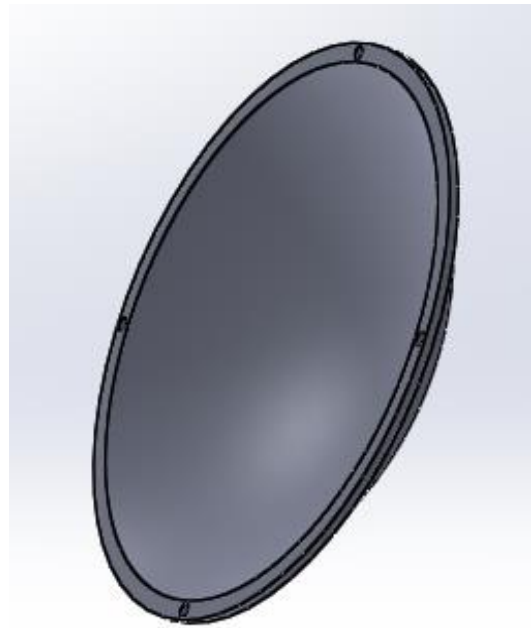


fig. 2.9.b : parabole

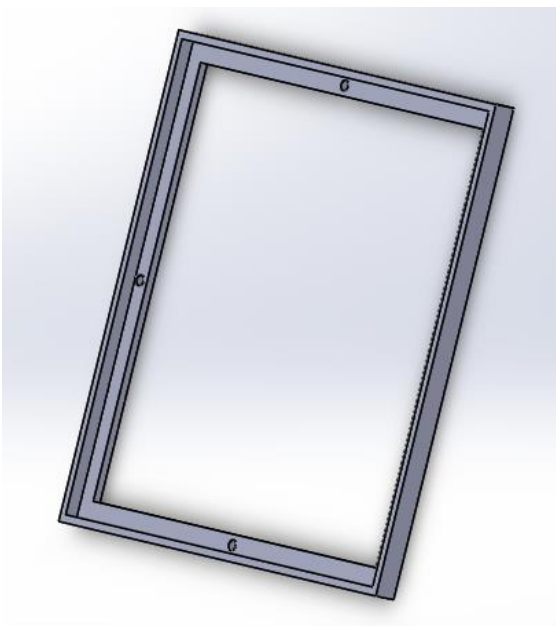


Fig.2.9.c : support de la parabole

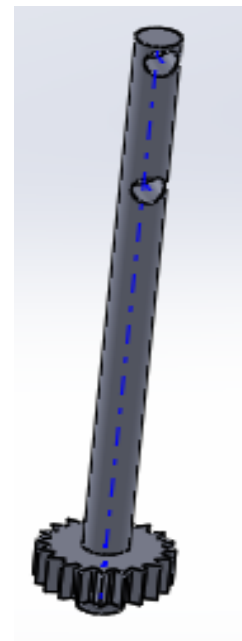


fig.2.9.d : arbre de rotation du miroir suivant l'azimut

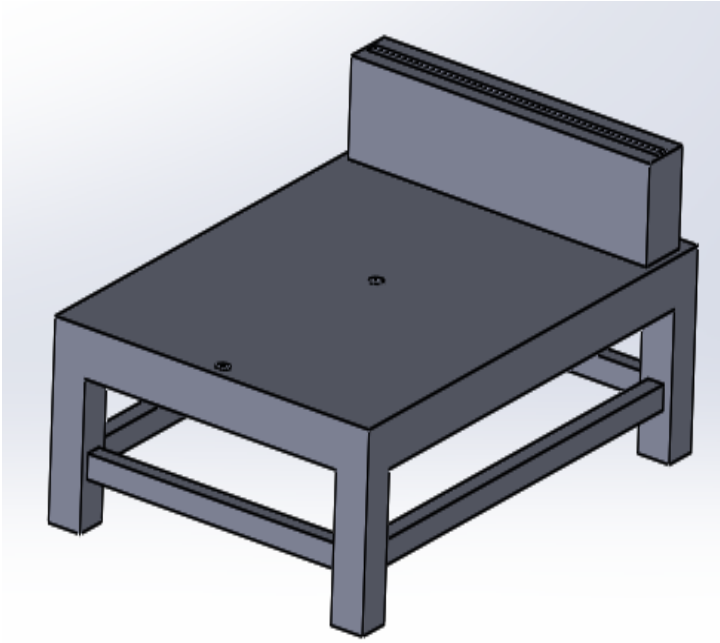


Fig. 2.9.e : support

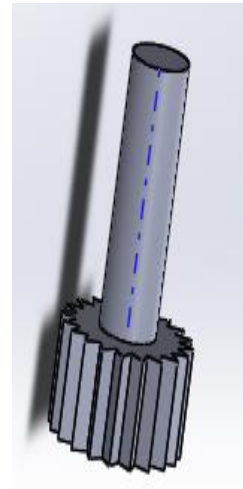


fig. 2.9.f : arbre moteur (azumit)

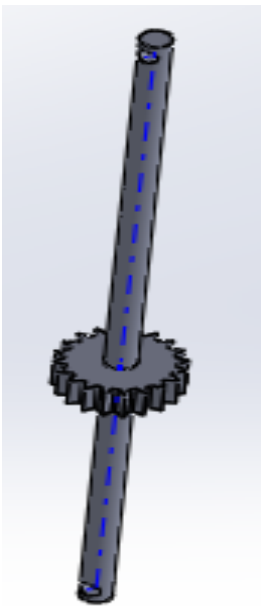


fig.2.9.g : arbre de rotation du miroir
suivant l'azimut



fig. 2.9.f : arbre moteur (hauteur)

Figure 2. 9: Modèle 3D des composants du four

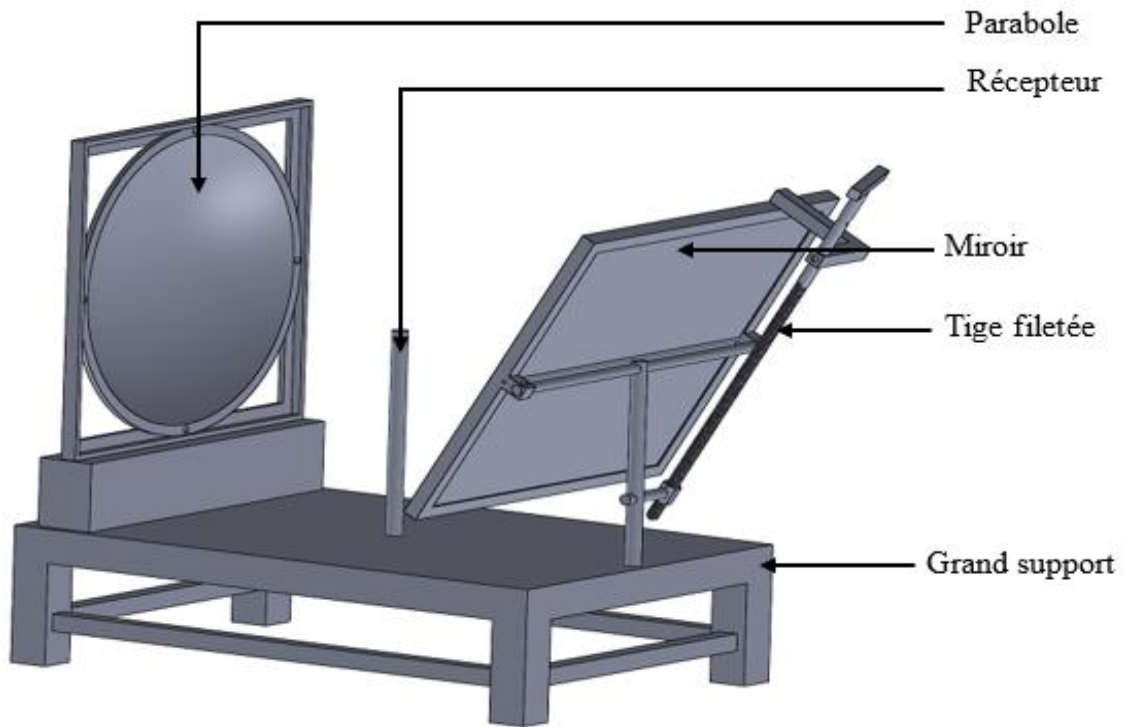


Figure 2. 10: Modèle 3D du système à double concentration

II.4. Les pièces en mouvement du miroir

Au cours de son fonctionnement, une partie des composantes du four est fixe. La seule partie mobile reste le miroir réflecteur qui doit être positionné convenablement face au soleil à tout instant. Il est animé de deux mouvements rotatifs.

- Le premier mouvement de rotation permet de le positionner suivant le changement de la valeur de l'angle d'azimut. Il est assuré par un système d'enroulement placé au pied de l'arbre support du miroir réflecteur.

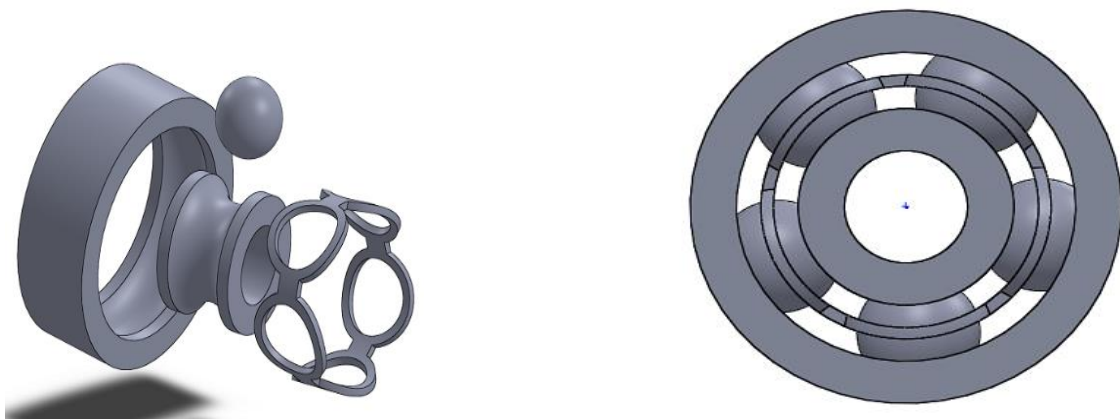


Fig.2.11.a: vue éclatée

fig. 2.11.b : vue après l'assemblage

Figure 2. 11: Modèle du système d'enroulement pour la rotation

- Le deuxième mouvement de rotation est quant à lui assuré par une tige filetée, muni d'une manivelle. L'insertion de cette tige dans un écrou permet de changer la position du capteur suivant la hauteur du soleil.

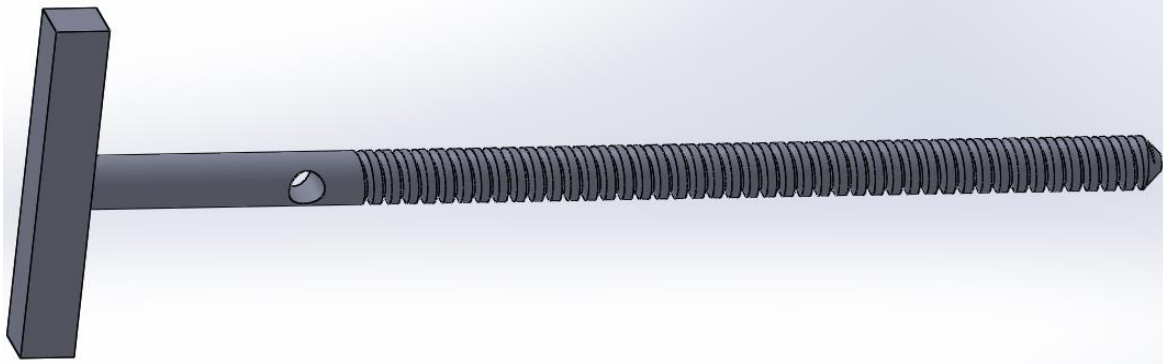


Figure 2. 12: Modèle de la tige filetée

II.5. Optimisation de la partie mécanique

II.5.1. Etude des mécanismes d'entraînement

La structure mécanique actuelle du système ne permet pas d'implémenter le plus facilement possible notre système de suivi. Une modification de cette partie mécanique est donc nécessaire. La partie mobile fera en grande partie l'objet de cette modification. En effet le système de suivi disposera des moteurs pour son entraînement, donc il est nécessaire d'avoir un mécanisme qui va permettre à l'arbre du moteur d'entraîner l'arbre de rotation du miroir. Un système d'engrenage ; de poulie courroie ; de vis sans fin ou de pignon chaîne peut jouer ce rôle.

- **Un système poulie-courroie** permet de véhiculer l'énergie mécanique entre deux arbres relativement distants. C'est la transmission de puissance la plus ancienne. Ce mécanisme présente un certains nombres d'inconvénients parmi lesquels l'usure de la courroie, glissement de la courroie, etc.

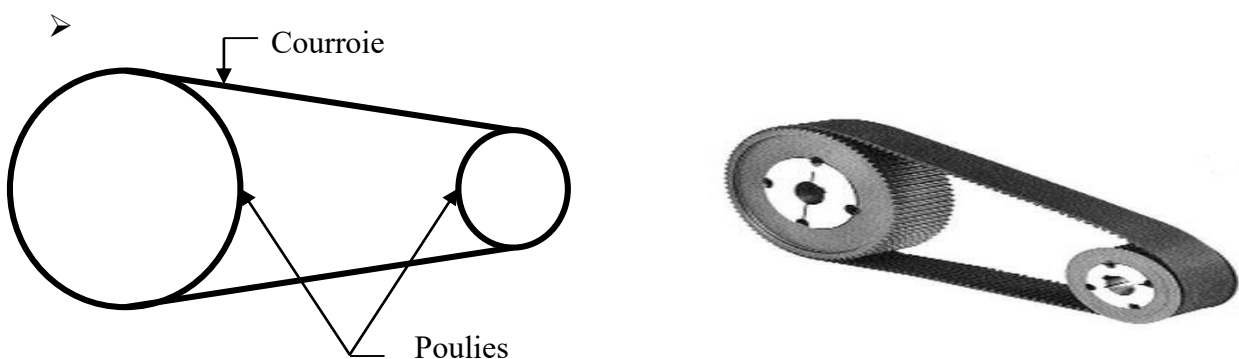


Figure 2. 13: système poulies-courroie

- Un **système pignon chaîne** quant à lui permet un rapport de vitesse entre deux pièces distantes mais cette fois-ci possédant des roues dentées. Seule son architecture ressemble à celle du système poulies-courroie, mais la transmission de puissance s'effectue par obstacle. Il a une longue durée de vie et supporte des conditions de travail plus rudes que les poulies courroie. En plus il ne présente pas de glissement et le sens de rotation peut facilement être inversé. Malheureusement ce mécanisme nécessite des entretiens comme la lubrification et en plus c'est un système bruyant. Il est essentiellement utilisé pour des vitesses réduites.

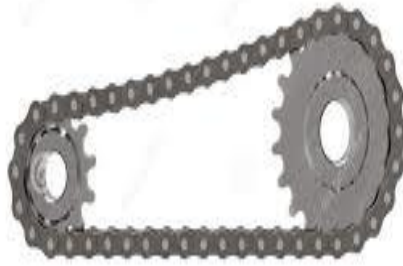


Figure 2. 14: système pignon-chaîne [17]

- Un **engrenage** peut être défini comme un ensemble composé de deux roues dentées qui s'interpénètrent de telle façon que l'une puisse entraîner l'autre en rotation ou en translation. Il existe plusieurs types d'engrenage. Ce système nécessite au niveau du pignon une puissance d'entraînement plus grande que le système pignon chaîne.



Figure 2. 15: système pignon-chaîne [17]

II.5.2.Choix et conception du mécanisme d'entraînement

Parmi les différents mécanismes d'entraînement étudiés, le système pignon-chaîne demeure le plus approprié vu ses avantages. En effet, il est bien adapté aux systèmes fonctionnant à vitesse

réduite. En plus ses inconvénients qui sont la lubrification, l'usure et le bruit ne peuvent constituer un grand problème pour ce suiveur solaire compte tenu de la faible vitesse de rotation de celui-ci.

Le système mécanique de ce four à double concentration sera constitué de deux système pignon-chaine pour son entrainement.

- Le premier entre l'arbre du moteur d'entrainement suivant l'azimut et l'arbre de rotation comportant le système d'enroulement ;

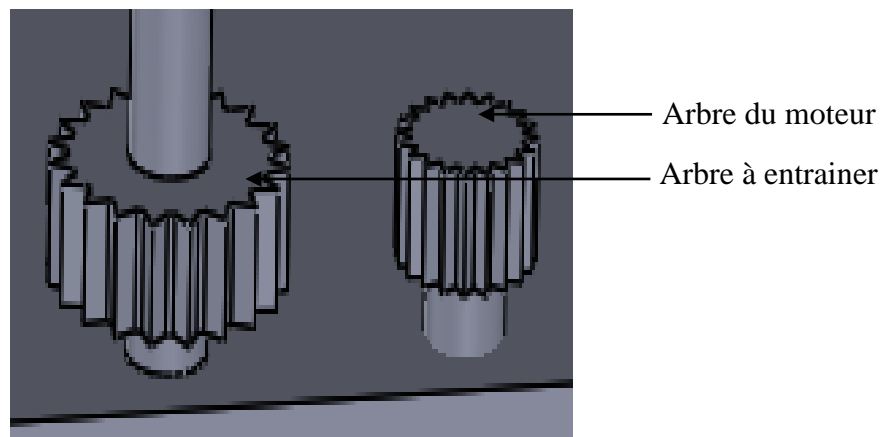


Figure 2. 16: système de rotation suivant l'azimut

- Le second entre l'arbre du moteur d'entrainement suivant la hauteur du soleil et le système assurant ce mouvement. Il convient ici de changer l'ancien mécanisme, celui de la tige filetée qui est manuel.

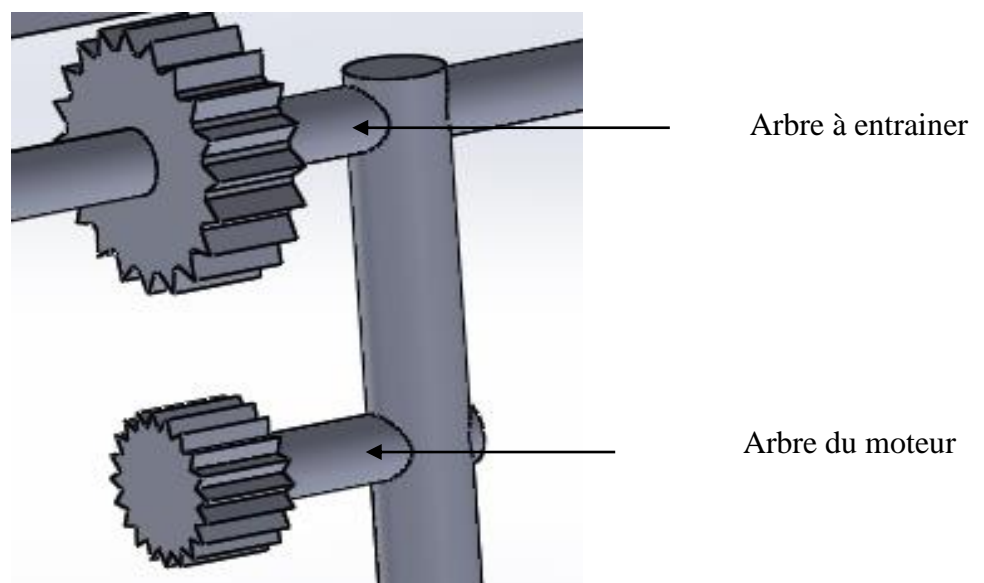


Figure 2. 17: système de rotation suivant la hauteur

II.5.3.Support mécanique

La structure mécanique du support doit être capable de supporter les différents éléments du système qui viennent de s'ajouter comme les moteurs d'entraînement et les systèmes de transmission de mouvement. La **Figure 2. 18** donne le modèle mécanique du four avec les modifications apportées.

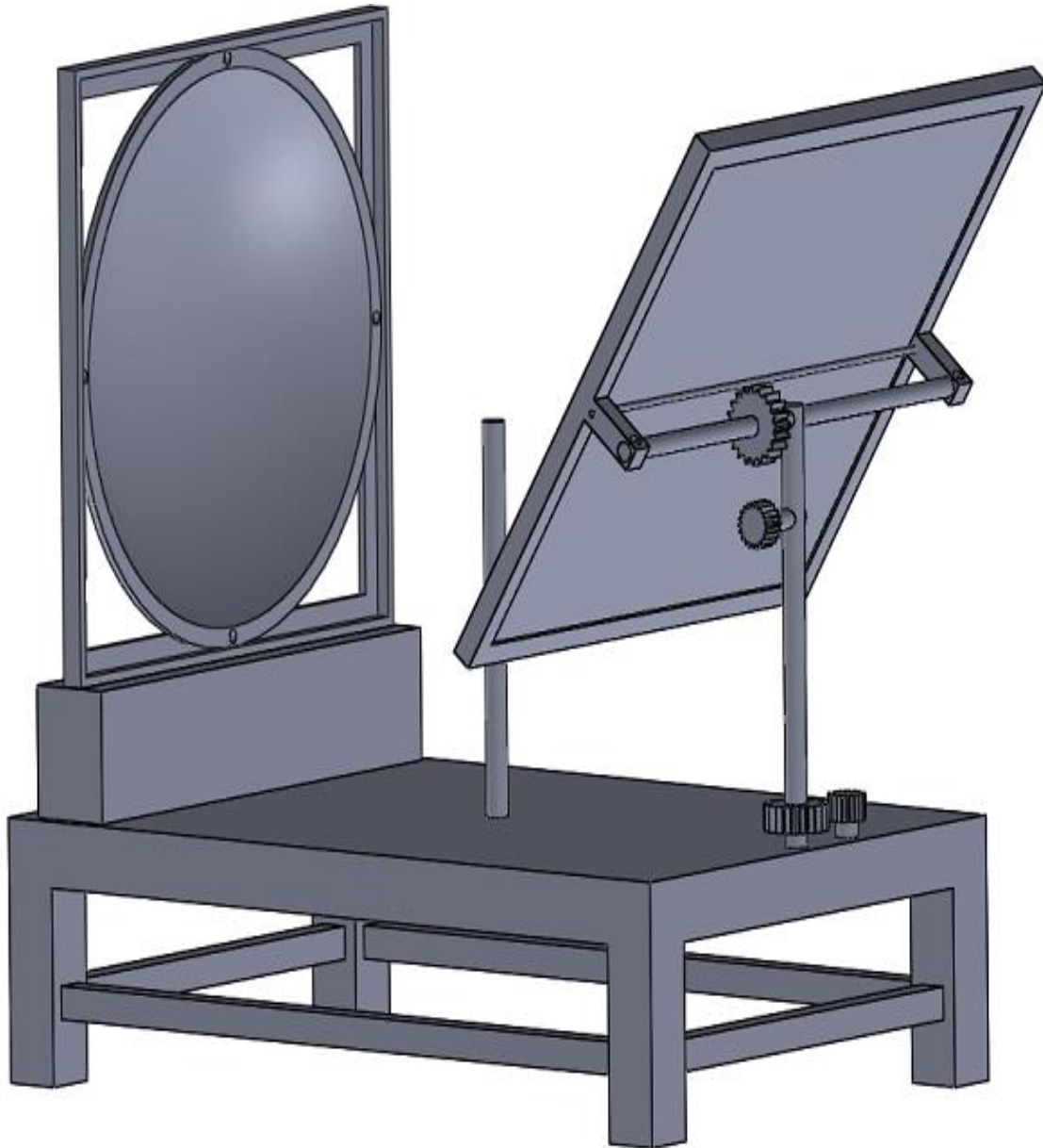


Figure 2. 18: système mécanique optimisé

CHAPITRE III : SUIVEUR SOLAIRE

L'algorithme ci-dessous décrit le principe général de la poursuite du soleil basée sur l'asservissement. Les moteurs peuvent toutefois être remplacés par d'autres actionneurs.

I.1.2 Organigramme du suiveur asservi

La **Figure 3. 2** donne un organigramme d'un suiveur asservi mono axial qui utilise deux détecteurs optoélectronique. Les tensions $V1$ et $V2$ sont les tensions délivrées par les deux détecteurs.

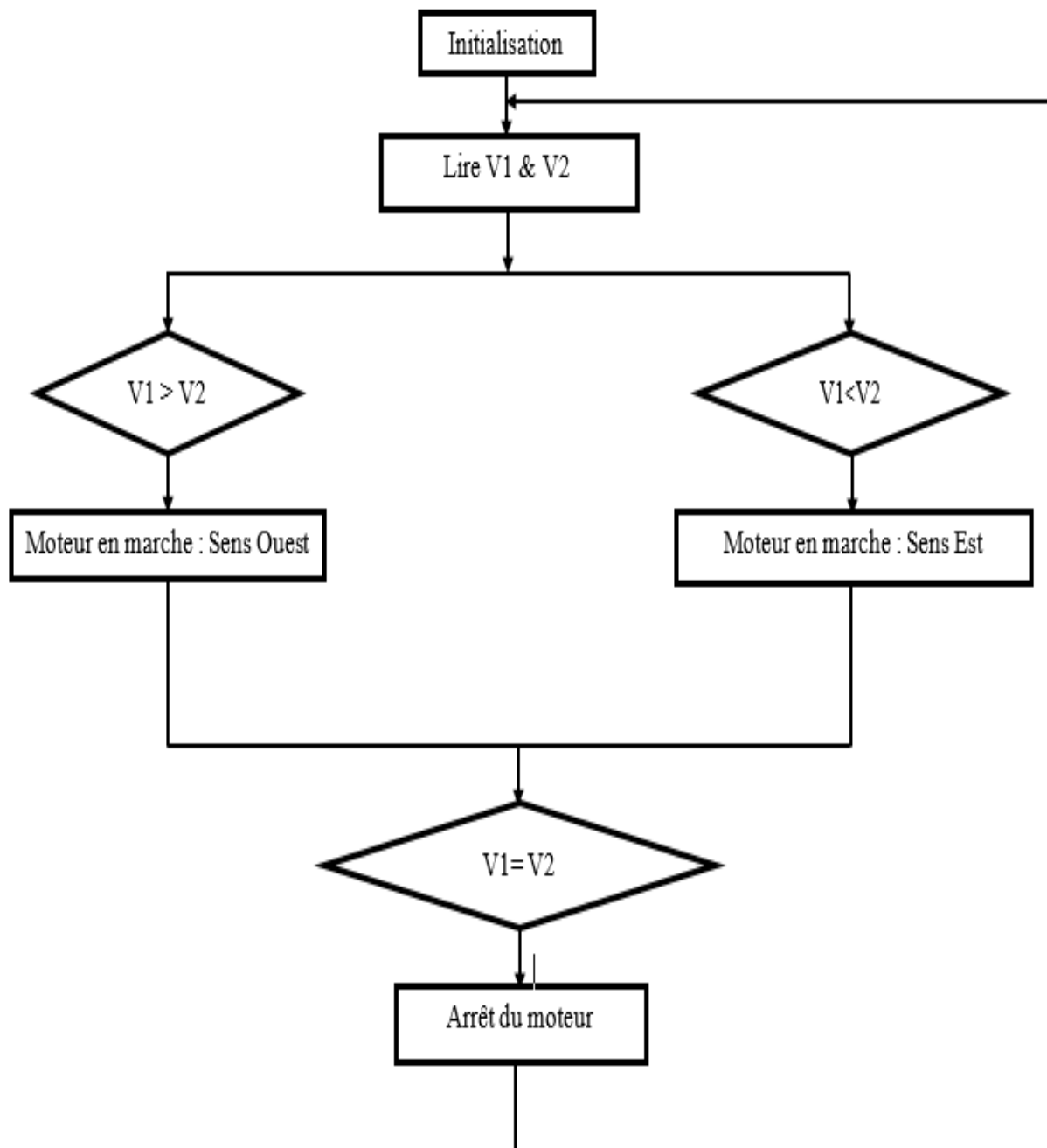


Figure 3. 2: Organigramme du suiveur asservi

I.2. Suiveur préprogrammé

I.2.1 Equation astronomiques

Contrairement au suiveur asservi, le suiveur préprogrammé utilise des équations mathématiques pour déterminer la position du soleil à tout instant et tous les jours de l'année. Ces équations sont fonction de la date, du jour, de la latitude et de la longitude du lieu considéré et sont données sous forme d'angle. Les deux angles principaux pour décrire la trajectoire du soleil sont la hauteur h du soleil et son azimut a . ces derniers sont données par les équations (3.1) et (3.2).

$$\sinh = \sin \varphi . \sin \delta + \cos \varphi . \cos \delta . \cos H \quad (3.1) \quad [10]$$

$$\sin a = (\sin \omega . \cos \delta / \cosh) \quad (3.2)$$

Où si on veut exprimer l'azimut indépendamment de la hauteur on a :

$$tga = (\sin H / (\sin \varphi . \cos H - \cos \varphi . tg \delta)) \quad (3.3) \quad [18]$$

φ : la latitude du lieu

δ : la déclinaison

H: l'angle horaire

La déclinaison δ peut être calculer approximativement pour n'importe quel jour par la formule de Cooper :

$$\delta = 23,45 \sin[360(284 + n) / 365] \quad (3.4) \quad [14]$$

Où n est le jour de l'année.

L'angle horaire ω s'exprime parfois en heures. A midi solaire on a $\omega = 0$. Chaque heure correspond à une variation de 15° , car la terre effectue un tour complet sur elle-même en 24 heures. Pour que les formule de h et a puisse être utilisables il faut relier l'angle horaire au temps légal.

$$H = (TSV - 12) * 15 \quad (3.5) \quad \text{en degré} \quad [14]$$

$$H = \pi(1 - TSV / 12) \quad (3.6) \quad \text{en radian}$$

Où TSV est le temps solaire vrai qui est donnée en fonction du temps légal par :

$$TSV = TL - DE + (Et + l) / 60 \quad (3.7) \quad [19]$$

TL : temps local (temps donné par une montre)

DE : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (+1 au Niger)

l : la longitude du lieu

Et : correction de l'équation des temps qui peut être calculé par la formule. En effet Le temps Et varie de -14.5 minutes (du 10 au 15 Février) à +16.5 minutes (du 25 Mars au 30 Octobre). Une bonne approximation du temps Et est donnée par l'équation (3.8).

$$Et = 9.9 \sin[2(0.986J + 100)] - 7.7 \sin(0.986J - 2) \quad (3.8) \quad [19]$$

La connaissance des relations (3.1), (3.2), (3.3) et (3.4) permet de déterminer la hauteur et l'azimut du soleil.

I.2.2 Principe du suiveur préprogrammé

Une fois que la hauteur et l'azimut sont déterminés, ce suiveur positionne le capteur solaire avec un angle d'incidence permettant d'avoir un bon rendement. La variation de cet angle d'incidence est liée à celle de l'angle d'inclinaison.

La **Figure 3. 3** donne, suivant le positionnement du capteur les deux angles qui sont :

- ◆ **Angle d'incidence** : il correspond à l'angle formé entre le plan du capteur et le rayon solaire. L'angle d'incidence optimal correspond à un angle de 90°.
- ◆ **Angle d'inclinaison** : il correspond à l'angle formé par le plan du capteur par rapport à l'horizontale. Cette déclinaison est donnée par l'équation (3.9)

$$\alpha = L - \sin^{-1}(0,4 * (360N / 365)) \quad (3.9)$$

Avec N le nombre de jour entre l'équinoxe de printemps (21 Mars de chaque année) et le jour considéré et L la latitude du lieu.

Le principe de ce suiveur est de déterminer, en fonction des données du lieu, la hauteur et l'azimut du soleil. Ensuite faire une comparaison de ces angles avec les angles de positionnement du capteur solaire et positionner le capteur à une angle d'incidence approximative de 90°.

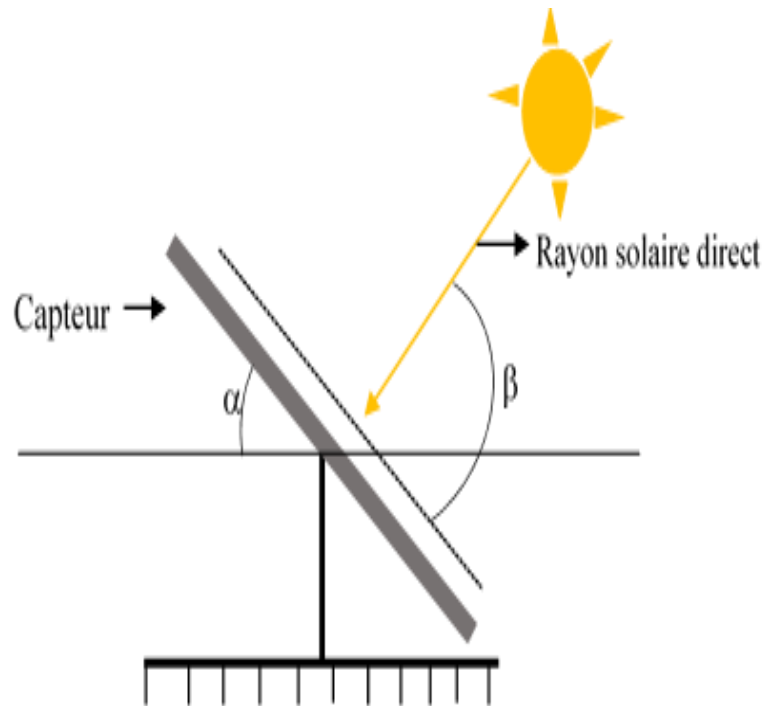


Figure 3. 3: angle d'incidence β et angle d'inclinaison α

I.2.3 Organigramme du suiveur préprogrammé

L'angle de référence ($\alpha_{\text{réf}}$) représente la déclinaison ou l'azimut calculé par les équations mathématiques et l'angle du capteur (α_m) est l'angle d'inclinaison de celui-ci qui permet d'avoir un angle d'incidence convenable.

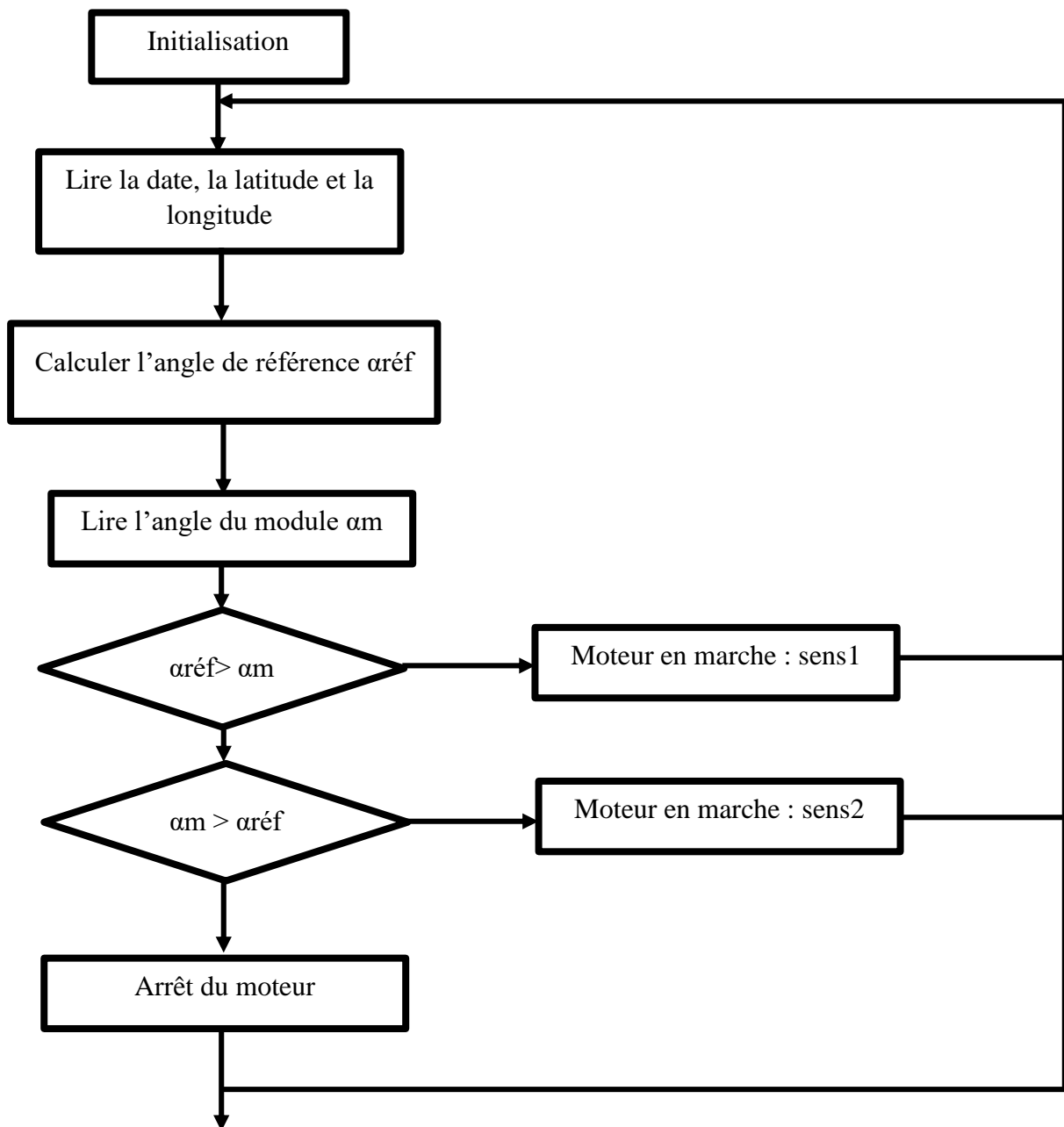


Figure 3. 4: Organigramme du suiveur préprogrammé

II. Etude du suiveur retenu

II.1. Choix du suiveur

Parmi les suiveurs actifs étudiés, le suiveur asservi présente une souplesse au niveau de la mise en œuvre et présente un certain nombre d'avantages de point de vue économique. En effet l'acquisition des éléments de ce dernier n'est pas difficilement accessible et son système optoélectronique permet une économie d'énergie comme mentionné plus haut.

II.2. Description du suiveur

II.2.1. Contraintes

Dans le cas de notre application, Une des contraintes à laquelle nous faisons face pour la réalisation de ce système est la double réflexion du four. En effet la parabole étant fixe et le miroir réflecteur mobile, l'angle de rotation du miroir doit être limité pour que le rayonnement issu de ce dernier soit toujours reflété sur la parabole.

Pour pallier ce problème de champ de réflexion, des capteurs de position seront prévus sur la trajectoire du miroir en servant de fin de course pour limiter son champ de rotation. Donc il ne s'agit pas ici d'avoir toujours un angle d'incidence de 90° , mais un angle permettant d'avoir une bonne réflexion sur la parabole. L'objectif est de programmer le système pour qu'une fois ces capteurs de position enclenchés, le système de détection optoélectronique ne puisse plus commander les moteurs.

Une autre contrainte serait de faire en sorte que le système ne soit pas actif dans la nuit ou lorsque le ciel est occulté par les nuages pour une éventuelle économie d'énergie. Ce problème sera résolu au niveau du circuit de détection.

La **Figure 3. 5** donne l'organigramme du suiveur asservi tenant compte des contraintes citées précédemment et utilisant un seul moteur pour le mouvement est-ouest du capteur solaire. Le mouvement nord-sud étant similaire.

Dans cet organigramme on a :

V1 : Tension de la photorésistance EST

VS : Tension de seuil délivrée par les photorésistances dans l'obscurité ;

V2 : Tension de la photorésistance OUEST ;

B2 : Bouton Poussoir EST

B1 : Bouton poussoir Ouest

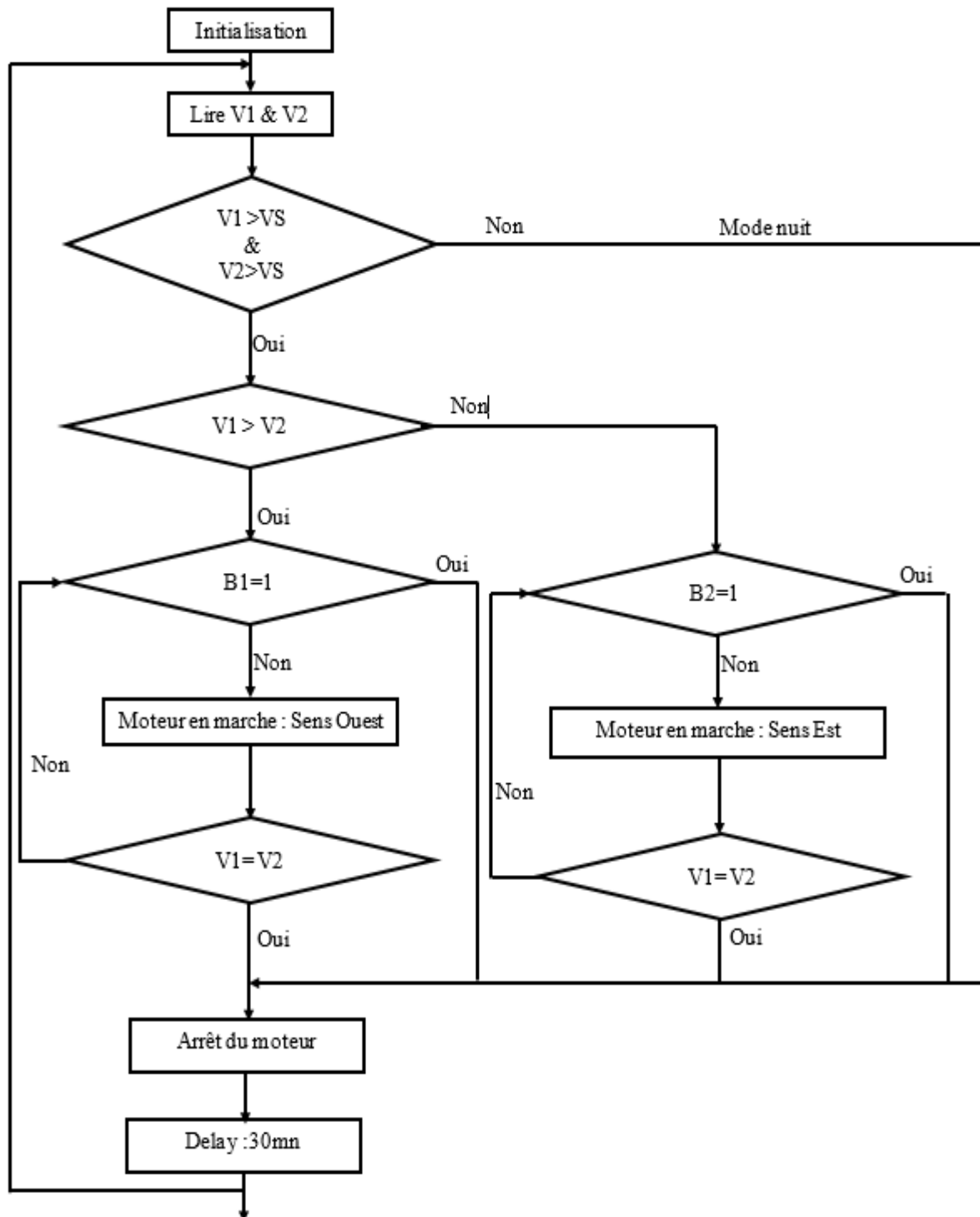


Figure 3. 5: organigramme de fonctionnement du suiveur [16]

III. Etude des différentes parties du suiveur

Le suiveur actif est constitué d'un certain nombre de parties dont les plus grandes sont la détection de la position du soleil, la commande du système et le circuit de puissance. A part la détection de la position du soleil qui diffère entre les suiveurs, les autres parties qui sont la commande et le circuit de puissance peuvent être les mêmes. Pour les systèmes asservis la

détection se fait par un système optoélectronique et par les équations astronomiques pour les systèmes préprogrammés.

III.1. La détection de la lumière

III.1.1. Détecteurs optoélectroniques

Les détecteurs de lumière sont des composants réalisés à base des semi-conducteurs. Les principaux matériaux utilisés pour leur conception sont le sulfure de cadmium (CdS), le sélénure de cadmium (CdSe), le tellure de cadmium (CdTe) ou le sulfure de plomb (PbS). Ils ont la propriété de libérer des électrons lorsqu'ils sont éclairés, donc la résistance diminue, ce qui augmente la conductivité en fonction de l'éclairement. Parmi les composants possédant cette propriété on retrouve : les photorésistances, les photodiodes, les phototransistors, etc. [20]

* Photorésistance

Connu aussi sous le nom de résistance photo-dépendante (light-dependent resistor-LDR) la photorésistance est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de l'augmentation ou de la diminution de l'intensité lumineuse.

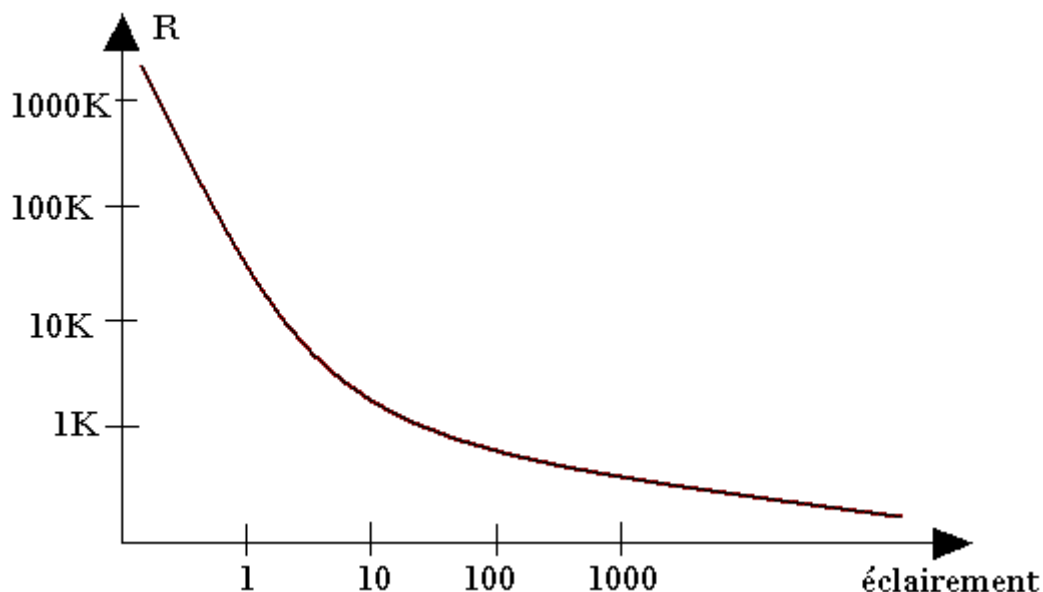


Figure 3. 6: Variation de la résistance en fonction de l'éclairement d'une photorésistance [17]

* Photodiode

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en un signal électrique. Elle peut être utilisée sous deux modes :

- Le mode photovoltaïque où à l'absence de polarisation elle génère une tension.

- Le mode photométrique qui est le mode de détection, où utilisé en polarisation inverse à l'intérieur d'un circuit, elle génère un courant directement proportionnel à l'intensité lumineuse.

* Phototransistor

Transistor dont la base est sensible aux rayonnements lumineux. L'éclairement de la base conduit à un photocourant que l'on peut nommer courant de commande du transistor. Ce courant sera nettement supérieur à celui de la photodiode et il rend donc le phototransistor plus sensible. En revanche cela a pour effet négatif d'augmenter le courant d'obscurité. Un autre problème est que la constante de temps d'un phototransistor est bien plus élevée que celle de la photodiode [20]

III.1.2 Choix du dispositif de détection

Le choix du détecteur s'est porté sur la photorésistance, parce que cette dernière à un temps de réponse supérieur à celui de la photodiode et que le transistor à un courant d'obscurité élevé avec une constante de temps plus élevée que celle de la photodiode

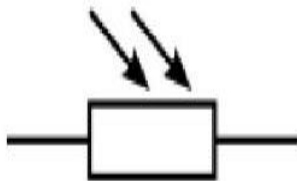


Fig.3.7.a :symbole



Fig.3.7.b :image [17]

Figure 3. 7: Symbole et image d'une photorésistance

III.1.3. Description du dispositif

Les quatre détecteurs sont placés dans un plan, suivant les quatre points et séparés par une paroi opaque. La **Figure 3. 8** montre le positionnement des quatre photorésistances séparées par une paroi opaque en forme de croix. Les photorésistances d'Est et d'Ouest permettent la commande du moteur pour le positionnement suivant l'azimut et celles du Sud et du Nord contrôlent la hauteur du soleil.



Figure 3. 8: Emplacement des détecteurs de lumière

III.1.4. Schéma électrique du détecteur de lumière

La tension délivrée par un des détecteurs est donnée par le pont de la **Figure 3. 9**.

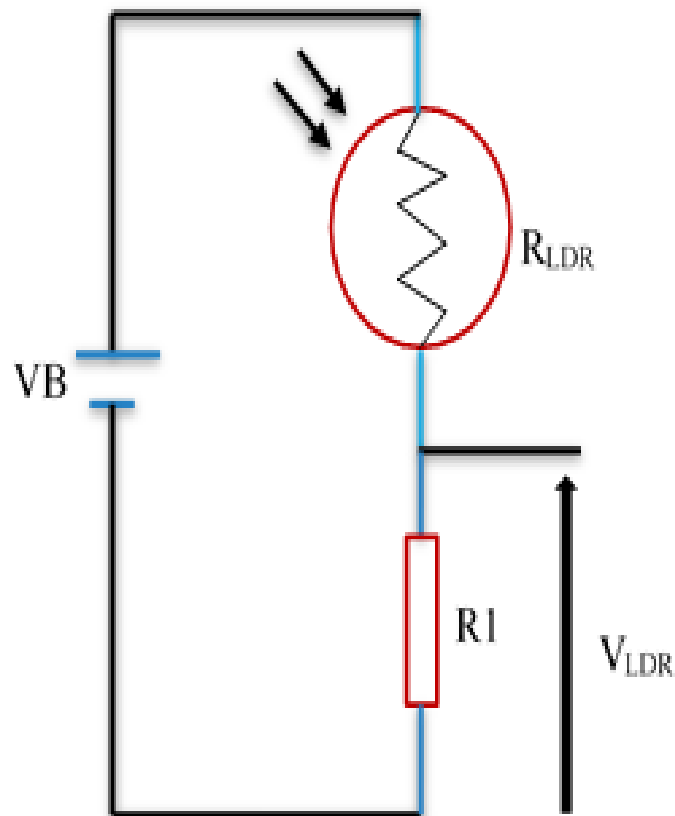


Figure 3. 9: Circuit de détection

La tension de sortie du détecteur (V_{LDR}) est la tension au niveau de l'entrée analogique de la carte de commande. Cette tension doit être au maximum égale à 5V qui correspond à la tension admissible par l'entrée analogique. Elle dépend des valeurs de la résistance $R1$ et de celle de la

photorésistance. Pour le choix de ces composants la méthode adoptée consiste à fixer la valeur de R_1 et à déterminer celle de R_{LDR} . Ce choix doit en plus nous permettre d'effectuer la commande suivant le mode jour ou le mode nuit.

La tension délivrée par le pont correspond à :

$$V_{LDR} = \frac{V_B \cdot R_1}{R_{LDR} + R_1} \quad (3.10)$$

III.1.5. Fonctionnement du circuit de détection

Figure 3. 10 est une plaque réalisée à partir du logiciel de conception SolidWorks représentant le support des détecteurs optoélectronique. La rotation de cette plaque doit être coaxiale avec celle du miroir pour que celui-ci puisse suivre la position du soleil de la même manière qu'elle. La paroi opaque est la partie qui permet de mettre sous l'ombre une photorésistance suivant le changement de position du soleil.

La **Figure 3. 11** donne les positions possibles des photorésistances face au soleil. La deuxième étant la position optimale, représente donc celle cherchée approximativement par les détecteurs à tout instant.

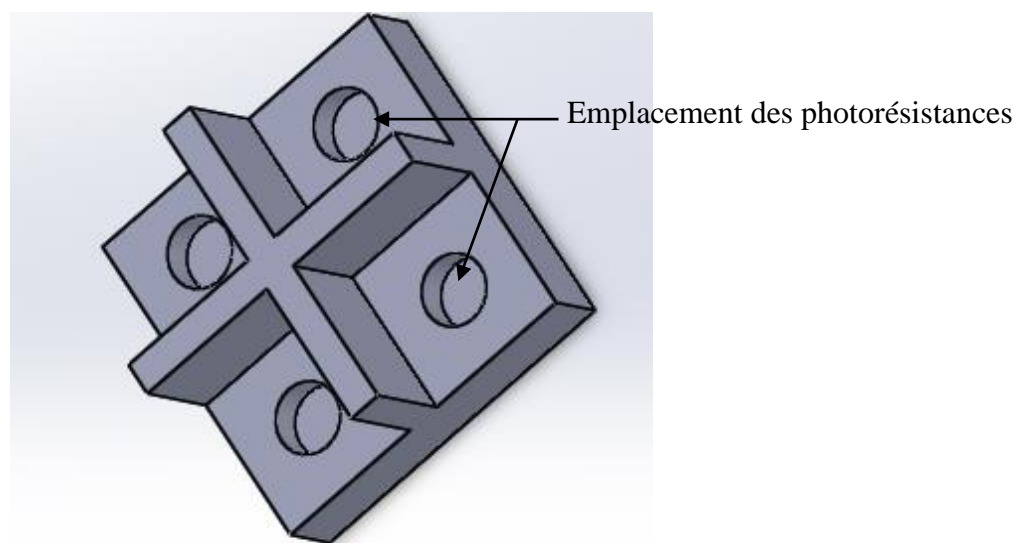


Figure 3. 10: supports des détecteurs optoélectronique

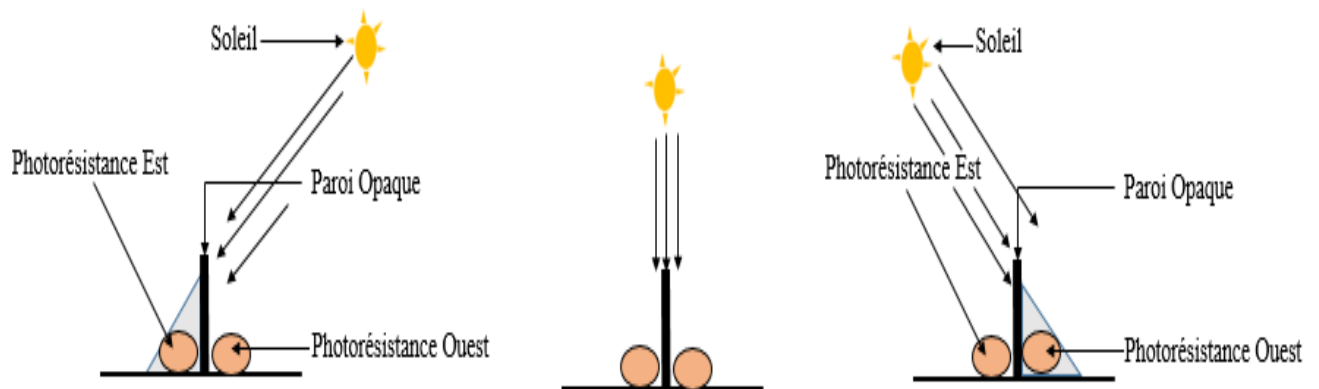


Figure 3. 11: principe de la détection

III.2. Circuit de commande

Le circuit de commande reçoit et analyse les signaux des détecteurs pour ensuite élaborer la commande des moteurs. Cette dernière peut être à base d'un microcontrôleur, d'une carte à microcontrôleur ou uniquement à base des amplificateurs. La carte à microcontrôleur peut être privilégiée compte tenu de la souplesse de son système d'alimentation et surtout la programmation et le transfert du programme. Contrairement au microcontrôleur qui nécessite quant à lui l'acquisition d'un programmeur des microcontrôleurs et en plus d'un logiciel de programmation. L'élément choisi pour assurer cette fonction est la carte à microcontrôleur dont le choix s'est porté sur la carte Arduino qui est la platine de développement la plus abordable et la plus répandue sur le marché.

Elle possède un certain nombre d'avantages :

- ✓ Prix moins cher sur le marché
- ✓ Environnement de programmation clair et simple.
- ✓ Multi plate-forme : tourne sous Windows, Macintosh et Linux.
- ✓ Nombreuses bibliothèques disponibles avec diverses fonctions implémentées.
- ✓ Logiciel et matériel open source et extensible.
- ✓ Etc.

III.2.1. La carte Arduino

La carte de développement Arduino est une plateforme matérielle et logicielle de développement d'applications. Côté matériel, elle se compose d'une carte électronique basée autour d'un microcontrôleur. Il existe un grand nombre de platines compatibles, tout comme il

existe des nombreux modèles d'Arduino officiels à savoir Arduino Uno, Arduino Due, Arduino Esplora, etc. [21]

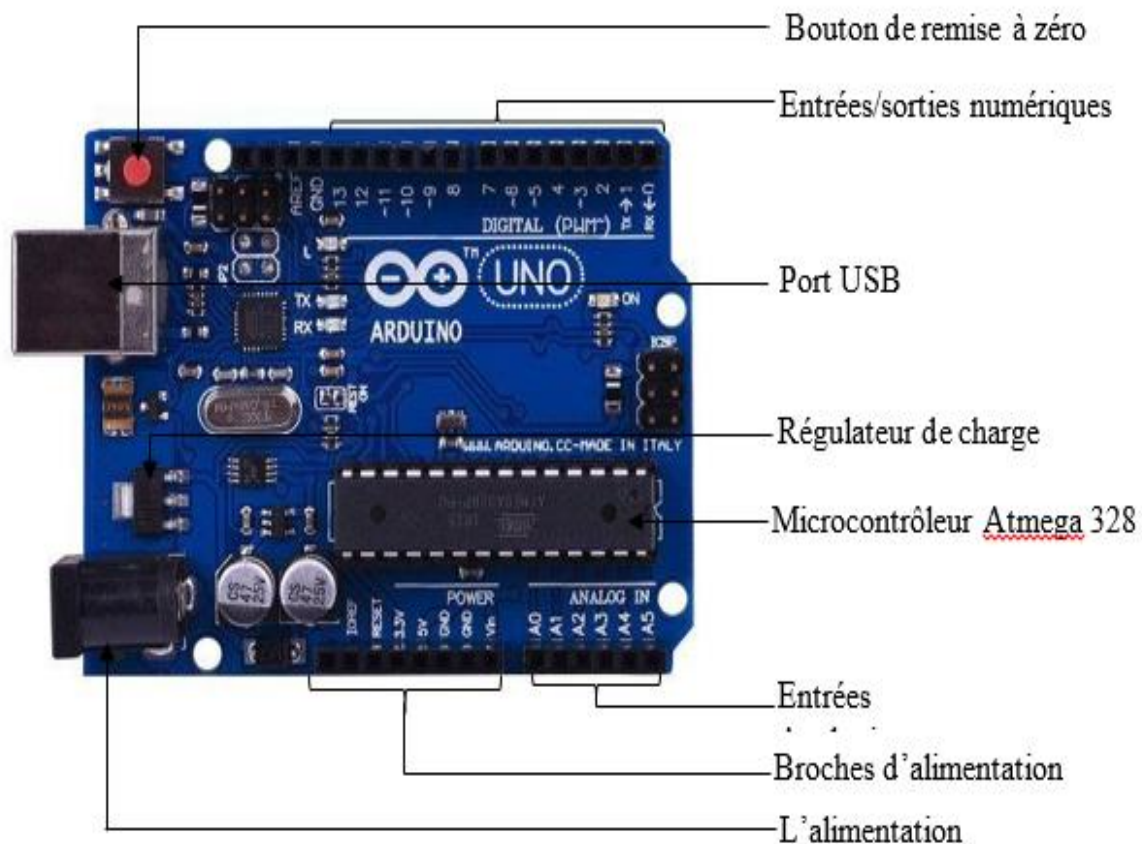


Figure 3. 12: Carte Arduino [17]

La version majeure de la cartes Arduino est la carte arduino Uno. Cette carte est constituée de plusieurs parties lui permettant d'être alimenter, de stocker des programmes, d'établir une connexion et de communiquer avec les éléments extérieurs.

- * **Le microcontrôleur** : c'est le cerveau de la carte. Il va recevoir et stocker le programme dans sa mémoire avant d'exécuter les instructions. Grâce à ce programme il va savoir faire des choses telles que : envoyer des données à un ordinateur, commander la marche ou l'arrêt d'un moteur par l'intermédiaire de ces broches. Le microcontrôleur de la carte Arduino Uno est un **ATMega328**. C'est un microcontrôleur ATMEL de la famille AVR 8bits.
- * **L'alimentation** : la carte Arduino nécessite une alimentation pour son fonctionnement. Cette alimentation peut se faire de deux manières ; à travers le port USB à la tension d'alimentation de la carte qui est de 5V, ou par une alimentation externe de 7-12V. La source d'alimentation est automatiquement sélectionnée. Une alimentation externe peut provenir soit d'un adaptateur AC-DC ou d'une batterie.

- * **Le régulateur de charge** : stabilisation de la tension d'alimentation externe à 5V.
- * **Entrées/Sorties** : Le rôle des broches est la connexion avec des composants utilisables par le programme par l'intermédiaire des fils de pin D'Arduino. Les entrées/sorties peuvent être de deux types :
 - ✓ Analogiques : les entrées/sorties analogiques peuvent détecter plusieurs valeurs comprises entre 0 et 5V. la carte arduino Uno possède 6 broches analogiques allant de A0 à A5.
 - ✓ Numériques : contrairement aux analogiques, ces entrées/ sorties ne peuvent détecter que deux niveaux ; le niveau haut (correspondant à 5V) et le niveau bas (correspondant à 0v). Cette carte possède 14 ports numérique de 0 à 13.

III.3. Le circuit de puissance

Le niveau logique haut des ports numériques de la carte Arduino qui est de 5V ne permet pas à lui seul de commander des appareils de grande puissance, d'où la nécessité d'interconnecter la carte Arduino à des actionneurs par l'intermédiaire d'un circuit de puissance. Les transistors ou les amplificateurs opérationnels peuvent assurer cette fonction. Nous avons, dans le présent travail à commander un moteur à courant continu dans les deux sens de rotation, qui correspond à un besoin de 4 amplificateurs ou transistors. Pour éviter la pléthore des composants électronique et des fils de connexion, il existe des circuits intégrés pouvant assurer à eux seuls cette fonction ; c'est le cas du L293D.

III.3.1. Le circuit intégré L293D

C'est un composant électronique permettant la commande des charges inductives comme les moteurs à courant CC ou pas à pas. Comme tout circuit intégré, il est composé de plusieurs broches pour la connexion avec d'autres interfaces. Il permet de gérer la puissance et la direction du moteurs grâce à un de ces pont-H intégrés.

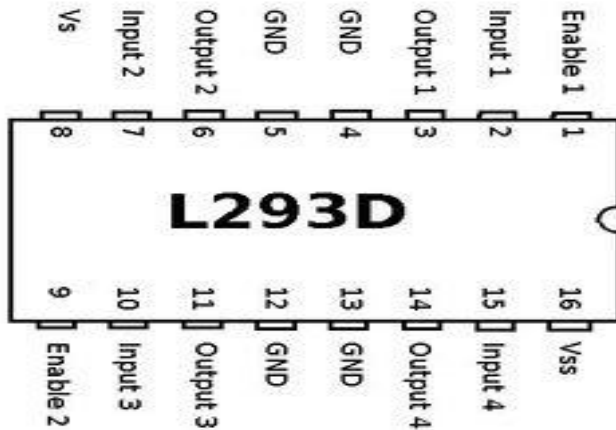


Fig.3.13.a :brochage



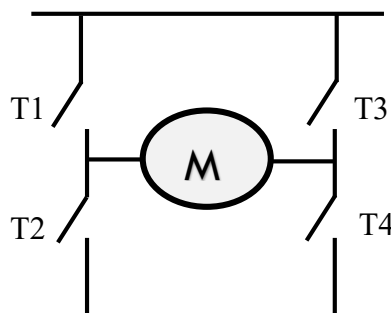
Fig.3.13.b : Image

Figure 3. 13: Brochage et Image du L293D [17]**Tableau 1:** Description du brochage du L293D

Broches		Description
Nom	Numéro	
Enable « 1 :2 »	1 ; 9	Commande l'activation du pont H ₁ et H ₂
Input « 1 :4 »	2 ;7 ;10 ;15	Broches de commande du pont H
Output « 1 :4 »	3 ;6 ;11 ;14	Broches à accorder à la charge(le moteur)
Vs	8	Alimentation de puissance des moteurs
Vss	16	Alimentation de la logique de commande(5V)
GND« 1 :4 »	4 ;5 ;12 ;13	La masse

III.3.2. Principe de fonctionnement du pont H

Le circuit L293D possède deux pont-H pour la commande des charges inductives. Un pont-H permet de commander un moteur dans les deux sens de marche en inversant les bornes d'alimentation de celui-ci. Le principe de ce pont est le suivant avec les diodes de protections anti-retours.

**Figure 3. 14:** Variation de sens du moteur par pont en H

La variation de sens de moteur à l'aide du pont en H s'effectue comme suit :

Les interrupteurs fonctionnent deux par deux, le T1 est associé à T4 et le T2 est associé à T3.

- Les interrupteurs T1 et T4 fermés, le courant entre par T1 puis au moteur et sort par T4 donc le moteur tourne dans le sens avant
- Les interrupteurs T2 et T3 sont fermés, le courant entre par T3 et sort par T2 d'où le moteur tourne dans le sens inverse.
- Si on ferme tous interrupteurs c'est-à-dire T1, T2, T3 et T4 en même temps conduit à un court-circuit qui peut facilement détruire notre composant (le pont en H).

III.4. Le moteur à courant continu

Un moteur est un convertisseur électromécanique qui permet de faire la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Pour entraîner la charge qui est le capteur solaire, un moteur est utilisé en tenant compte des exigences mécaniques de la charge à entraîner. Le moteur à courant continu est le plus convenable car le contrôle de la vitesse de ce dernier est plus simple, moins coûteux et couvre une gamme de vitesse plus étendue que les systèmes de commande de vitesse des moteurs CA. Ces moteurs sont déterminés par une grande variété de caractéristique de fonctionnement qui les rend pratiquement aptes à tous les emplois. Ce choix se base surtout sur la source d'alimentation du moteur qui doit être indépendante du réseau et en plus une régulation de la vitesse est nécessaire.

Le miroir à entraîner dispose d'un poids approximatif de 70kg, mais le poids de cette charge est très réduit par le système d'enroulement. Même un servomoteur de petite puissance peut l'entraîner. Mais ce dernier est surtout utilisé dans le cas où une bonne précision d'angle est nécessaire, contrairement à notre système. Donc nous avons opté pour un mini moteur à courant continu pour l'entraînement du système.

La puissance du moteur est :

$$P = F.V \quad (3.11)$$

$$F = m.g \quad (3.12)$$

Donc $P = m.g.V \quad (3.13) \quad [22]$

III.5. Réducteur de vitesse

L'axe de rotation d'un moteur à courant continu tourne à une vitesse définie souvent trop élevée dans certaines applications. Pour pouvoir les utiliser, comme dans le cas de la poursuite solaire par exemple, un réducteur de vitesse est très nécessaire. Il existe plusieurs types des réducteurs

qui peuvent être des systèmes mécaniques ou électroniques. Pour les systèmes mécaniques, une large gamme des réducteurs est proposée par différents constructeurs avec un rapport de vitesse pour chacun généralement sous forme de motoréducteurs.

En plus pour faire varier la vitesse d'un moteur on peut faire varier la tension d'alimentation à ses bornes mais dans ce cas une partie importante de l'énergie est consommée par le dispositif d'alimentation. Il est donc préférable de l'alimenter de façon discontinue avec un hacheur et faire ainsi varier la tension moyenne à ses bornes. On parle alors de Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI), ou Pulse Wide Modulation (PWM). La carte Arduino dispose de sortie PWM dédiées à cet usage.

III.6. Dimensionnement de l'alimentation du moteur

Le moteur à courant continu requiert une source d'alimentation continu. Une batterie est prévue à cet effet. Pour assurer l'alimentation de cette batterie en continu et avec un contrôle régulier un panneau solaire et un régulateur de charge seront nécessaires ; le panneau pour charger la batterie et le régulateur pour contrôler sa charge et décharge.

Le principe du présent dimensionnement consiste entre autre à :

- Estimer les besoins journaliers en électricité
- Estimer la capacité de stockage
- Estimer l'irradiation journalière
- Déterminer la puissance crête
- Etc.

III.6.1. Estimation des besoins journaliers en électricité

Tableau 2 : consommation journalière du moteur

Infrastructure	Nbre appareils électrique	P(w)	Pt(w)	Utilisation(heure)	Consommation journalière totale
Moteur DC	2	P/η	$2 P/\eta$	10heure	$2 P/\eta * 10$

III.6.2. L'irradiation journalière

Selon le degré de pertinence par rapport à d'autres sources, la position géographique du Niger fait que le potentiel solaire est le gisement qu'on trouve abondamment, avec un gisement solaire moyen de 5 à 7 kWh/m²/j et une durée d'ensoleillement moyen de 7 à 10h par jour [23].

III.6.3. Détermination de la puissance crête

La puissance crête d'une installation photovoltaïque, aussi appelée puissance nominale, désigne la puissance maximale que celle-ci peut délivrer. On parle ainsi de watts crête (Wc) ou watt peak (Wp) en anglais.

La formule de base pour la détermination de la puissance crête nécessaire pour un système PV est donné par :

$$P_c = \frac{E_g \cdot 1000}{E_{sol} \cdot C_p} \quad (3.14) \quad [24]$$

P_c : Puissance crête (w) ; E_g : Energie globale (Wh/j) ; E_{sol} : Energie d'ensoleillement du mois le plus défavorable ; C_p : facteur de conversion appliquée pour tenir compte des différentes

III.6.4. Choix de la tension de fonctionnement

Tableau 3: Tableau de tension recommandé en fonction de la puissance crête

Puissance crête (Kwc)	Tension de sortie recommandée (v)
0 - 0.5	12
0.5 - 2	24
2 - 10	48
>10	>48

III.6.5. Estimation de la capacité de stockage

L'estimation de la capacité de stockage requise en Ah est fonction de l'autonomie désirée. On détermine cette durée d'autonomie afin d'alimenter les récepteurs sans l'aide des modules PV.

La charge totale de la batterie doit être :

$$Charge_{batterie} \geq \frac{B_j \cdot autonomie}{tension \cdot degré \ de \ decharge} \quad [24]$$

III.6.6. Choix du régulateur de tension

Pour dimensionner le régulateur il faut prendre en considération trois (3) éléments principaux :

- La tension nominale entre les panneaux et les batteries. Le régulateur doit pouvoir accepter cette tension en générale 12V, 24V ou 48V.
- L'intensité maximale du régulateur (courant d'entrée) : cette intensité doit être supérieure à la tension de court-circuit du ou des panneaux solaires auxquels il est relié. Cette donnée est indiquée sur la notice de chaque module. Il est recommandé de prendre 1.5 fois le courant de court-circuit total.

- L'intensité maximale de sortie : elle ne concerne que les régulateurs charge-décharge qui doivent accepter le courant maximale fournit par le récepteur. Cette intensité doit prendre en compte également le courant transitoire élevé produit lors de démarrages des appareils électriques.

$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{U} \cdot 1,5 \quad (3.15) \quad [24]$$

CHAPITRE IV : SIMULATION ET RESULTATS

Les quatre photorésistances (LDR1, LDR2, LDR3 et LDR4) sont des détecteurs de lumières qui sont utilisés pour détecter la position du soleil à tout instant. Une différence d'éclairement entre ces deux détecteurs est traitée au niveau de la carte pour élaborer une commande.

Les quatre boutons (EST, OUEST, SUD et NORD) sur le schéma représentent les capteurs de fin de course Est et Ouest qui limite l'angle balayé par le panneau au cours de sa rotation. En effet une fois un de ces capteurs actionnés, la différence d'éclairement n'a aucun effet sur la commande des moteurs.

II. Programme

Le programme de commande du suiveur solaire est élaboré en utilisant le logiciel de programmation Arduino. C'est un logiciel de programmation par code, code qui contient plusieurs commandes différentes.

La méthode d'enregistrement du programme sur la carte se fait suivant des étapes. D'abord la conception programme sur le logiciel arduino, puis sa vérification par compilation avant son transfert dans la carte via le port série. Mais par manque de la carte arduino à notre disposition, nous avons opté de tester ce programme par la simulation. C'est ainsi notre programme peut être compilé et testé sur ISIS PROTEUS par la création d'un lien logiciel entre Arduino et ISIS. Le programme est en fait constitué de trois grandes parties à savoir la déclaration des variables, la configuration des ports et le corps du programme ci-dessous un aperçu du programme de commande du suiveur

```
int IN1=13;
int IN2=12;
int IN3=7;
int IN4=6;
int BoutonEst=2;

tensionLDR4=(valeurLDR4*5)/1024;
if(tensionLDR1==tensionLDR2)

{digitalWrite (IN1, HIGH);
digitalWrite (IN2, LOW);}
```

III. Fonctionnement

Le fonctionnement du circuit de commande est fonction de l'état des quatre photorésistances. Les figures ci-dessous présentent le fonctionnement en mode nuit et un des fonctionnements en mode jour.

Pour le mode nuit présenté à la **Figure 4. 2**, aucune des photorésistances n'est éclairée, donc aucune des tensions au bornes des deux moteurs et le système est à l'arrêt.

En mode jour sur la **Figure 4. 3**, la LDR1 et la LDR2 sont éclairées, mais de la même manière. Aucune tension aux bornes du moteur M1, la position est optimale. La LDR4 est plus éclairée que la LDR3, présence de la tension aux bornes du moteur M2 pour rechercher la position optimale.

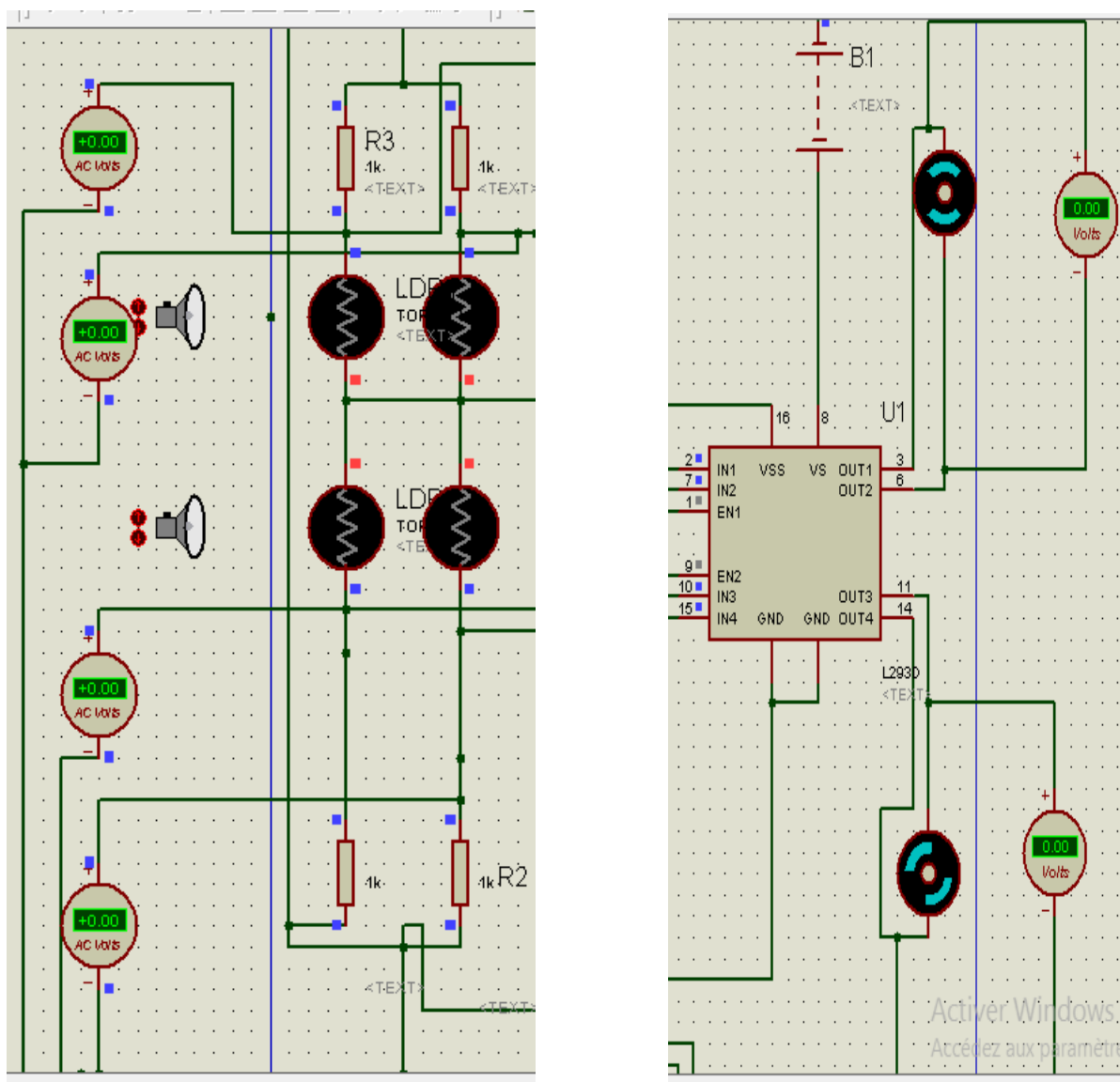


Figure 4. 2: Mode nuit

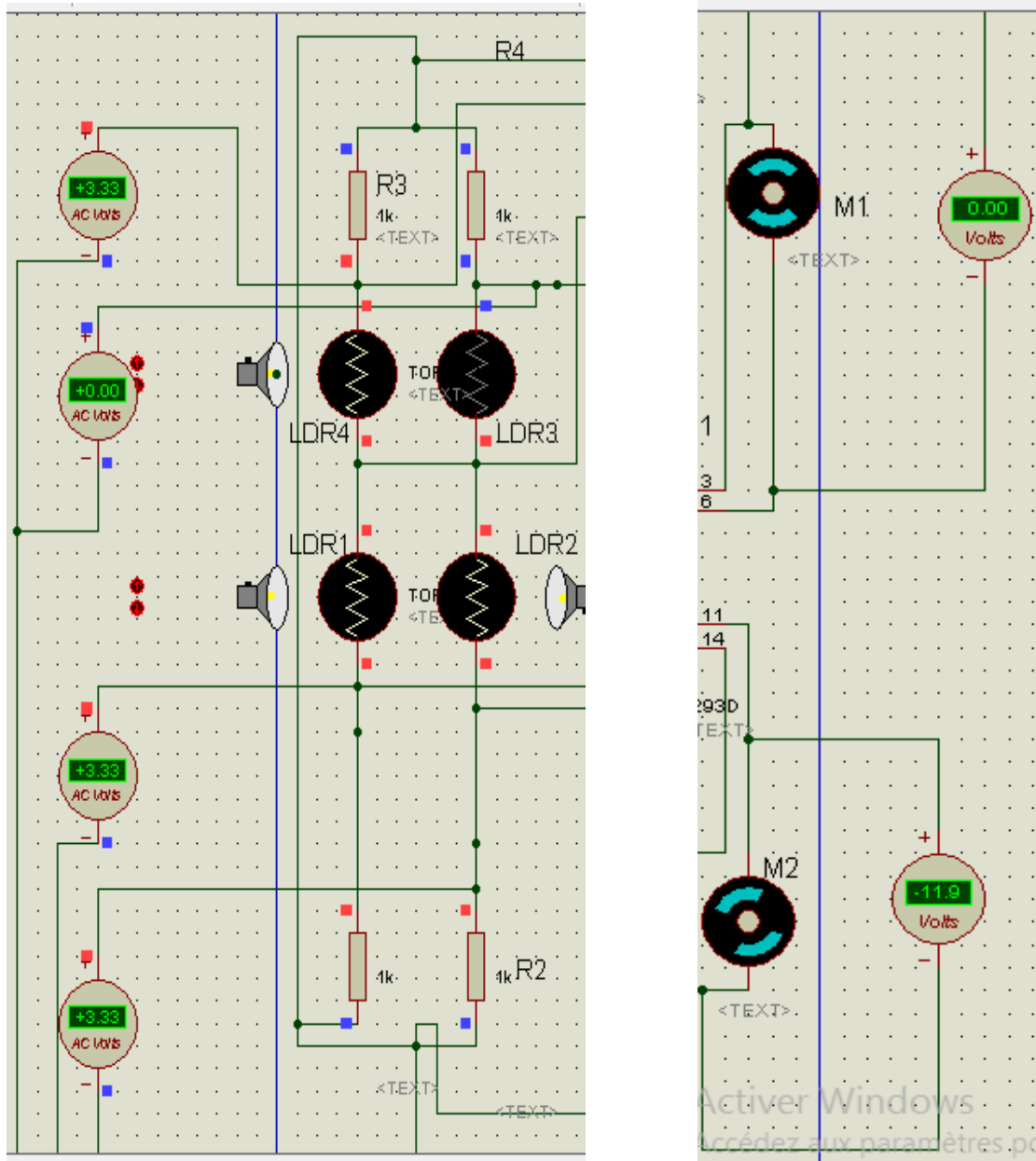


Figure 4. 3: mode jour sans capteur de fin de course

Conclusion

L'objectif du présent travail est de concevoir un système de suivi solaire automatique pour un four à double concentration, ceci dans le but de mieux exploiter l'énergie solaire disponible et d'améliorer les performances du four. Pour atteindre cet objectif d'une manière claire et dans le délai imparti, le travail est réalisé en différentes parties.

Dans la première partie après avoir fait une étude bibliographique sur le thème en question, la structure de la partie mécanique du four a été modifiée par le logiciel de conception SOLIDWORKS pour faciliter l'implémentation du système de suivi.

Dans la partie principale, nous avons conçu un système de poursuite asservi, dans lequel un programme élaboré et associé à une carte électronique (carte arduino) permet de piloter le système.

En fin la simulation avec le logiciel ISIS Proteus nous a permis de visualiser le bon fonctionnement de la partie électronique du système de suivi solaire.

Ce projet de fin de cycle nous a permis entre autre de faire un travail multidisciplinaire, d'avoir une vision un peu plus précise du monde scientifique, pour ne citer que ceux-là.

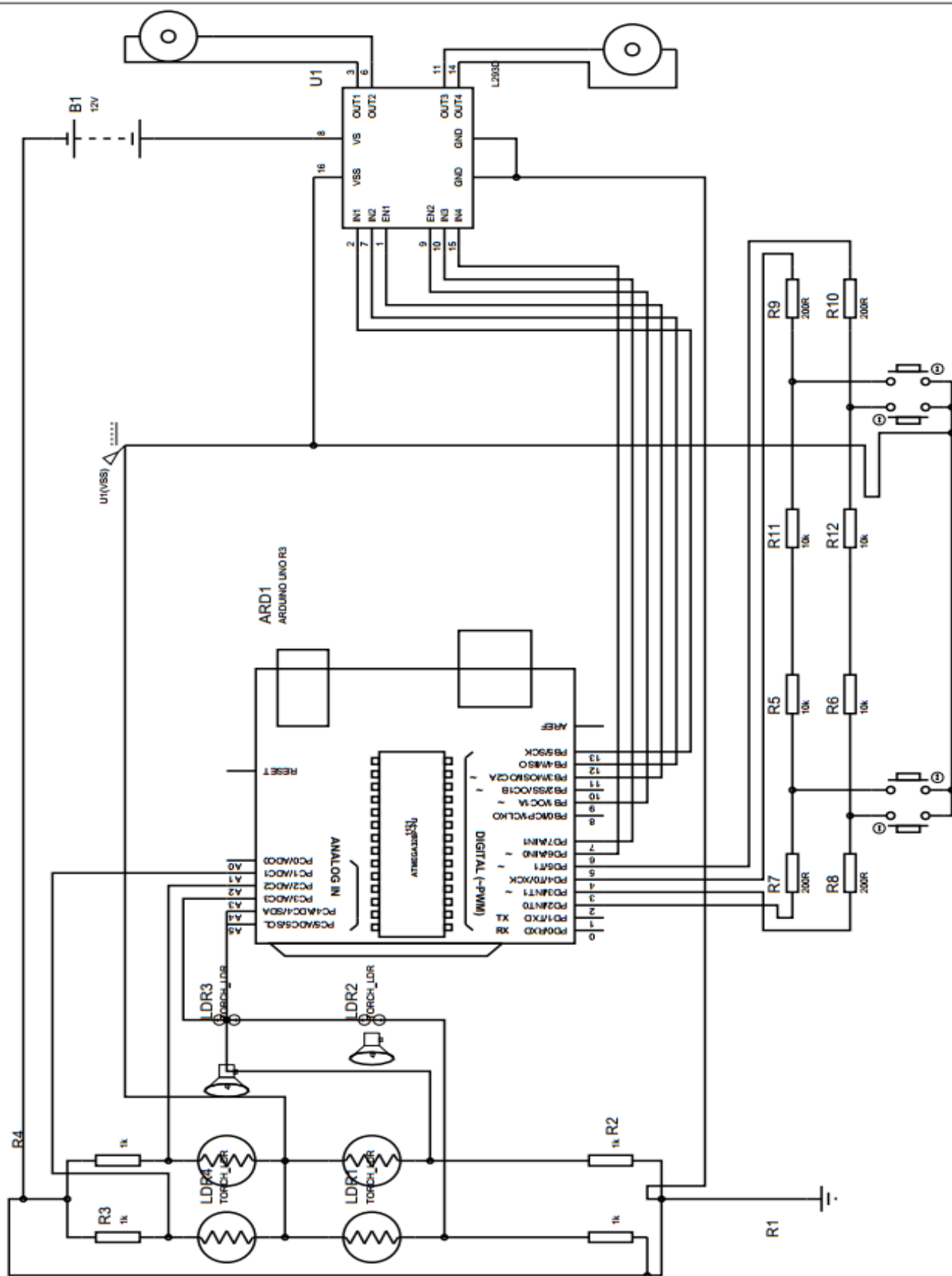
En perspectives nous projetons après la réalisation de ce système, une étude visant à confirmer l'importance de ce système dans l'amélioration des performances du four.

Références

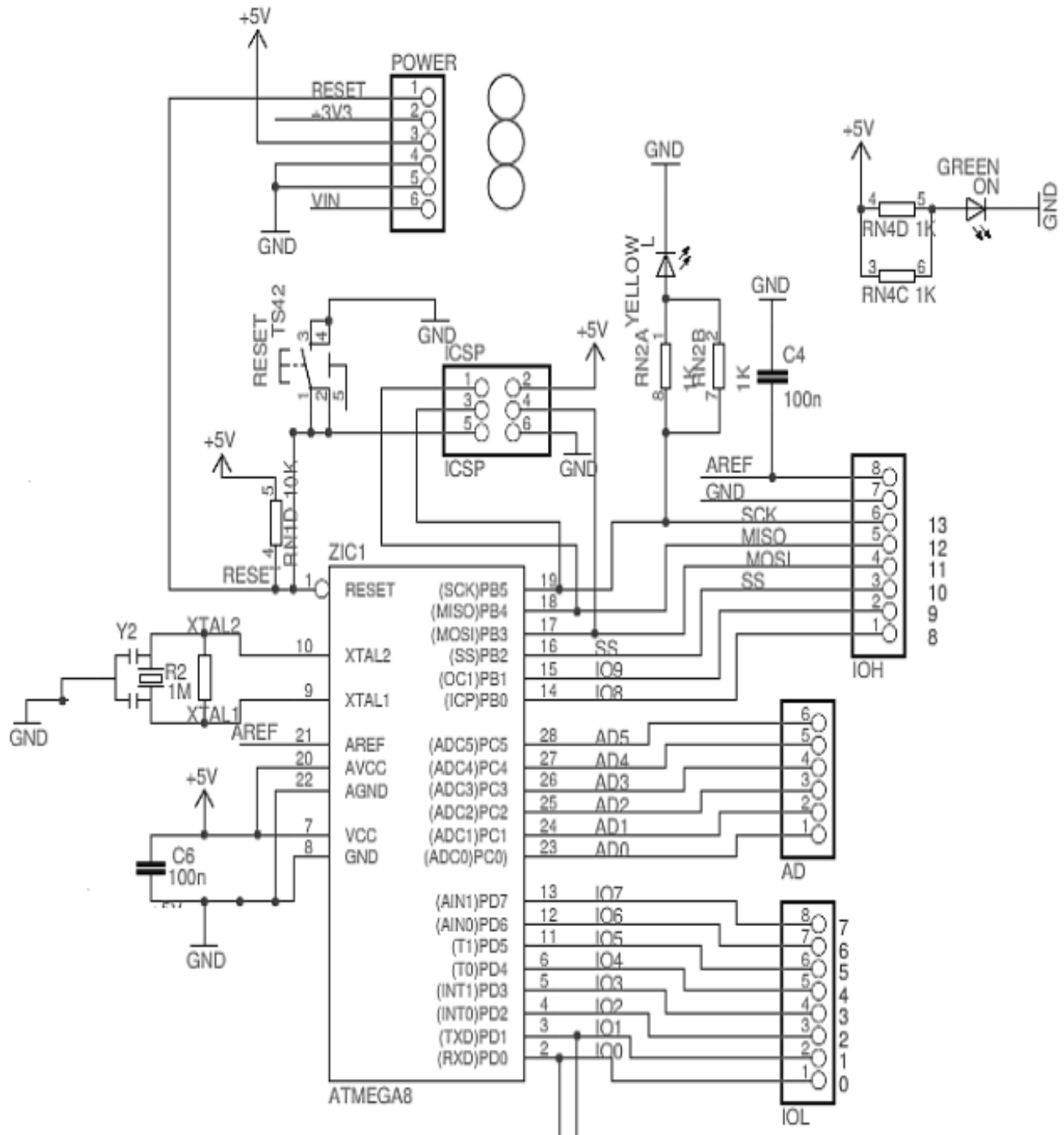
- [1] S. S. Cheema, «Simulation Studies on Dual Axis Solar Photovoltaic panel Tracking System,» 2012.
- [2] Yves JANNOT, THERMIQUE SOLAIRE, 2011.
- [3] A. S. C. P. István Patkó, « Evaluation the impact tilt angle on the sun collectors,» chez *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*.
- [4] v. Bourdin, Calculs astronomiques simplifiés, paris, 2014.
- [5] N. HOUCINE, «étude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôle et régulation de l'énergie électrique,» 2016.
- [6] A. R. , N. S. e. A. H. A. Takilalte, «Contribution à la commande d'héliostat pour centrale à tour,» *Revue des énergies renouvelables*, pp. 19-26, 2014.
- [7] Z. ILHEM, «Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire parabolique,» ALGERIE, 2005.
- [8] D. A. BOUZIANE RABEH, Conception et Réalisation d'un Suiveur Solaire Bi-axial à Base De capteurs de lumière, 2016.
- [9] F. D. e. al., «tournesol photovoltaïque,» INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN, 2014.
- [10] D. A. & H. Keyvan, «Suiveur Solaire,» Università di Roma - Sapienza, 2012.
- [11] M. . B. Abderrahmen, «COMMANDE A DEUX AXES D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAIQUE,» Algérie , 2014.
- [12] H. K. , N. A. , M. B. H. , A. M. U. L. H. Bentaher, «A simple tracking system to monitor solar PV panels,» *Energy Conversion and Management* , vol. 78 , p. 872–875, 2014.
- [13] T. Z. e. M. Fathi, «Commande électronique et évaluation énergétique d'un convertisseur photovoltaïque associé à un suiveur solaire,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. SIENR, n° %114, p. 81 – 86, 2014.
- [14] B. Ayoub, « Réalisation d'un prototype d'un système de poursuite solaire,» 2014.
- [15] A. K. N. Jeran Kuriakose Tharamuttam, «Design and Development of an Automatic Solar Tracker,» *Energy Procedia*, vol. 143 , p. 629–634, 2017.
- [16] G. F. e. S. AMEL, «Étude, conception et réalisation d'une commande d'un tracker solaire (suiveur solaire),» 2014.
- [17] [En ligne]. Available: WWW.GOOGLE.COM. [Accès le SEPTEMBRE 2019].
- [18] A. R. Jan, Gisement-solaire, Université de CERGY-PONTOISE, 2011.
- [19] S. M. A. A. e. A. F. M. Dankassoua, «Étude du rayonnement solaire global à niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l'année 2013 (mai à octobre),» *Revus des Energies Renouvelables* , vol. Vol. 20 , n° %1N°1, pp. 131-146, 2017.

- [20] Inra, Pratiques et outils de mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge de l'Inra, 2008.
- [21] F. G. & J.-P. Dulex, Cours pour l'apprentissage des bases de l'électronique et de la programmation sur Arduino, 2018.
- [22] [En ligne]. Available: futura-sciences: les forum de la sciences. [Accès le Dimanche septembre 2019].
- [23] Z. N. Bako, «Contribution à la mise en œuvre d'une méthodologie de conception d'un micro-réseau multi-sourcesmulti-villages : cas de la région du Sahel,» Université Paris-Est, 2018.
- [24] D. H. Amadou, cours sur les énergies renouvelables, Master 2SED, 2018.
- [25] B. Cottenceau, Carte ARDUINO UNO, Microcontrôleur ATmega328, 2016-2017.
- [26] M. A. , K. T. A. S. e. Y. H. D. Rezzak, «Etude et réalisation d'un dispositif de correction d'angle d'inclinaison d'un système photovoltaïque,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. Vol. 19, n° %1 N°2, p. 191 – 198, 2016.
- [27] R. R. e. A. Zaatri, «Optimisation du rendement d'un système photovoltaïque par poursuite du soleil,» *Revue des Energies Renouvelables* , vol. Vol. 12 , n° %1N°2, p. 299 – 306, 2009.
- [28] B. B. F. D. N. H. e. A. N. T. Bendib¹, «Commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes à base d'un microcontrôleur PIC16F84A,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. Vol. 11 , n° %1N°4, p. 523 – 532, 2008.

ANNEXES

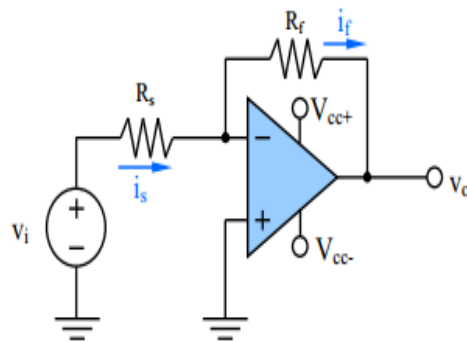


ANNEXE 1: Circuit électrique de la commande du suiveur



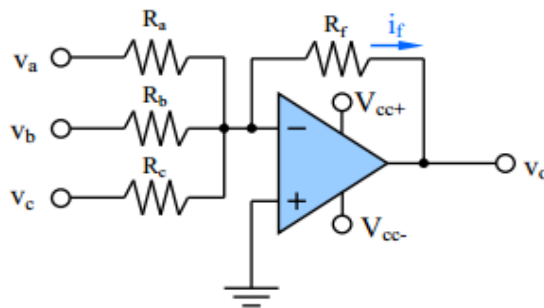
ANNEXE2 : schéma simplifié de la carte arduino [25]

Amplificateur inversant



$$v_o = -\frac{R_f}{R_s} v_i$$

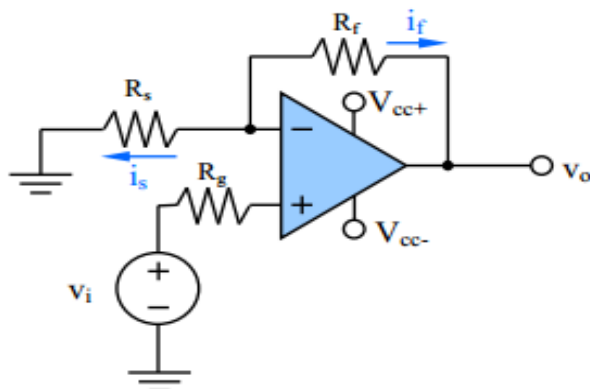
Sommeur



Si les trois résistances à l'entrée sont égales ($R_a = R_b = R_c = R_s$), on peut simplifier

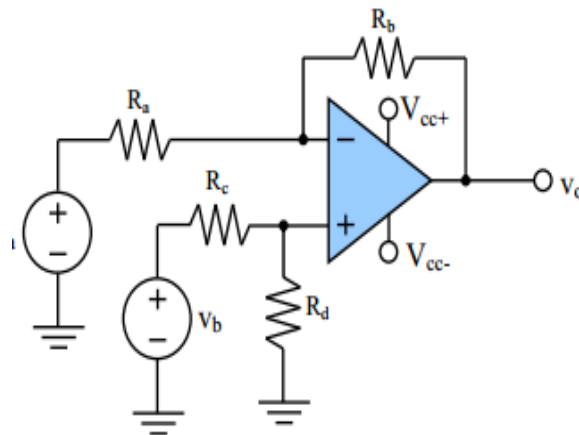
$$v_o = -\frac{R_f}{R_s} (v_a + v_b + v_c)$$

Amplificateur non-inversant



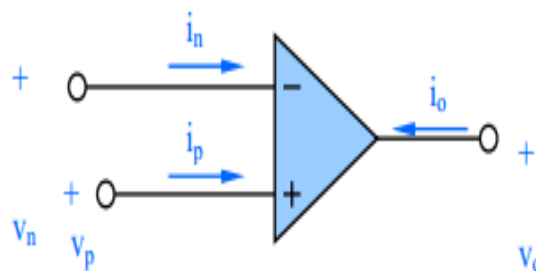
$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) v_i$$

Amplificateur différentiel



$$v_o = \left(\frac{R_d R_a + R_b}{R_a R_c + R_d} \right) v_b - \frac{R_b}{R_a} v_a$$

Le comparateur



- Si $v_p > v_n$, alors $v_o = V_{cc+}$
- Si $v_n > v_p$, alors $v_o = V_{cc-}$

ANNEXE3 : Equation entrée-sortie de quelques amplificateurs