

Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Faculté Des Sciences et Techniques Fès
Département de Génie Electrique

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Systèmes Microélectroniques, de Télécommunications et de l'Informatique
Industrielle

*Etude, conception et réalisation d'une commande d'un
tracker solaire (suiveur solaire)*

Réalisé par :

 Mlle BENMOHAMMADI Zahra

Encadré par :

 Pr. A. AHAITOUF
 Pr. A. MECHAQRANE

Soutenu le : 18 Juin 2014

Devant le jury composé de :

 Pr. F. ERRAHIMI
 Pr. N. ES-SBAI
 Pr. A. MECHAQRANE
 Pr. A. AHAITOUF

PES (FST. Fès)
PES (FST. Fès)
PES Encadrant (FST. Fès)
PES Encadrant (FST. Fès)

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2013/2014



REMERCIEMENTS

En préambule à ce travail, je tiens à adresser mes sincères remerciements aux personnes qui ont eu confiance en moi, qui m'ont apporté leur aide et soutien et qui ont contribué à l'élaboration de ce projet de fin d'études.

Mes premiers remerciements à ALLAH le tout puissant, qui a guidé mes pas depuis l'aube de ma vie.

Mes plus chaleureux et sincères remerciements vont à mes professeurs et encadrants Mr. ALI AHAILOUF et Mr. ABDELLAH MECHAQRANE, tout d'abord de m'avoir proposé ce sujet et pour leur qualités pédagogiques, leur vision scientifique et leur soutien durant toute la période d'encadrement. Un remerciement particulier pour leur disponibilité, et leurs conseils fructueux, en cherchant toujours à atteindre la rigueur scientifique.

Je tiens à remercier Mr Pr. El Hossein ABARKAN directeur du Laboratoire Signaux, Système et Composants (LSSC) pour son accueil au sein du laboratoire, et de nous avoir offert des conditions de formation optimales durant nos années d'étude.

Je remercie aussi les membres de Jury, Mme. Pr FATIMA ERRAHIMI et Mme Pr NAJIA ES-SBAI professeurs à la FST-Fès d'avoir accepté d'élaborer et juger ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude également à tous mes professeurs de la FST-Fès, pour leurs efforts fournis et la qualité d'enseignements.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

➤ *A Mes très chers parents*

Mon père, Ma mère pour votre amour, sacrifices, pensées et soutiens tout au long de mes années d'études et d'apprentissage. Que ce travail soit le témoignage de vos prières, vos encouragements et vos précieux conseils, et de tous les efforts que vous n'avez cessé de déployer pour mon éducation et mon instruction.

Aucune dédicace ne serait exprimer mon profond amour et l'admiration que je vous porte.

➤ *A Mon frère Soufiane*

Je te remercie pour ton soutien, et je te souhaite un très bon parcours et plein de succès. Aucun mot ne serait exprimer mon immense attachement, ma reconnaissance et mon profond amour et respect envers toi mon cher petit frère.

➤ *A la petite et grande famille*

BEN MOHAMMADI et SAIDI

➤ *A tous Mes professeurs et enseignants*

➤ *A tous Mes amis*

Qu'ALLAH vous garde et vous procure la santé et la longue vie.

RESUME

Le Maroc a lancé un plan d'envergure d'utilisation des énergies nouvelles pour réduire sa facture énergétique et limiter son indépendance vis à vis des marchés pétroliers qui handicapent l'investissement local et l'amélioration des conditions de vie des citoyens.

Parmi les sources d'énergie à développer, une priorité est donnée à l'énergie solaire. Ainsi il a été lancé un réel plan solaire Maroc qui constitue une réelle opportunité de diversification des sources d'approvisionnement en énergies renouvelables. En effet notre pays dispose d'un gisement solaire considérable avec une irradiation extrêmement favorable qui dépasse les 2300 kWh/m²/an. Cette irradiation au Maroc est 30% supérieure aux meilleurs sites européens d'où un levier de développement et d'industrialisation extrêmement intéressant.

Ainsi, parmi les constituants d'une station photovoltaïque, on trouve le tracker ou suiveur du soleil. En effet l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques dépend fortement de la quantité d'éclairement solaire qu'ils absorbent. Pour obtenir un rendement maximal, le panneau photovoltaïque doit être constamment orienté perpendiculairement aux rayons solaires. Or, la position du soleil varie d'une manière continue durant la journée de l'Est vers l'Ouest selon l'axe azimutal (Est-Ouest), et aussi pendant les saisons selon un axe zénithal (Nord-Sud).

Afin d'augmenter sa production en énergie électrique, un système photovoltaïque doit donc être muni d'un suiveur ou trackeur solaire. Cette structure permet le suivi en temps réel du mouvement apparent du soleil. Si cette solution ne semblait pas forcément nécessaire pour les panneaux solaires classiques à base de silicium sous toutes ses formes, elle s'avère nécessaire pour le panneau solaire à concentrateurs -qui compte parmi les nouvelles technologies envisagées pour la réalisation des stations du plan solaire marocain- où le nombre de cellules est fortement réduit et où le rayonnement solaire est focalisé sur la cellule. L'objectif du présent travail est l'étude, la conception et la réalisation d'une commande d'un tracker solaire (suiveur solaire).

Ce travail entre dans le cadre d'un Projet financé par l'Institut de Recherche en Energie Solaire et Energies Nouvelles (IRESEN). Une attention particulière sera donnée au développement des algorithmes de suivi capables d'être implémentés sur des solutions de l'électronique moderne pour réduire à la fois le coût et l'encombrement des systèmes.

ABSTRACT

Morocco has launched a major plan to use new energy to reduce energy costs and limit its independence from the oil markets that hamper local investment and improving the living conditions of citizens.

Among the energy sources to develop, priority is given to solar energy. So he launched a real Morocco Solar Plan, which provides a real opportunity to diversify sources of renewable energy. Indeed, our country has a huge solar field with an extremely favorable radiation exceeding $2300 \text{ kWh / m}^2 \text{ / year}$. This irradiation in Morocco is 30% higher than the best European sites.

Thus, among the constituents of a photovoltaic station, there is the sun tracker. The energy supplied by photovoltaic panels depends strongly on the amount of solar radiation they absorb. To maximum efficiency, the solar panel must be constantly oriented perpendicular to the sun. However, the position of the sun varies in a continuous way during the day from east to west according to the azimuth axis (east-west), and also during the season according to a zenith axis (North-South).

To increase production in electricity, a photovoltaic system must be equipped with a solar tracker. This structure allows a real-time tracking of the sun's path. If this solution does not seem to be necessary for conventional solar panels silicon in all its forms, it is necessary for the solar panel hubs where the number of cells is reduced and where solar radiation is focused on the cell. The objective of this project is to design tracking System of PV panel.

Table des matières

Remerciements	3
Dédicaces	4
Résumé	5
Abstract	6
Table des figures	9
Liste des tableaux	12
Glossaire et abréviations	13
Laboratoire d'accueil	14
Introduction générale	15
Chapitre I	17
I . La cellule photovoltaïque	18
1.1 Définition et principe	18
1.2 Le rendement d'un panneau photovoltaïque	20
▪ Puissance produite	20
▪ Positionnement	21
▪ Positionnement (angle d'inclinaison)	22
II . Géométrie solaire- Trajectoire solaire	23
Théorie	23
1. L'angle d'Altitude ou l'élévation solaire	23
2. Angle d'azimut Az	25
3. Angle de zénith θ_z	25
III. Etat de l'art des techniques de suivi	26
3.1 Les premières utilisations	26
3.2 Les types de suiveurs solaires	27
3.3 Les suiveurs solaires actifs actuels	28

IV. Conclusion	32
Chapitre II	33
I. Introduction	34
II. Méthodes de poursuite	34
2.1 Principe général	34
2.2 Tracker mono-axe	36
2.3 Disposition des capteurs LDR	38
2.4 Tracker double axe	38
III. Conception et dimensionnement	40
Vitesse de rotation du panneau	40
III. Conclusion	41
Chapitre III.	42
I. Introduction	43
II. Contexte matériels	43
2.1 Capteur LDR NSL-19M51	43
2.2 Circuit de commande par microcontrôleur	44
2.3 Circuit de puissance L293D	45
III. Contexte logiciels	46
3.1 mikroC PRO For PIC	47
3.2 Test et simulation via Proteus_ISIS	47
3.3 Fonctionnement de la carte de simulation	49
IV. Conclusion	51
Conclusion générale	52
Références bibliographiques	53
Annexe I	55
Annexe II	57
Annexe III	58

Table des figures

Figure 1 : Organigramme du Laboratoire de Signaux, Systèmes et Composants	14
Figure 2 : Identification des cinq sites du projet marocain de l'énergie solaire	15
Chapitre I.	
Figure I.1 : Centrale solaire photovoltaïque	18
Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	18
Figure I.3 : Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque	19
Figure I : Cellule PV à concentration, rayons parallèles et réfléchis au foyer f	20
Figure I.4 : Rendement pour différents types de technologies au cours des années (NREL)	20
Figure I.5: Dépendance des performances d'un panneau PV de l'angle β	21
Figure I.6 : Rendement en puissance solaire exploitée en fonction de l'angle β des rayons solaires	21
Figure I.7 : Représentation de l'angle d'inclinaison θ	22
Figure I.8 : Représentation des équinoxes et solstices et l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport à son plan de translation autour du soleil	22
Figure I.9 : représentation latitude et longitude	24
Figure 1.10: Variation annuelle de la déclinaison solaire	24
Figure 1.11: Variation de l'angle horaire en fonction de T_s	25
Figure I.12 : représentation des angles Zénith, Azimut et altitude solaires	26
Figure I.13 : modèle d'un héliostat dans ses premières applications	27
Figure I.14 : champ d'héliostat -centrale solaire Thémis France	27
Figure I.15 : Types de suiveurs solaires	27
Figure I.16 : Exemple et fonctionnement du tracker passif	28
Figure I.17 : Méthode de poursuite astronomique.....	29
Figure I.18 : Méthode de poursuite active	30
Figure I.19 : Principe général d'un système de suivi pour les panneaux PV	30
Figure I.20 : Principe général du système de suivi à base de photodiode	31

Figure I.19 : Principe de la méthode de suivi à base de caméra (CCD, CMOS)	32
--	----

Chapitre II.

Figure II.1 : Principe général de la commande du tracking	34
Figure II.2 : Schéma synoptique de la technique du tracking	35
Figure II.3 : représentation des plans 1 et 2 séparant les LDR	35
Figure II.4 : Circuit équivalent du capteur LDR utilisé	36
Figure II.5 : Organigramme de la méthode de suivi mono-axe	37
Figure II.6 : disposition des capteurs LDR pour un tracker mono-axe	38
Figure II.7 : Vue d'en haut de la disposition des quatre capteurs LDR	39
Figure II.8 : Organigramme de la méthode de suivi double axe	40

Chapitre III.

Figure III.1 carte de commande d'un tracker solaire	43
Figure III.2: Capteur LDR	43
Figure III.3 : Brochage du PIC 16F887 sous la forme d'un boîtier DIL	45
Figure III.4 : représentation du circuit intégré L293D à double pont en H	45
Figure III.5 : Variation de sens du moteur par pont en H	46
Figure III.6 : Cheminement de la programmation et de la simulation	47
Figure III.7 : LDR_Torch utilisé	48
Figure III.8 : Configuration du schéma de simulation	48
Figure III.9 : Simulation de la sortie en absence d'éclairement	49
Figure III.10 : Simulation de la sortie pour une variation de l'éclairement sur LDR-Ouest et LDR-Nord	50
Figure III.11 : Simulation de la sortie pour une variation de l'éclairement sur LDR-Est et LDR-Sud	51

Annexe (I. II. III)

Figure A1.1 Représentation de l'angle horaire	56
Figure A2.1 La résistance en fonction du flux de lumière (en lux)	57
Figure A2.2 Dimensions en (mm) du capteur LDR	57
Figure A2.3 Réponse spectrale du capteur LDR	58

Figure A3.1 : Fichier.hex généré à parti de la compilation	58
Figure A3.2 Architecture interne du microcontrôleur PIC16F	59
Figure A3.3: Schéma du câblage de l'oscillateur utilisé	60

Liste des tableaux

Chapitre III.

Tableau III.1 : Caractéristiques de la LDR NSL-19M51	44
Tableau III.2 : Les différents cas de la sortie du circuit de puissance	46

Annexe I.

Tableau A1.1 calcul du numéro du jour	55
---	----

Glossaire & Abréviation

TEP :	Tonnes Equivalent Pétrole
Wh :	Watt-heure (énergie consommée)
PV :	Photovoltaïque
PEP:	puissance électrique produite par le panneau PV
PSR :	puissance solaire reçue par le panneau
L:	Longitude
δ :	Déclinaison solaire
φ :	Latitude
Az :	Angle Azimut
α :	Angle d'altitude
θ_z :	Angle de zénith
ω :	Angle horaire
Ts :	Temps solaire
TU:	Temps universel
TL:	Temps légal
Ts :	Temps solaire)
CCD :	Charge Coupled Device
CMOS :	Complementary Metal Oxide Semiconductor
LDR :	light-dependent resistor
PIC:	Peripheral Interface Contrôler
CC:	Courant Continu

LABORATOIRE D'ACCUEIL

Le laboratoire (L.S.S.C) est constitué de trois équipes comme le montre l'organigramme suivant :

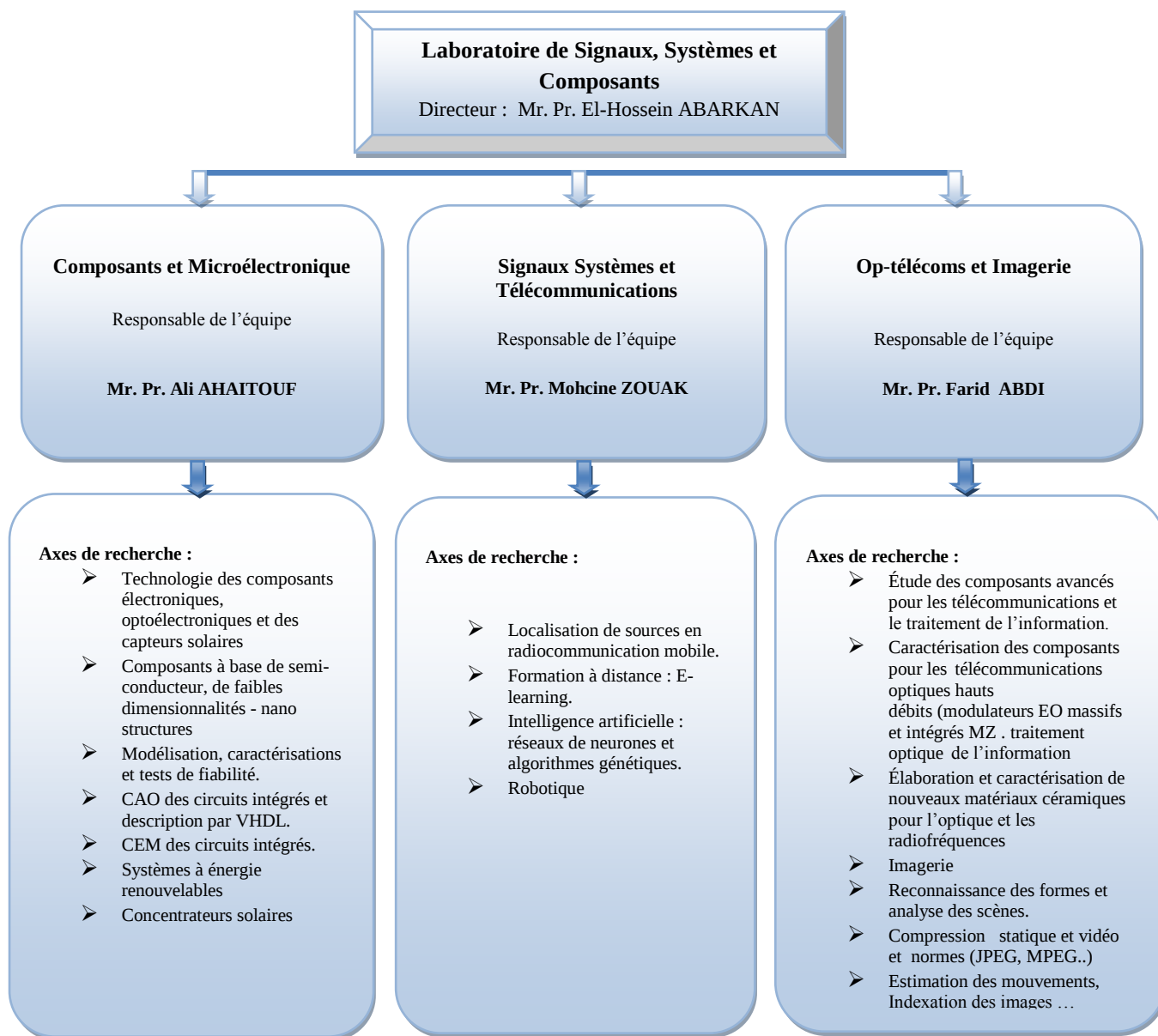


Figure 1 : Organigramme du Laboratoire de Signaux, Systèmes et Composants.

J'ai effectué mon stage au sein de l'équipe Composants et Microélectronique (Pr. A. AHAITOUF) et l'équipe Signaux Systèmes et Télécommunications (Pr. A. MECHAQRANE).

INTRODUCTION GENERALE

Les énergies renouvelables sont des énergies qui se renouvellent continuellement 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, etc.), en énergie d'origine thermonucléaire (uranium, plutonium, etc.), 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) sur la terre. Cette valeur est à comparer aux 12 717 millions de TEP que représente la consommation annuelle mondiale en énergie primaire (2011).

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]

Pour alléger sa facture et essayer de remédier à ce problème énergétique important, le Maroc a œuvré pour lui chercher un remède, ce dernier se concrétise avec le lancement de plusieurs projets porteurs dans le cadre du plan solaire marocain et du projet Marocain intégré de l'énergie éolienne [2]. Le projet marocain de développement intégré de l'énergie solaire vise la mise en place en 2020 d'une capacité de production électrique à partir de l'énergie solaire de 2 000 MW sur cinq sites (Figure 2) : Ouarzazate, Ain Bni Mathar, Fom Al Oued, Boujdour et Sebkhate Tah. Les deux technologies "Concentrated Solar Power" (CSP) et Photovoltaïque- sont envisagées pour ces différentes stations. Ce programme augmentera la part de l'énergie solaire dans la capacité électrique totale à 14% à l'horizon 2020 et évitera l'émission de 3,7 millions de tonnes de CO₂ par an. [3]

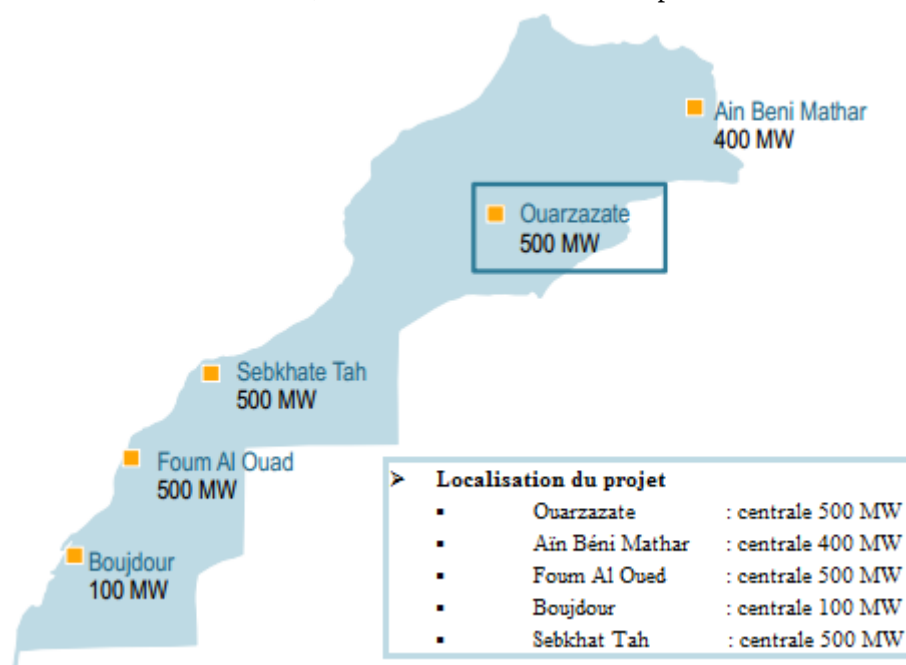


Figure 2 : Identification des cinq sites du projet marocain de l'énergie solaire. [4]

Ainsi l'université marocaine, comme moteur de développement et entité du transfert du savoir, compte tirer profit de ces programmes, en s'associant et en s'impliquant dans des recherches nécessaires à la mise à niveau de la structure et au développement du secteur des énergies renouvelables. C'est dans ce cadre général que s'inscrit notre projet de fin d'études, sous le thème : **«Etude, conception et réalisation d'une commande d'un tracker solaire».**

Le présent rapport est organisé selon trois chapitres. Le premier portera sur l'état de l'art des méthodes actuelles de suivi ainsi qu'une étude de la trajectoire solaire. Le second présentera les techniques de de poursuite solaire adoptées dans l'étude ainsi que la méthodologie suivie pour la conception d'un système de tracking. Dans le dernier chapitre on présentera les résultats de simulations de la carte de commande du suivi réalisée.

Ce stage de fin d'études marquera pour moi l'obtention du diplôme de Master en Systèmes Microélectroniques de Télécommunication et de l'informatique Industrielle, dispensé au sein de la FST de Fès.

■ CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

Objectif :

L'objectif de ce chapitre est de présenter le panneau photovoltaïque, l'intérêt du suiveur solaire par rapport aux performances de ce dernier, les méthodes de poursuites utilisées de nos jours, ainsi que la détermination des équations qui permettent de repérer la position du soleil par rapport à une surface située en un lieu géographique donné.

I. La cellule photovoltaïque

1.1 Définition et principe

La cellule photovoltaïque est le composant électronique à la base des installations produisant l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire. Elle fonctionne selon le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles pour former ce qu'on appelle un module solaire photovoltaïque, par la suite, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation ou même une centrale solaire photovoltaïque (Figure I.1).



Figure I.1 : Centrale solaire photovoltaïque [6]

La conversion directe de l'énergie solaire en électricité se fait par l'intermédiaire d'un matériau semi-conducteur -généralement le silicium que l'on trouve en abondance sur Terre (extrait de la silice compris dans le sable). Lorsque les photons sont absorbés par un matériau semi-conducteur, ils cèdent toute leur énergie aux atomes appartenant à la jonction PN, ceci donne naissance à plusieurs paires électrons/trous. Le nombre de paires e/t formées dépend de l'énergie des photons incidents et du matériau utilisé.

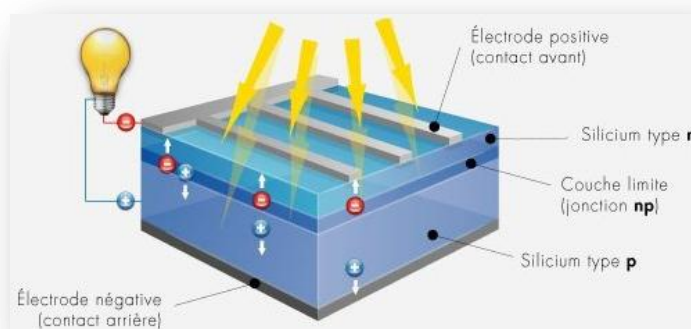


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Une cellule photovoltaïque est généralement représentée par le modèle électrique de la figure I.3. Il est constitué d'une source de courant, I_{ph} , qui dépend de la radiation solaire et de la température, d'une diode en parallèle qui représente la jonction PN dont l'intensité de saturation inverse dépend aussi de la température, une résistance en série R_s due aux contacts entre les semi-

conducteurs et les parties métalliques permettant d'utiliser la cellule . La résistance shunt représente l'effet du courant qui traverse le cristal.

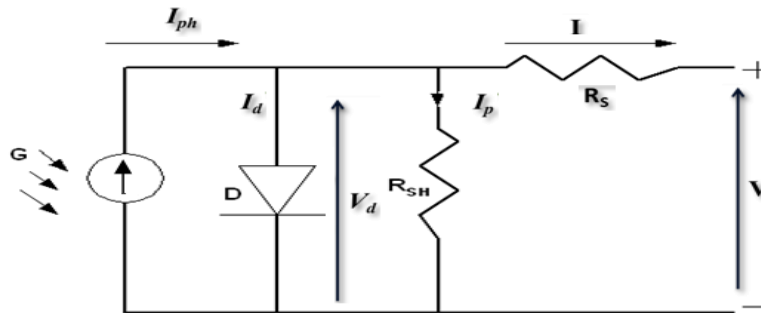


Figure I.3 : Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque

A partir de ce circuit on peut tirer les équations suivantes :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.1)$$

Avec

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad \text{courant traversant la résistance shunt.}$$

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V + I.R_s}{n.V_t}\right) - 1 \right) \quad \text{courant traversant la diode.}$$

l'équation (I.1) devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V + I.R_s}{n.V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (I.2)$$

Avec:

$$V_t = \frac{k T}{q}$$

$$I_s = I_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \frac{E_g}{n V_t} \right] \quad (I.3)$$

$$I_{ph} = (I_{CC} + K_i . \Delta T) . \frac{G}{G_{ref}} \quad (I.4)$$

et

$$\Delta T = T - T_{ref}$$

où :

- I_s le courant de saturation,
- I_0 le courant inverse,
- V_t est la tension thermique,
- k la constante de Boltzmann,
- K_i Coefficient d' I_{CC} ,
- T la température effective de la cellule en Kelvin,
- q la charge de l'électron ($q = 1,6.10^{-19}$ C),
- E_g l'éclairage de référence,
- n le facteur de non idéalité de la jonction,
- I le courant fourni par la cellule,
- V la tension aux bornes de la cellule,
- I_{CC} le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température,
- R_p la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,
- R_s la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.
- G_{ref} l'éclairement de référence,
- G l'éclairement sur la cellule W/m^2

L'évocation de la cellule PV et la représentation de son schéma équivalent nous mène à préciser que dans une installation PV à concentrateurs les rayons solaires doivent être perpendiculaires comme illustré dans la figure ci-dessous, d'où l'obligation de l'utilisation d'un suiveur solaire.

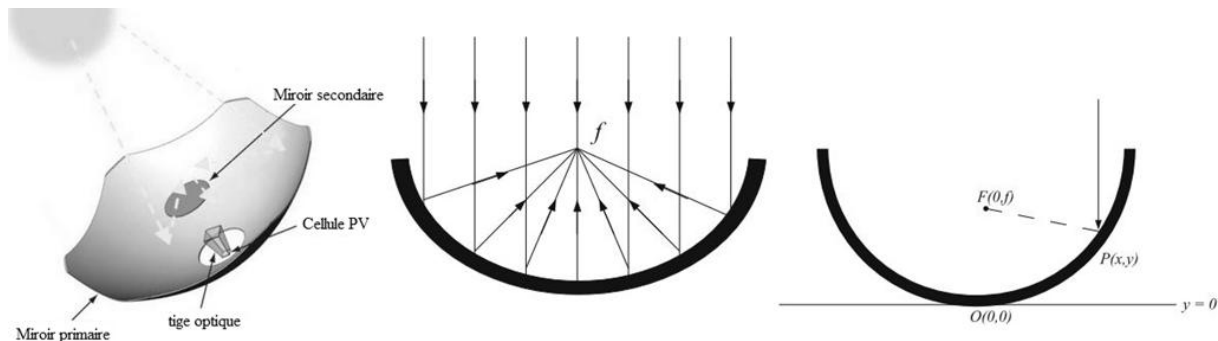


Figure I : Cellule PV à concentration, rayons parallèles et réfléchis au foyer f

1.2 Le rendement d'un panneau photovoltaïque

■ Puissance produite

Le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque dépend des technologies utilisées lors de sa fabrication. Il existe plusieurs types dont les plus connus sont les panneaux PV à base de cellules en silicium polycristallin, silicium monocristallin, silicium amorphe, les cellules multi-jonctions, etc. Chacune de ces technologies présente des avantages et des inconvénients. En particulier, le rendement, qui est généralement le critère de choix, dépend des conditions climatiques du lieu d'installation (dans les régions caractérisées par des températures élevées, les systèmes au silicium amorphe sont préférés à ceux au mono ou polycristallin).

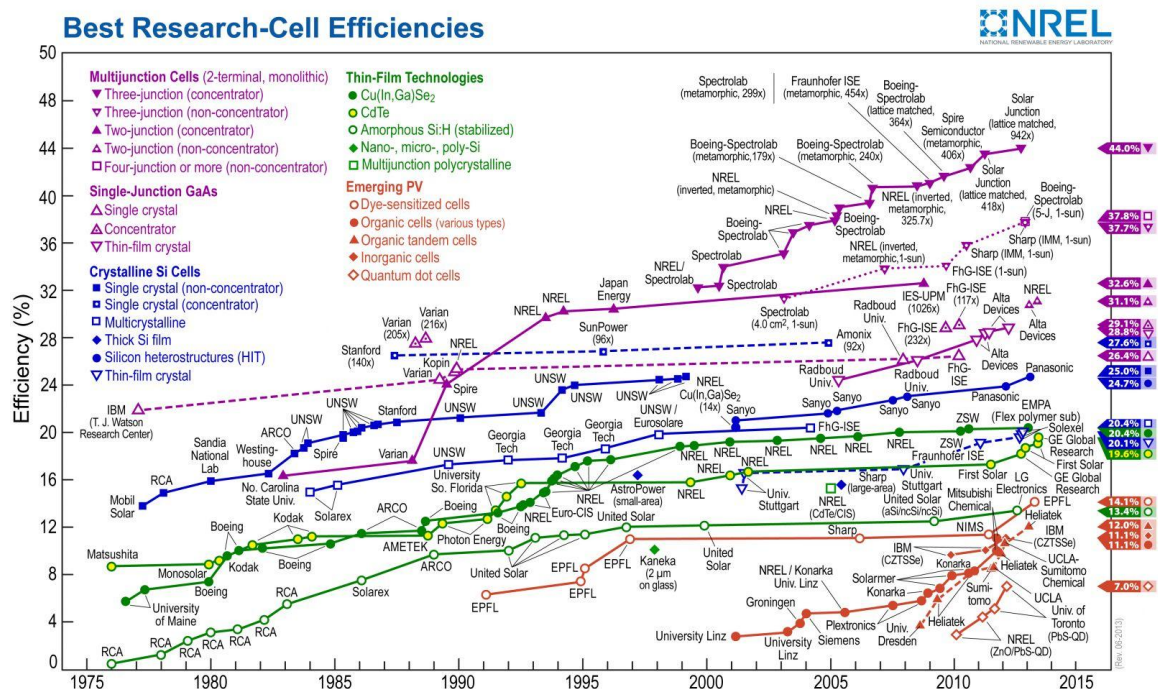


Figure I.4 : Rendement pour différents types de technologies au cours des années (NREL) [5]

Pour un panneau PV, le rendement, R exprimé en pourcent (%), est défini par le rapport de la puissance électrique produite par le panneau PV (PEP) à la puissance solaire reçue (PSR).

$$R = \frac{PEP}{PSR} \quad (I.5)$$

Positionnement

Comme mentionné auparavant, l'énergie fournie par le panneau PV dépend fortement de la quantité d'éclairement solaire absorbée par ce dernier. Cette quantité dépend de l'orientation du panneau par rapport au soleil. Pour collecter le maximum d'énergie, le panneau PV doit être constamment orienté perpendiculairement aux rayons solaires (Figure I.5).

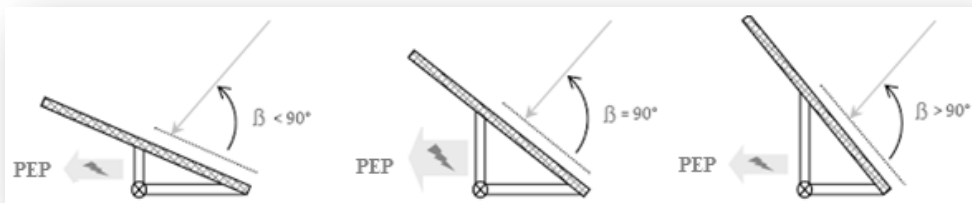


Figure I.5: Dépendance des performances d'un panneau PV de l'angle β .

Avec : β l'angle formé entre le plan du panneau et les rayons lumineux incidents, l'angle optimal correspond à un angle de 90° comme indiqué dans la figure I.6.

Chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface (m^2) du panneau exposée aux rayons diminue et donc en partant de la puissance produite, le rendement diminue aussi, d'où l'importance de l'orientation des panneaux par rapport à la position du Soleil.

Le rendement en puissance solaire exploitée peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$R = \sin(\beta) \times 100 \quad (I.6)$$

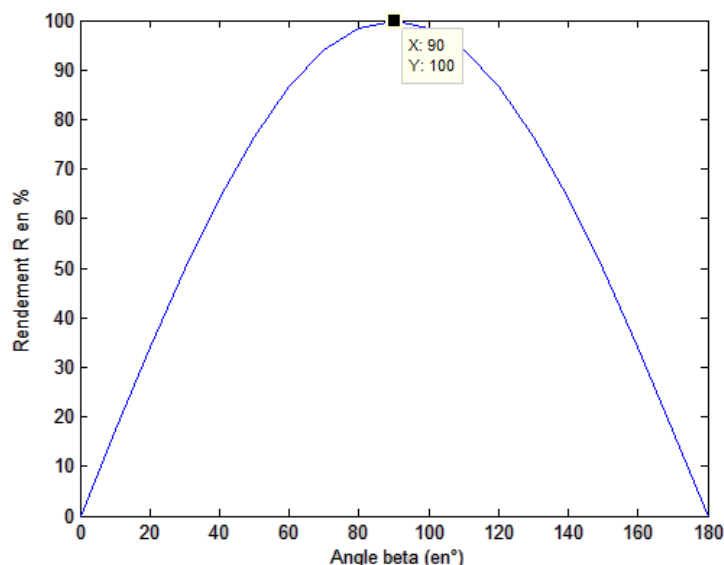


Figure I.6 : Rendement en puissance solaire exploitée en fonction de l'angle β des rayons solaires.

■ Positionnement (angle d'inclinaison)

Un autre facteur qui influence sur les performances du panneau PV est l'angle d'inclinaison, qui correspond à l'angle formé par le plan du panneau solaire par rapport à l'horizontale (le plan du sol).



Figure I.7 Représentation de l'angle d'inclinaison θ .

En effet, l'évolution de la trajectoire du soleil varie selon les saisons (l'inclinaison de la terre varie), l'angle d'inclinaison est plus réduit en été et plus important en hiver.

Note : Aux équinoxes du 21 mars et du 21 septembre, le soleil est perpendiculaire à l'Equateur.
 Au solstice d'été du 21 juin, il est perpendiculaire au tropique du Cancer (hémisphère nord).
 Au solstice d'hiver du 21 décembre, il est perpendiculaire au tropique du Capricorne (hémisphère sud). (Figure I.8)

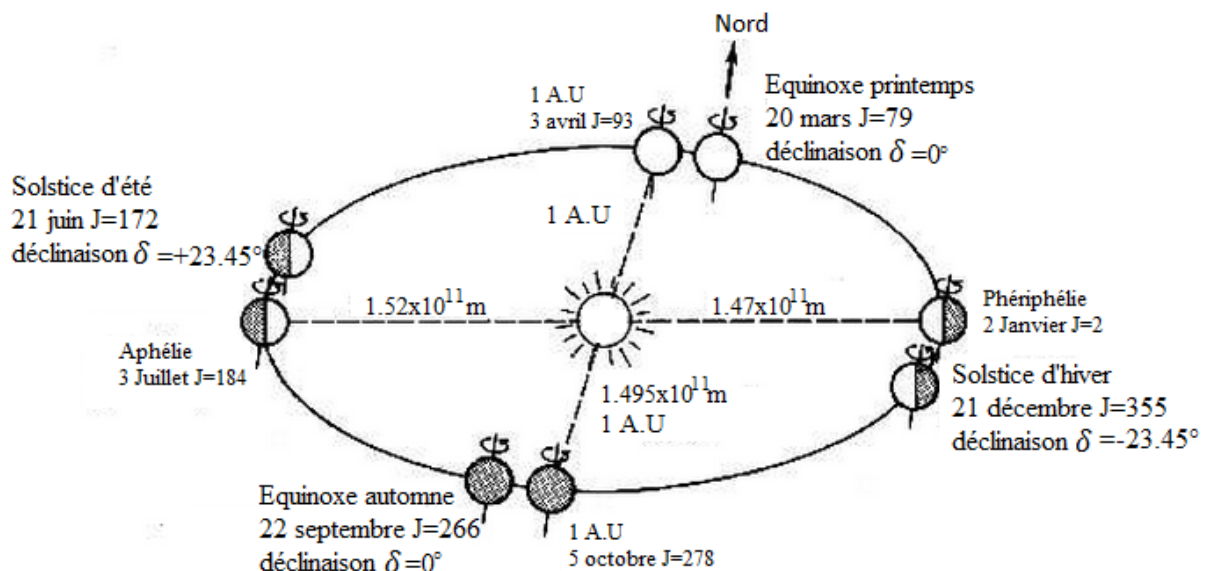


Figure I.8 : Représentation des équinoxes et solstices et l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport à son plan de translation autour du soleil.

Cependant si l'on désire maximiser la puissance générée par un panneau PV et avoir un rendement optimal, il faut tenir compte de tous ces paramètres et contraintes liées à l'orientation du module ainsi

que la position du soleil. Ceci peut être assurée par un système de poursuite solaire (suiveur soleil ou encore dit tracker solaire (appellation courante)) permettant de suivre le soleil tout au long de la journée. Pour cela, la structure possède deux degrés de liberté : une rotation horizontale pour régler l'azimut et une rotation verticale pour l'inclinaison. Ce système permet ainsi, aux panneaux photovoltaïques de suivre continuellement et en temps réel la trajectoire du soleil pour assurer une production électrique maximale, d'où la nécessité de définir avec exactitude les trajectoires empruntées par le soleil, de manière à définir la meilleure façon avec laquelle sera effectué le suivi automatique.

II . Géométrie solaire- Trajectoire solaire

Théorie

L'énergie solaire que reçoit une surface hors atmosphère est régie uniquement par des lois astronomiques et géométriques. Ces dernières faisant intervenir la latitude du lieu, la déclinaison solaire, l'heure du jour et l'orientation de la surface réceptrice. La position du soleil dépend du temps solaire et du jour de l'année. Elle est exprimée par différents angles [6]:

1. L'angle d'Altitude ou l'élévation solaire α (°) : est défini comme étant l'angle entre le rayon central du soleil et le plan horizontal (Figure I.9),

$$\alpha = \text{Arcsin} (\sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega) \quad (\text{I.7})$$

Avec : φ latitude du lieu.

δ déclinaison solaire

ω angle horaire.

où:

- La latitude est représentée par une valeur angulaire. Elle représente l'angle d'inclinaison, par rapport au plan de l'équateur, de la demi-droite allant du centre de la terre et passant par le lieu géographique considéré. Cet angle, s'étendant de 0° à l'équateur à $\pm 90^\circ$ aux pôles.
- La longitude est une valeur angulaire aussi, expression du positionnement est-ouest d'un point sur Terre, dont la référence est le méridien de Greenwich. (avec une étendue de -180° (180° Ouest) à $+180^\circ$ (180° Est)). (Figure I.9)

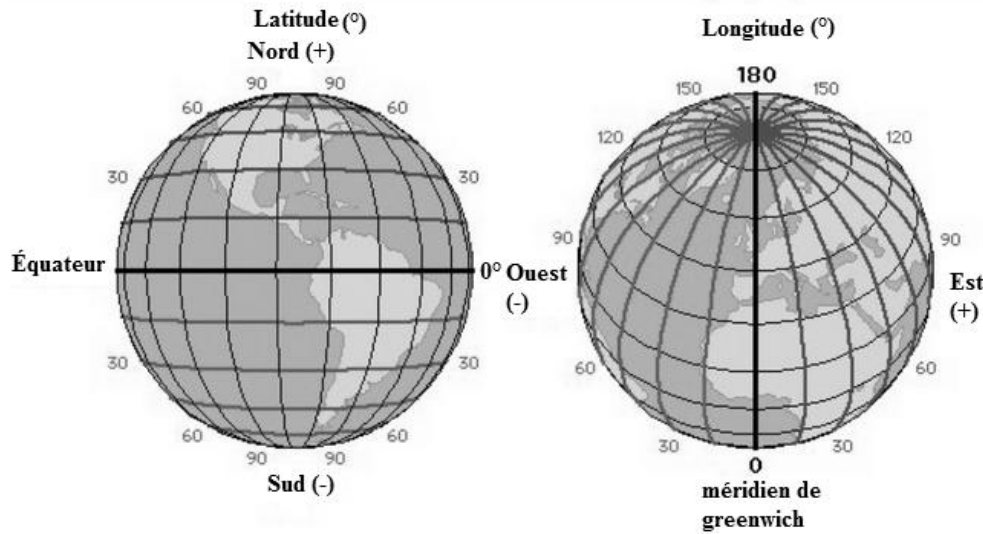


Figure I.9 : représentation latitude et longitude

- La déclinaison solaire δ (°) : 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 $+23,45$ en degrés décimaux au solstice d'été (21 juin) à $-23,45$ 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, comme représenté précédemment dans la figure I.8. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\delta = \text{Arcsin}(\cos(0.98563(j - 173))0.39795) \quad (\text{I.8})$$

où : j est le nombre du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier (varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année). Un tableau de calcul du n° du jour « j » est donnée dans l'annexe I.

Nous avons représenté dans la figure 1.10 la variation de la déclinaison au cours de l'année.

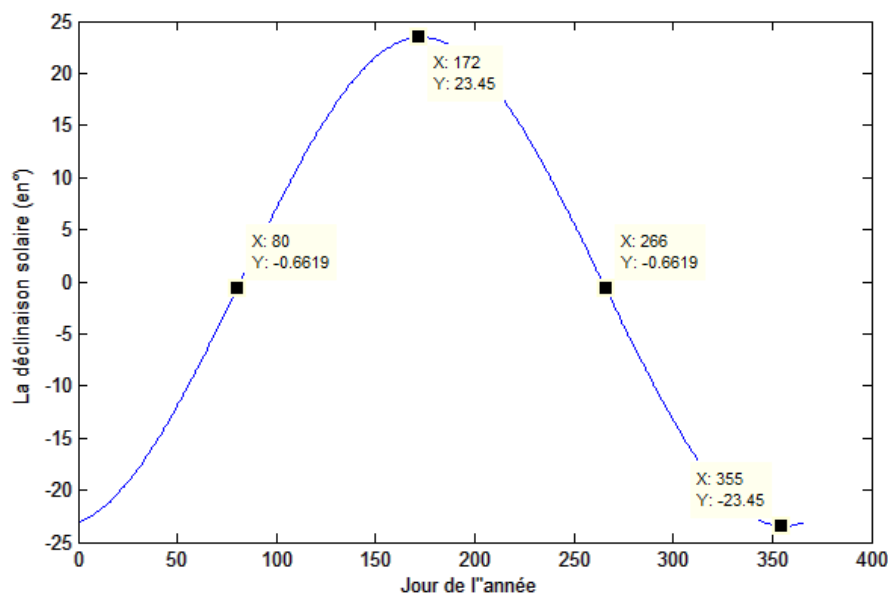


Figure 1.10: Variation annuelle de la déclinaison solaire

- L'angle horaire $\omega(^{\circ})$: mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu (zénith). Cet angle horaire est négatif si le temps solaire est inférieur à 12 h et varie entre 180° et -180° , il varie à chaque instant selon la relation [7] :

$$\omega = 15(Ts - 12) \quad (I.9)$$

où :

Ts Temps solaire (annexe I)

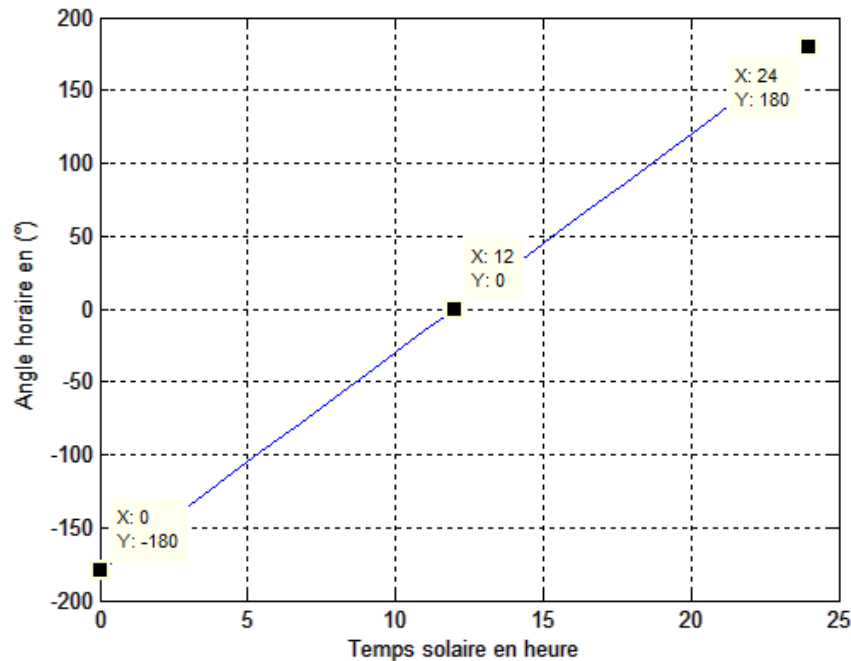


Figure 1.11: Variation de l'angle horaire en fonction de Ts

2. Angle d'azimut Az en($^{\circ}$): C'est l'angle sur le plan horizontal mesuré à partir du sud avec la projection horizontale des rayons directs du soleil. Il est également donné comme angle entre le méridien local et la projection de la ligne de la vue du soleil dans le plan horizontal (Figure I.12), L'angle azimut solaire est donné par la relation:

$$Az = \text{Arcsin} \left(\frac{\sin \omega \times \cos \delta}{\cos \alpha} \right) \quad (I.10)$$

3. Angle de zénith θ_z en ($^{\circ}$) : il est définit comme étant l'angle entre la verticale du lieu et la direction du soleil (Figure I.12). L'angle zénith solaire est donné par l'équation suivante

$$\theta_z = 90 - \alpha(^{\circ}) \quad (I.11)$$

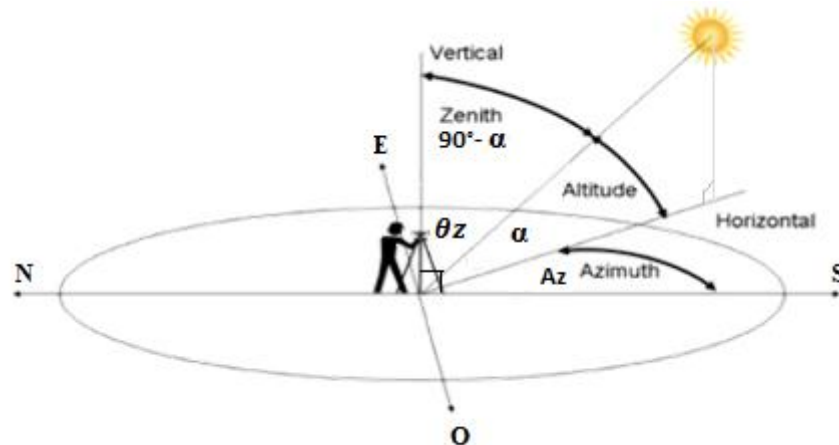


Figure I.12 : représentation des angles Zénith, Azimut et altitude solaires.

III. Etat de l'art des techniques de suivi

Les panneaux photovoltaïque classiques (PV) ne sont généralement pas équipés de suiveur solaire et sont placés dans une inclinaison et une orientation fixes et bien déterminées selon le site d'installation et les conditions d'ensoleillement. Afin d'augmenter le rendement du panneau PV, on l'enchérit avec une structure portante ayant deux degrés de liberté en rotation commandée par un algorithme de poursuite solaire.

3.1 Les premières utilisations

Les premières applications des suiveurs solaires remontent vers les années 1750 où le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat (figure I.13). La rotation du miroir de l'héliostat est assurée par un mécanisme d'horlogerie dont la plus ancienne mention du système se trouve dans des publications datant de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacob 's Gravesande [8]. 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 dernier se rencontre dans diverses installations utilisant l'énergie solaire, notamment les centrales solaires à concentration appelées champs d'héliostats. Un exemple en France de la centrale solaire Thémis qui après avoir fonctionné de 1983 à 1986, fait l'objet d'une nouvelle expérimentation depuis 2007[9].

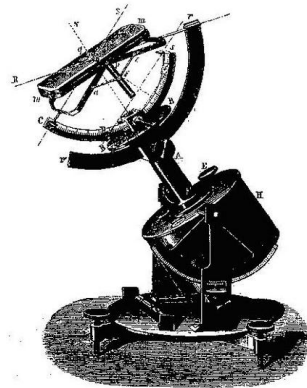


Figure I.13 : modèle d'un héliostat dans ses premières applications



Figure I.14 : champ d'héliostat -centrale solaire Thémis France.

3.2 Les types des 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 I.15).

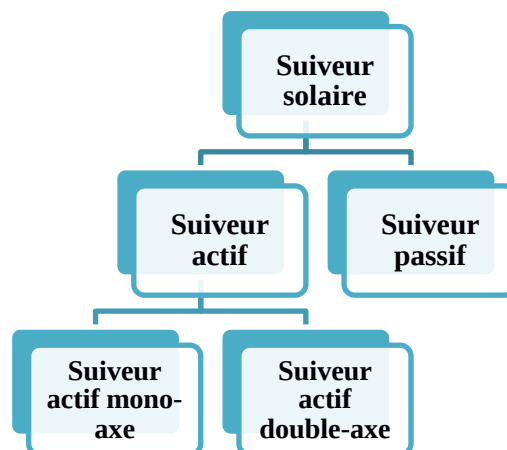


Figure I.15 : Types de suiveurs solaires

Le premier type des suiveurs passifs est constitué dans son architecture de deux tubes en cuivre montés sur les côtés Est et Ouest du panneau PV. Le tube de matière cuivre (entouré dans la figure I.16) est rempli de fluides chimiques capable de se vaporiser à basse température. En effet, lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente la température d'un côté du panneau, le composé dans le

tube en cuivre se vaporise [10]. 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 panneau PV en le faisant tourner vers la source des rayons solaires. Ce type de suiveur ne consomme aucune énergie pour le repositionnement du panneau.

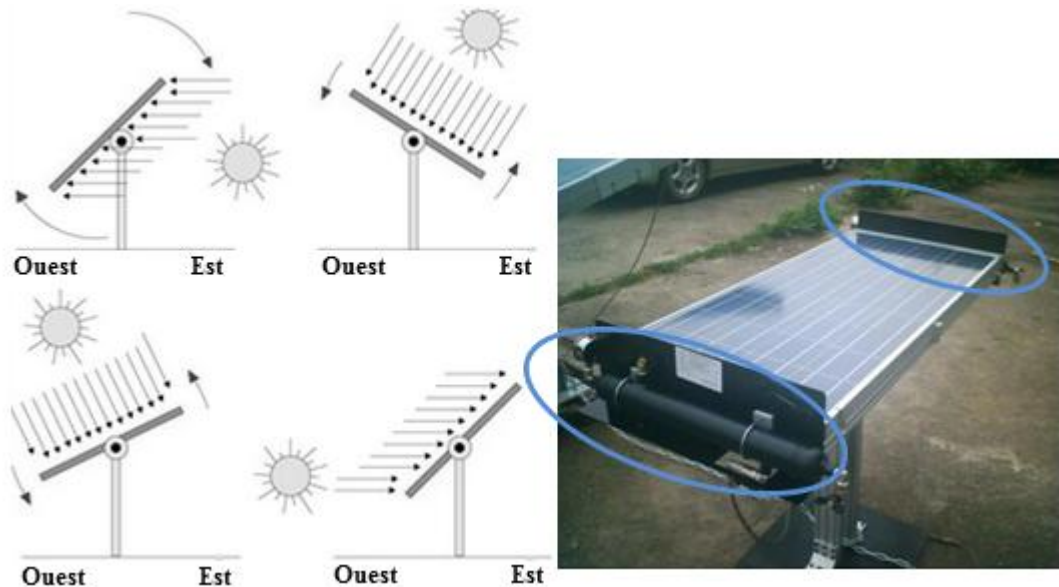


Figure I.16 : Exemple et fonctionnement du tracker passif

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.

3.3 Les suiveurs solaires actifs actuels

Les systèmes de suivi aujourd'hui diffèrent d'un concepteur à un autre et de la technologie utilisée afin d'assurer de bonnes performances, avec une grande précision et un système fiable à faible coût ; C'est dans cette optique que les recherches scientifiques et projets porteurs visent à trouver le bon compromis entre précision et puissance consommée.

Il existe deux grandes techniques pour assurer le suivi et ce en tenant compte de la précision voulue. L'une repose sur le calcul de la position du soleil en se basant sur les équations géométriques et astronomiques prédéfinies et qui nécessite une intervention manuelle pour modifier la latitude du site, la date du jour et l'heure. Cette technique est dite la méthode astronomique du fait que la position est directement fonction du parcours solaire préprogrammé (Figure I.17). L'autre méthode est dite active, permanente ou asservie vu que les algorithmes adoptés sont basés sur des capteurs de lumière,

photorésistances ou cellules PV pour déterminer la position du soleil à tout moment, permettant ainsi un suivi instantané et notamment une orientation optimale du panneau (Figure I.18). C'est vers cette dernière que va s'orienter notre travail, en réalisant un système de poursuite automatique.

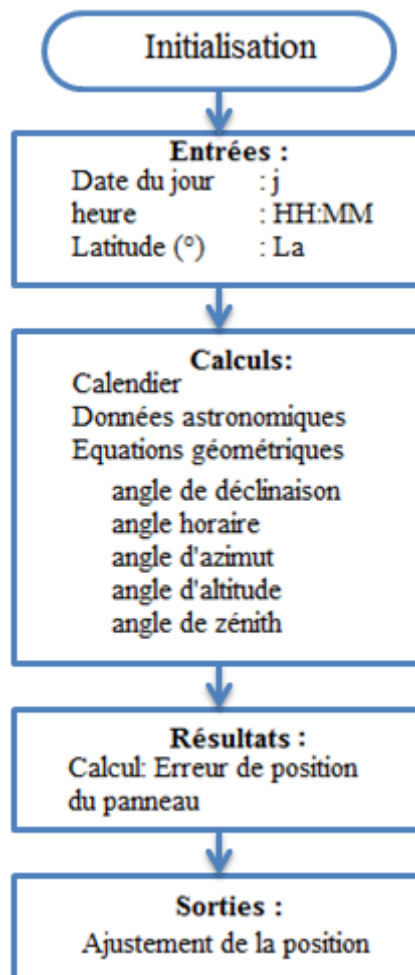


Figure I.17 : Méthode de poursuite astronomique

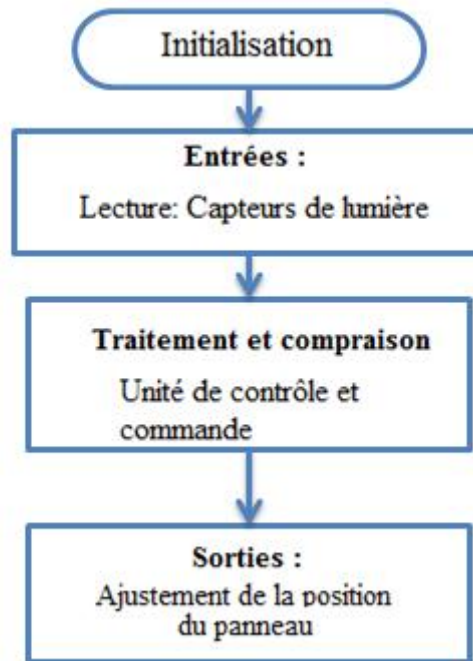


Figure I.18 : Méthode de poursuite active

Plusieurs algorithmes ont été développés au cours de ces dernières années. Aujourd'hui, les techniques de suivi reposent sur la rapidité de traitement de l'information et de commande via des systèmes électroniques classiques ou des électroniques embarquées (Figure I.19)[11].

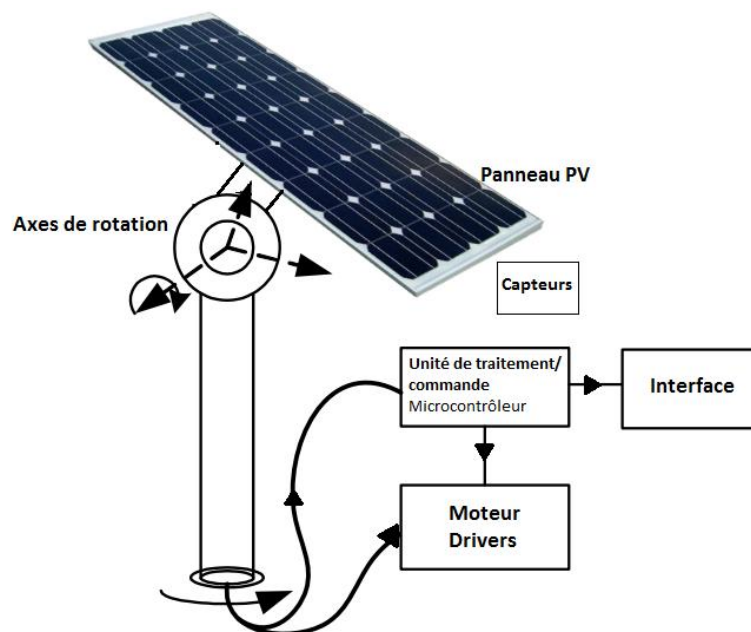


Figure I.19 : Principe général d'un système de suivi pour les panneaux PV

L'exemple ci-dessous démontre une méthode de suivi automatique récente et dont le système de suivi est composé par deux photodiodes, un comparateur de courant, une unité logique de traitement et un moteur comme unité d'action comme montré dans le schéma de principe de la figure

I.20. Les deux photodiodes convertissent les rayons solaires incidents en un signal électrique proportionnel à leurs intensités. Par la suite le comparateur compare les signaux reçus et envoie un signal de sortie à l'unité logique, qui commande le moteur de façon à réorienter le panneau solaire vers la direction où le rayonnement est plus intense. Or, lorsque le rayonnement solaire est très faible, une photodiode IR envoie un signal à l'unité logique pour arrêter le moteur et donc limiter les pertes et diminuer la consommation [12].

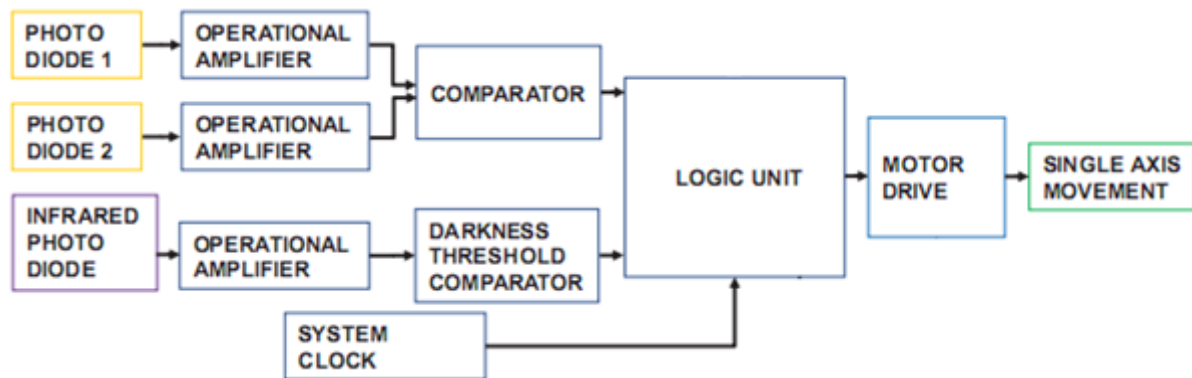


Figure I.20 Principe général du système de suivi à base de photodiode

Aussi, parmi les nouvelles techniques apparues récemment pour la poursuite solaire, il y a l'utilisation de caméras CDD ou CMOS [13]. Cette technique utilise des prises d'images du soleil captées par les caméras en temps réel, on procède ensuite par un traitement d'image via un logiciel (algorithme de traitement d'image) qui permet d'identifier le centre de gravité de chaque prise. A partir des résultats de traitement, on calcule la différence de l'angle entre la position du soleil et celle du panneau PV.

La figure suivante représente les grandes étapes de cette technique :

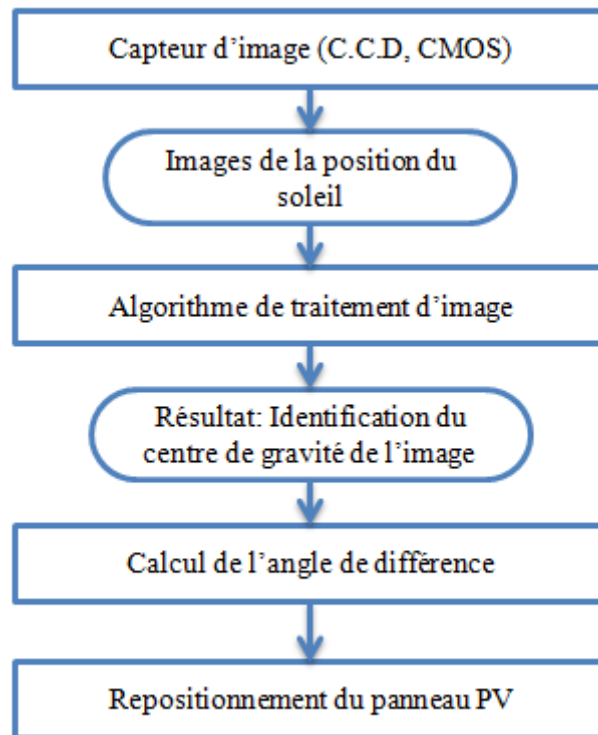


Figure I.19 : Principe de la méthode de suivi à base de caméra (CCD, CMOS)

IV. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons démontré la nécessité de déterminer avec exactitude les trajectoires empruntées par le soleil, de manière à définir la meilleure façon avec laquelle sera effectué le suivi automatique. Nous avons aussi présenté un état de l'art sur les méthodes de suivi. Un intérêt particulier a été porté à la technique de suivi active ou asservi reposant sur le principe du repérage via des capteurs de lumière. C'est cette technique qu'on a adoptée et qui va être étudiée en vue d'une réalisation matérielle.

On va aborder, dans le chapitre qui suit, les algorithmes de poursuite qui peuvent être programmés et implémentés pour tester l'efficacité de notre système.

■ CHAPITRE II

TECHNIQUES DE POURSUITE

Objectif : L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents algorithmes et technologies qu'on va adopter pour assurer la fonction du tracking du panneau PV.

I. Introduction

Au cours de la journée, le soleil se déplace continuellement. Dans une installation PV fixe, l'énergie fournie par les panneaux est maximale seulement à midi. Si les panneaux PV sont toujours orientés vers le soleil, c'est comme s'il y avait constamment la condition correspondant à midi, la puissance générée est toujours maximale, et pour les panneaux PV classiques et pour ceux à concentrateurs où les rayons doivent être perpendiculaires. Pour ce faire nous allons adopter la méthode active de poursuite, basée sur la différence d'éclairements des capteurs de lumières.

II. Méthodes de poursuite

2.1 Principe général

Les deux types de trackers solaires qui existent sont soit mono-axe soit double axe, qui s'appuient sur le même principe de poursuite, illustré dans la figure II.1. La technique utilisée pour cette étude repose sur la différence d'éclairement incident sur les capteurs de lumière photorésistance ou LDR (Light-Dependent-Resistor) séparés par des parois opaques et placés sur le panneau PV (figure II.2). Le circuit de contrôle et de commande assure la fonction de comparaison des signaux émis par les capteurs en calculant leurs différences, puis renvoie des impulsions au moteur pour repositionner le panneau perpendiculairement aux rayons solaires.

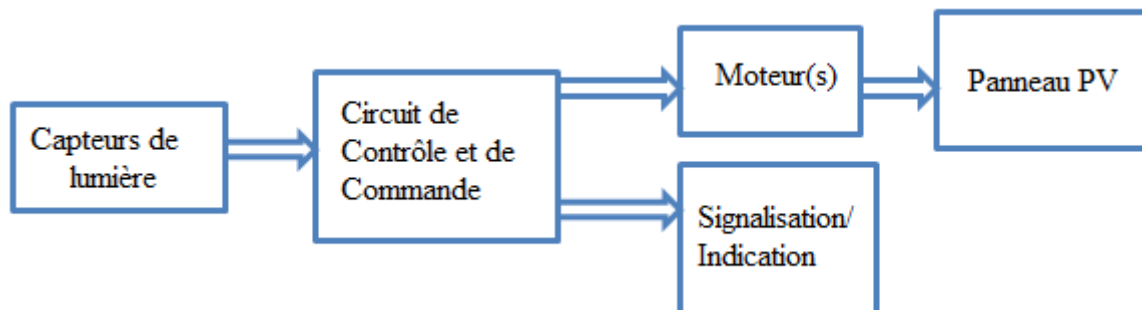


Figure II.1 : Principe général de la commande du tracking

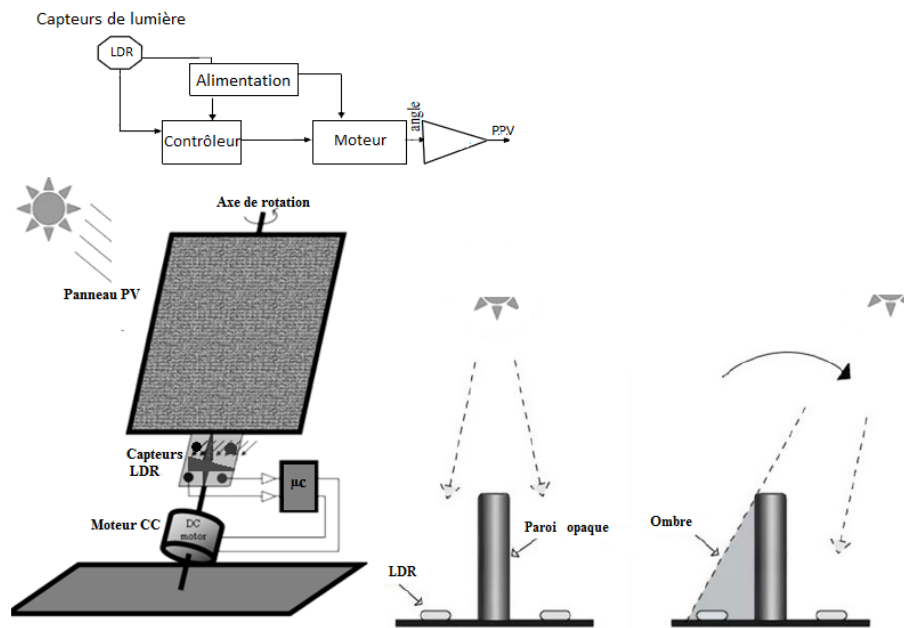


Figure II.2 : Schéma synoptique de la technique du tracking

La technique utilisée consiste à contrôler l'égalité d'éclairement de quatre capteurs de lumière répartis dans les quatre quadrants définis par les plans P1) et P2) qui se coupent suivant l'axe (Δ) représenté dans la figure II.3. Dans le cas d'un suiveur mono axe, une seule paroi est utilisée pour ombrager l'un des deux capteurs.

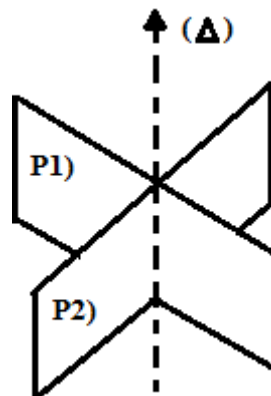


Figure II.3 : représentation des plans 1 et 2 séparant les LDR.

- La photorésistance ou LDR est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle elle est exposée [14]. En effet, sa résistance varie en fonction du flux lumineux incident, elle est inversement proportionnelle à la lumière reçue. Le choix s'est porté sur cette dernière vu que son temps de réponse est beaucoup plus court par rapport à la photodiode (caractéristiques : annexe II).

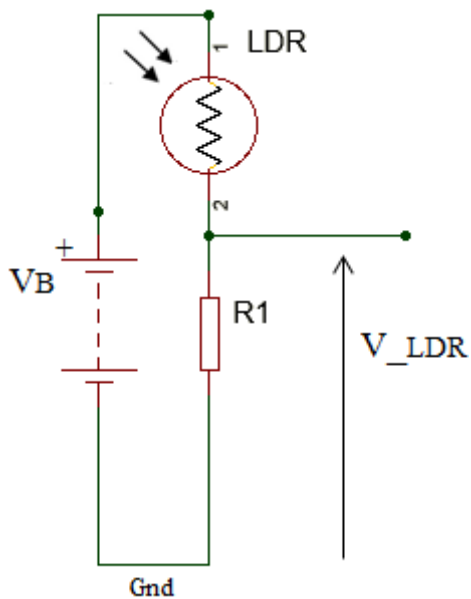


Figure II.4 : Circuit équivalent du capteur LDR utilisé

La tension délivrée par le capteur est donnée par la relation:

$$V_{LDR} = \frac{V_B \times R1}{R_{LDR} + R1} \quad (2.1)$$

où :

V_B tension batterie (V)
 R_{LDR} résistance de la LDR (Ω)

2.2 Tracker mono-axe

En partant du principe général précédent, on retrouve le suiveur mono-axe qui permet une rotation selon l'axe d'azimut seulement, et qui est le plus souvent utilisé en raison de sa simplicité. Le principe de fonctionnement repose sur l'algorithme de suivi décrit dans l'organigramme suivant (figure II.5).

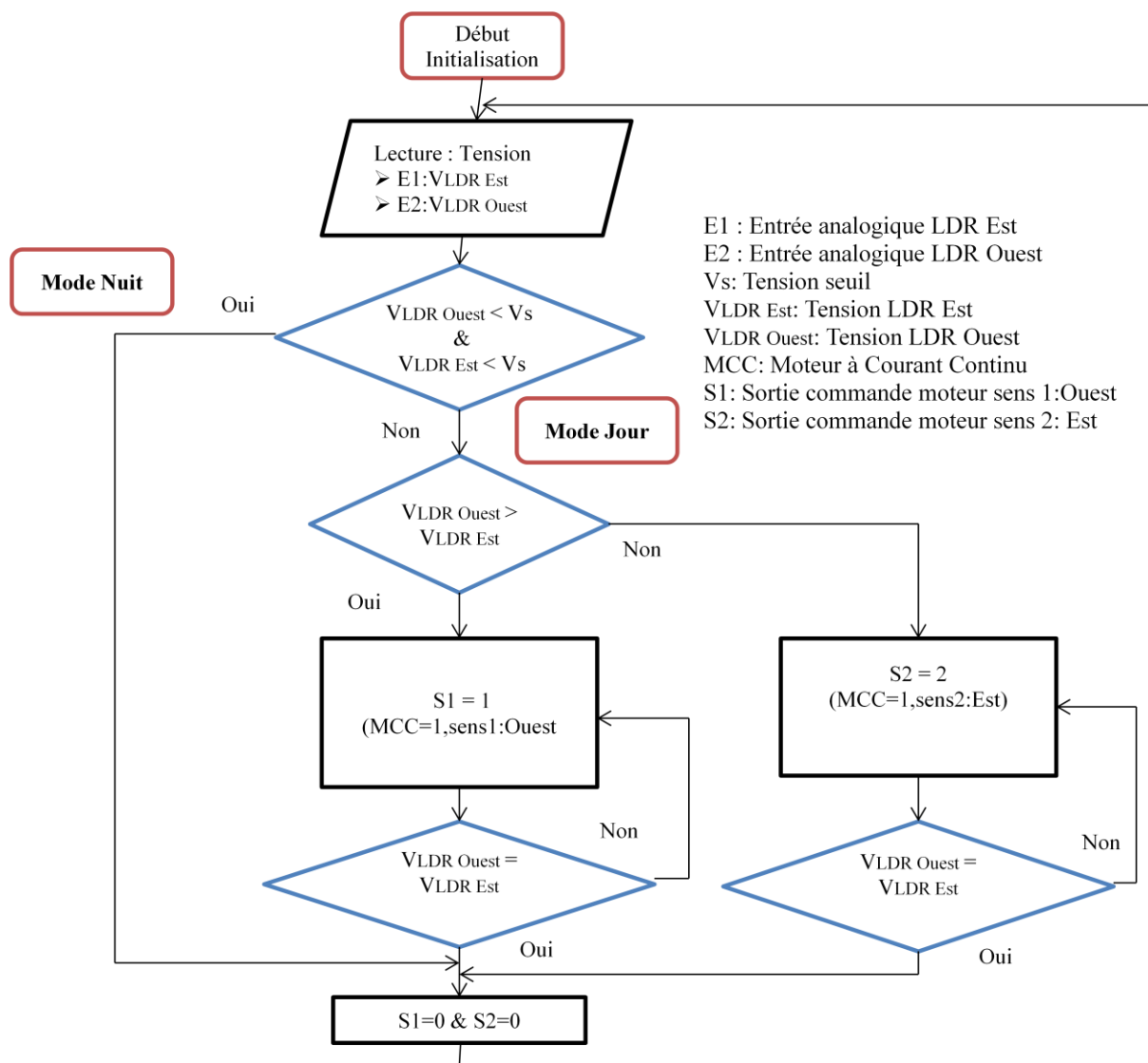


Figure II.5 : Organigramme de la méthode de suivi mono-axe

Comme montré dans la figure II.5, on différencie d'abord entre le mode jour et le mode nuit via les tensions des deux capteurs de lumière LDR. Si la tension délivrée est inférieure à Vs (tension seuil en V) aucun changement n'est porté à la position du panneau, le système est en mode arrêt. Si on prend par exemple le cas où VLDR ouest > VLDR Est cela signifie que le capteur de lumière situé à l'Ouest est plus exposé au rayonnement solaire alors que l'autre capteur est ombragé, la sortie S1 est donc activée, le panneau s'oriente vers la source de lumière direction Ouest. On suit le même raisonnement dans le cas inverse. Globalement, on peut distinguer les 4 cas suivants:

VLDR ouest < Vs & VLDR Est < Vs

Mode nuit, système en veille.

VLDR ouest > VLDR Est

Mode jour, rotation du panneau PV vers l'Ouest.

VLDR ouest < VLDR Est

Mode jour, rotation du panneau PV vers l'Est.

VLDR ouest = VLDR Est

Condition d'arrêt, le panneau est dans une position optimale.

2.3 Disposition des capteurs LDR

Pour les quatre cas cités précédemment, il est indispensable de prendre en considération trois paramètres lors de la disposition des capteurs LDR. L'angle « ϵ » de l'ombre solaire qui est en fonction de la hauteur « H » de la paroi, et la distance « d » qui la sépare du capteur comme représenté sur la figure II.6 ; en effet « ϵ » est l'angle seuil de déclenchement ou seuil de l'ombre solaire.

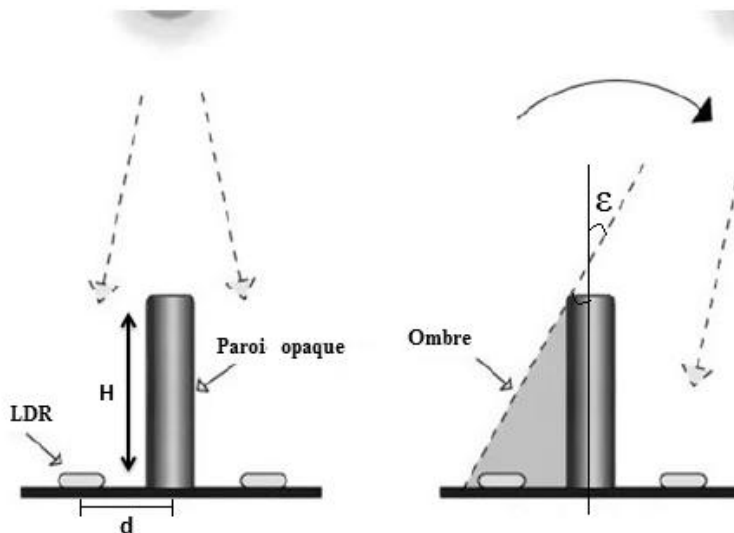


Figure II.6 : disposition des capteurs LDR pour un tracker mono-axe

Ces paramètres sont définis par les équations suivantes :

$$\epsilon = \text{Arcsin} \frac{d}{\sqrt{d^2 + H^2}} \quad (2.2)$$

$$H = \frac{d}{\tan \epsilon} \quad (2.3)$$

où :

- H Hauteur de la paroi en (cm)
- d distante entre la paroi et la capteur de lumière LDR en (cm)
- ϵ angle de l'ombre solaire en (°).

2.4 Tracker double axe

Pour assurer un suivi complet de la course solaire (en azimut et en zénith), on additionne, à l'architecture précédente (figure II.7), deux autres capteurs LDR pour couvrir les changements (Nord-Sud) de la déclinaison solaire « δ » qui varie de $+23.45^\circ$ à -23.45° durant l'année.

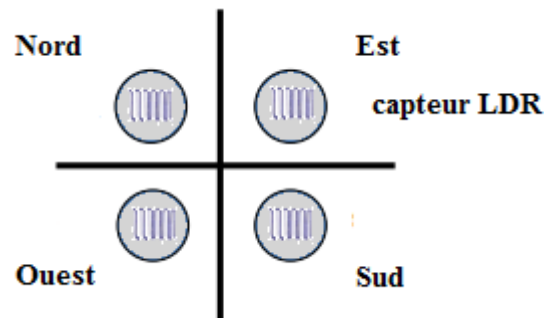


Figure II.7 : Vue d'en haut de la disposition des quatre capteurs LDR

Le principe est le même pour le suiveur double axe, il est basé sur la différence d'éclairement des quatre LDR. La figure II.8 représente l'organigramme de l'algorithme de poursuite en double axe. En plus des cas étudiés ci-dessus pour le mono-axe, on rajoute les trois autres cas suivant:

$VLDR_{Nord} > VLDR_{Sud}$

$VLDR_{Nord} < VLDR_{Sud}$

$VLDR_{ouest} = VLDR_{Est} \text{ \& } VLDR_{Nord} = VLDR_{Sud}$

rotation du panneau PV vers le Nord.

rotation du panneau PV vers le Sud.

Condition d'arrêt, le panneau est dans une position optimale.

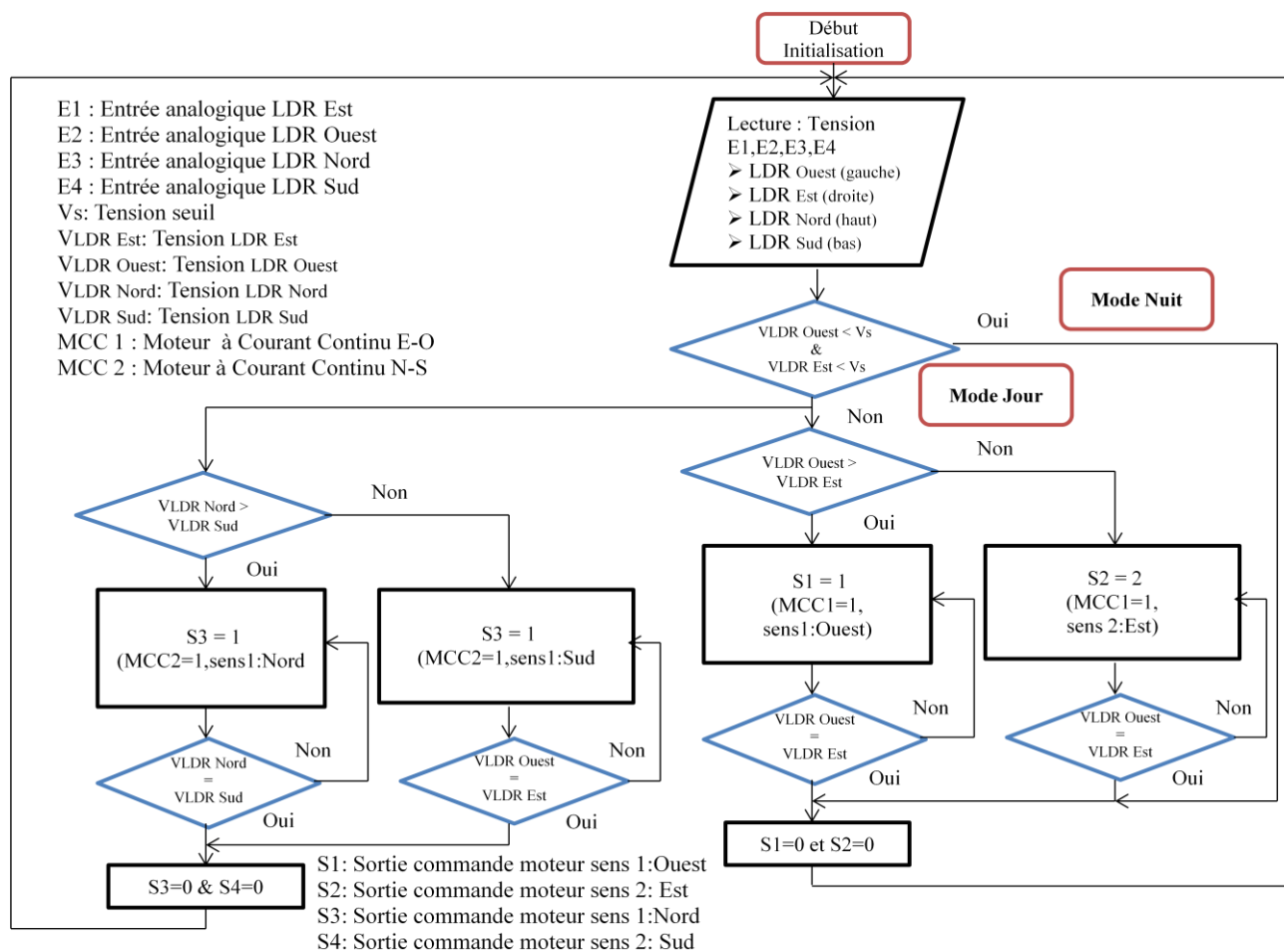


Figure II.8 : Organigramme de la méthode de suivi double axe

III. Conception et dimensionnement

L'objectif de l'étude est de concevoir une carte de commande et contrôle des trackers solaires pour panneaux PV quelque soient leurs dimensions et caractéristiques. Cette carte a pour rôle de conditionner le signal provenant des capteurs de lumière, le traiter en calculant l'erreur et par la suite réorienter le panneau. Les caractéristiques d'un suiveur (tracker) solaire peuvent varier selon différents constructeurs et designers. Or, pour appliquer l'une des techniques de suivi et utiliser un type de motorisation précis et convenable, il est indispensable de spécifier les caractéristiques de chacun des éléments utilisés pour la conception du système de tracking.

➤ Vitesse de rotation du panneau

Pour calculer la vitesse de rotation du panneau, il faut déterminer le nombre d'heures d'irradiation solaire durant une journée. Autrement dit le nombre d'heures à partir du lever du soleil jusqu'à son coucher. Ce nombre est égal en moyenne à 12 heures (entre saison d'été et d'hiver)[11]. A partir de cette valeur, on peut effectuer les calculs suivant :

$$\omega_{pv} = \frac{180^\circ}{12h} = \frac{\pi}{12 \times 3600} \text{ rad/s} \text{ avec: } \omega_{pv} \text{ vitesse de rotation du panneau PV} \quad (2.4)$$

$$\omega_{pv} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

$$\omega_{pv} = 15 \text{ degrés/h}$$

En effet, cette valeur rejoint les calculs astronomiques où le mouvement relatif du soleil est un déplacement de 1 degré toutes les 4 minutes (15 degrés/h) [7]. Ainsi à partir des calculs obtenus on peut fixer la valeur optimale du seuil de l'angle de l'ombre solaire ϵ , et la hauteur H de la paroi qui déterminent la précision du système de poursuite.

Pour un seuil de déclenchement de $\epsilon = 3.75^\circ$ -qui est équivalent à un changement de position toute les 15 minutes- et à partir des équations (2.2 et 2.3), on trouve :

$$H = \frac{d}{\tan \epsilon} = \frac{1}{\tan(3.75)}$$

$$H = 15.25 \text{ cm}$$

III. Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les deux algorithmes de poursuite mono-axe et double-axe qui permettent d'optimiser les performances d'un panneau PV classique et d'assurer le bon fonctionnement de celui à concentrateurs, en faisant en sorte que les rayons solaires y soient perpendiculaires. L'étape suivante consiste à traduire ces algorithmes en langage approprié pour pouvoir les tester, simuler et par la suite faire une réalisation de la carte de commande.

■ CHAPITRE III

TESTS, SIMULATIONS & REALISATION

Objectif : L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats de tests et de la simulation ainsi que la description de la réalisation de la carte de commande du tracker solaire.

I. Introduction

Cette dernière étape est consacrée à l'implémentation matériels, tests et simulations de la technique adoptée dans cette étude, c'est la partie électronique qui va assurer la commande de tout le système. Pour ce faire, il est indispensable d'identifier la technologie choisie ainsi que les blocs qui seront utilisés (figure III.1). Notre choix s'est porté sur l'utilisation du microcontrôleur PIC16F887 comme circuit intégré pour l'exécution du programme qui sera traduit en langage C, bien que d'autres cartes puissent être utilisées aussi. Une présentation de l'environnement logiciel est éventuellement décrite dans ce chapitre, expliquant la procédure adoptée pour une simulation en temps réel de ce projet.

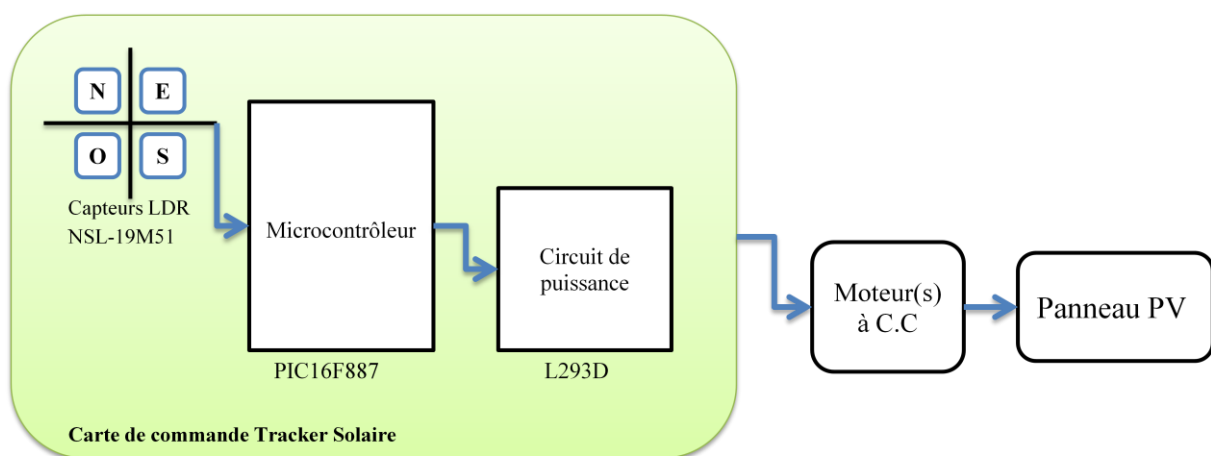


Figure III.1 carte de commande d'un tracker solaire

II. Contexte matériels

2.1 Capteur LDR NSL-19M51

La principale utilisation de la photorésistance LDR dans notre étude est la mesure de l'intensité lumineuse. En outre, des matériaux utilisés et qui sont généralement du sulfure ou du sélénium de cadmium [14] qui se comportent comme des semi-conducteurs, ce capteur représente un temps de réponse de 120 millisecondes pour un éclairement de 10 lux (valeur pour des conditions d'ensoleillement faible).



Figure III.2: Capteur LDR

Le tableau ci-dessous représente les valeurs typiques de fonctionnement de la photorésistance solaire utilisée [12].

Paramètres	Conditions d'éclairement	Min.	Typique	Max.	Unités
Résistance	1000 lux	-	400	-	Ω
	10 lux	-	9	-	k Ω
	Obscurité	1	-	-	M Ω
Temps de montée	1000 lux	-	2.8	-	ms
	10 lux	-	18	-	ms
Temps de descente	1000 lux	-	48	-	ms
	10 lux	-	120	-	ms

Tableau III.1 : Caractéristiques de la LDR NSL-19M51

2.2 Circuit de commande par microcontrôleur

Les microcontrôleurs sont aujourd'hui implantés dans la plupart des applications. Il en existe plusieurs familles. La société Micro chip Technologie a mis au point un microcontrôleur CMOS : le PIC (Peripheral Interface Contrôler) [16]. Cependant, le choix d'un PIC est directement lié à l'application envisagée :

- Il faut dans un premier temps déterminer le nombre d'entrées/sorties nécessaires pour l'application. Ce nombre d'entrées/sorties nous donne une première famille de PIC.
- Il faut ensuite déterminer si l'application nécessite un convertisseur Analogique/Numérique comme il est le cas dans notre étude pour les signaux issus des capteurs de lumières; ce qui va centrer un peu plus vers le choix d'une famille précise.
- La rapidité d'exécution est un critère important, il est donc primordiale de consulter les Data-Book pour effectuer une vérification de la compatibilité entre la vitesse maximale du PIC choisi et la vitesse maximale nécessaire pour l'application considérée.
- Limiter le choix à la taille de la RAM interne convenable et la présence ou non d'une EEPROM pour mémoriser les données et le programme implémenté.

Pour notre projet, on a choisi le microcontrôleur PIC 16F887 représenté en circuit intégré dans la figure III.3.

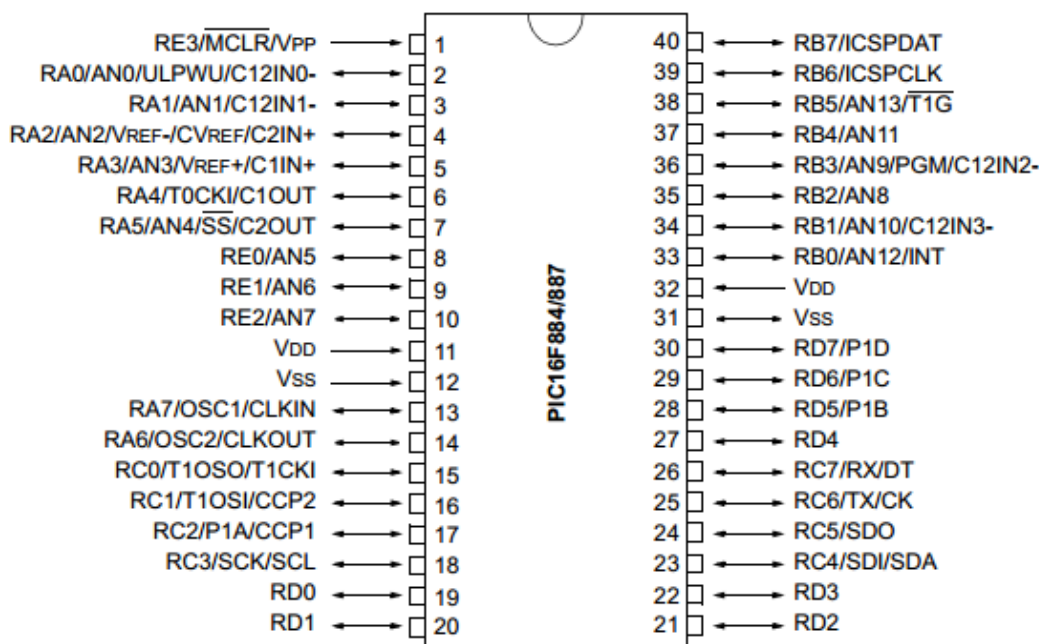


Figure III.3 : Brochage du PIC 16F887 sous la forme d'un boîtier DIL

2.3 Circuit de puissance L293D

Le circuit de puissance est la partie intermédiaire qui relie le moteur et le microcontrôleur. Le PIC génère en sortie 4 signaux. Pour piloter les deux moteurs à courant continu du tracker solaire dans les deux sens nous avons eu recours à un circuit de puissance L239D comme représenté sur la figure III.4 en circuit intégré [17]. Il s'agit en fait d'un double pont en H à transistors bipolaires (figure III.5) pour charges inductives, comme le sont les moteurs CC.

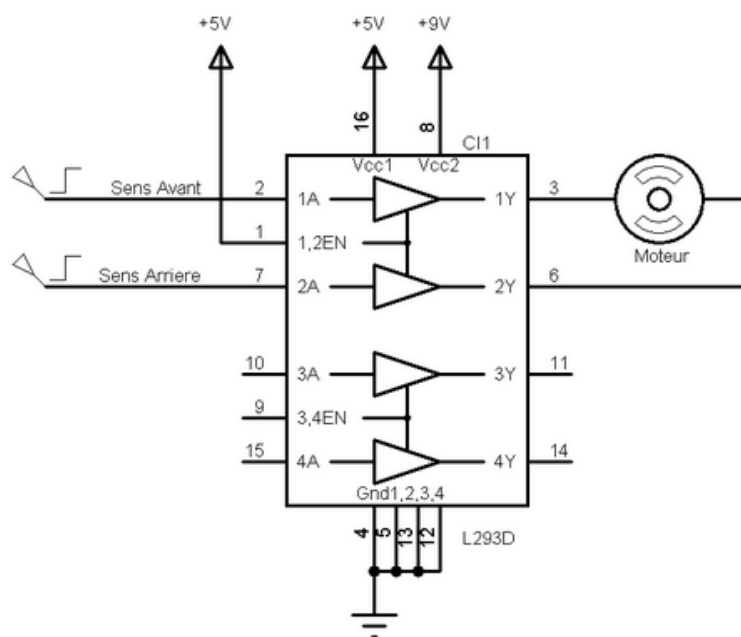


Figure III.4 : représentation du circuit intégré L293D à double pont en H

Le symbole en triangle indique que le niveau en sortie de Y est dicté par le niveau sur l'entrée A quand la ligne de EN est activée, le tableau 3.2 regroupe les cas qui peuvent exister.

Entrée INT[A] A E(1,2)		Sortie OUT[Y]
H	H	H
B	H	B
X	B	Z

Tableau III.2 : Les différents cas de la sortie du circuit de puissance [17]

Avec H : niveau logique Haut
B : niveau logique Bas
Z : Haute impédance (aucune sortie).

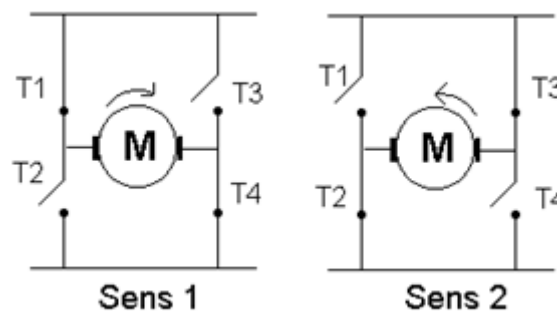


Figure III.5 : Variation de sens du moteur par pont en H

III. Contexte logiciels

Cette partie est consacrée à la présentation, d'une part, du logiciel de compilation qui nous a permis de traduire et vérifier l'algorithme de poursuite en un langage approprié à savoir mikroC PRO for PIC, et d'autre part, du pack Proteus qui intègre ISIS destiné à la simulation et la réalisation des circuits électroniques. Dans le cas présent, nous allons simuler le comportement du microcontrôleur PIC et de son interaction avec les composants qui l'entourent. La figure suivante représente la méthodologie suivie pour la simulation de la carte de commande.

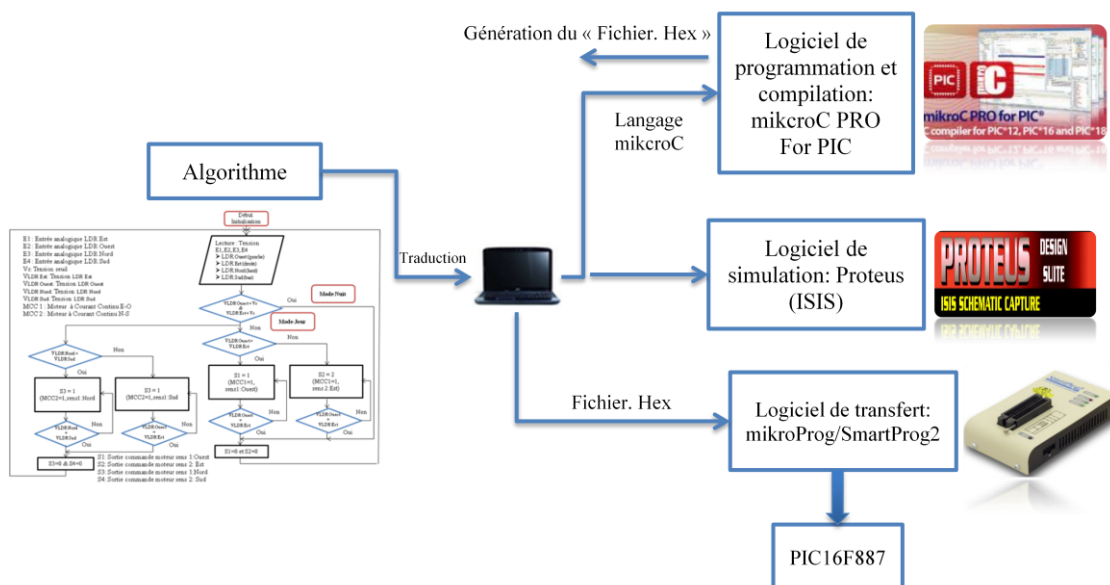


Figure III.6 : Cheminement de la programmation et de la simulation

3.1 mikroC PRO For PIC

Dans un premier temps, nous avons procédé par une programmation en langage mikroC. Ce dernier retrouve une large application pour le développement de systèmes embarqués à base de microcontrôleur. Il assure une combinaison de l'environnement de programmation avancée IDE (Integrated Development Environment), et d'un vaste ensemble de bibliothèques pour le matériel utilisé pour notre projet.

La compilation du programme « Tracker » en mikroC permet de générer le fichier « .hex » (codé en hexadécimal). C'est ce fichier qui contient le programme qui sera télé-versé sur le microcontrôleur PIC et exécuté par ce dernier. Un exemple est présenté dans l'annexe III.

3.2 Test et simulation via Proteus_ISIS

Dans notre étude, nous avons opté pour une simulation sous ISIS. Cet environnement permet de tester et récupérer en temps réel les résultats de la simulation.

- La figure III.7 illustre la représentation du schéma électrique équivalent des capteurs de lumières, en se servant du composant LDR_Torch mis en disposition avec son packaging dans les bibliothèques du logiciel, et ce dans le but de faire varier la résistance des LDR (soit ombragée ou éclaircissement varié).

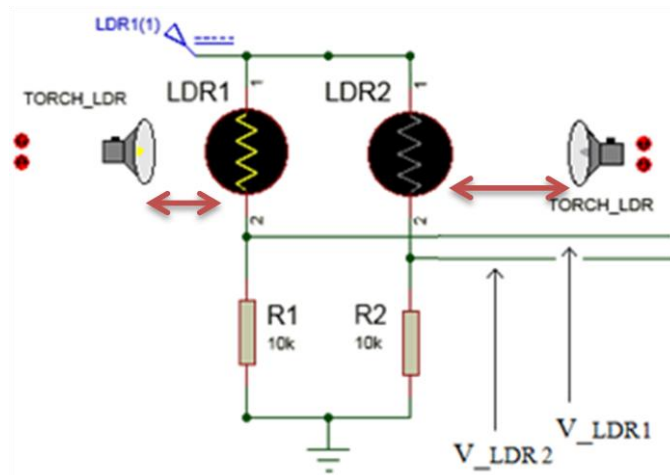


Figure III.7 : LDR_Torch utilisé

Pour un éclaircissement faible inférieur à 10 lux correspondant à un seuil de l'ombre de déclenchement $\epsilon=3.75^\circ$ (déterminé dans le chapitre II), on aura $V_{LDR} < V_s$ condition relative au mode nuit, où V_s est la tension seuil, qui est égale à **2,63V** (à partir de l'équation 2.1).

■ Nous avons par la suite complété le circuit de la carte de commande comme indiqué dans la figure III.8, en assurant le brochage des capteurs LDR avec le microcontrôleur PIC dont on a associé le programme Tarcker.hex à exécuter, en éditant les propriétés du composant. Finalement, on a relié les deux fils des moteurs à courant continu avec les sorties du circuit de puissance L293D pour assurer une rotation en double sens.

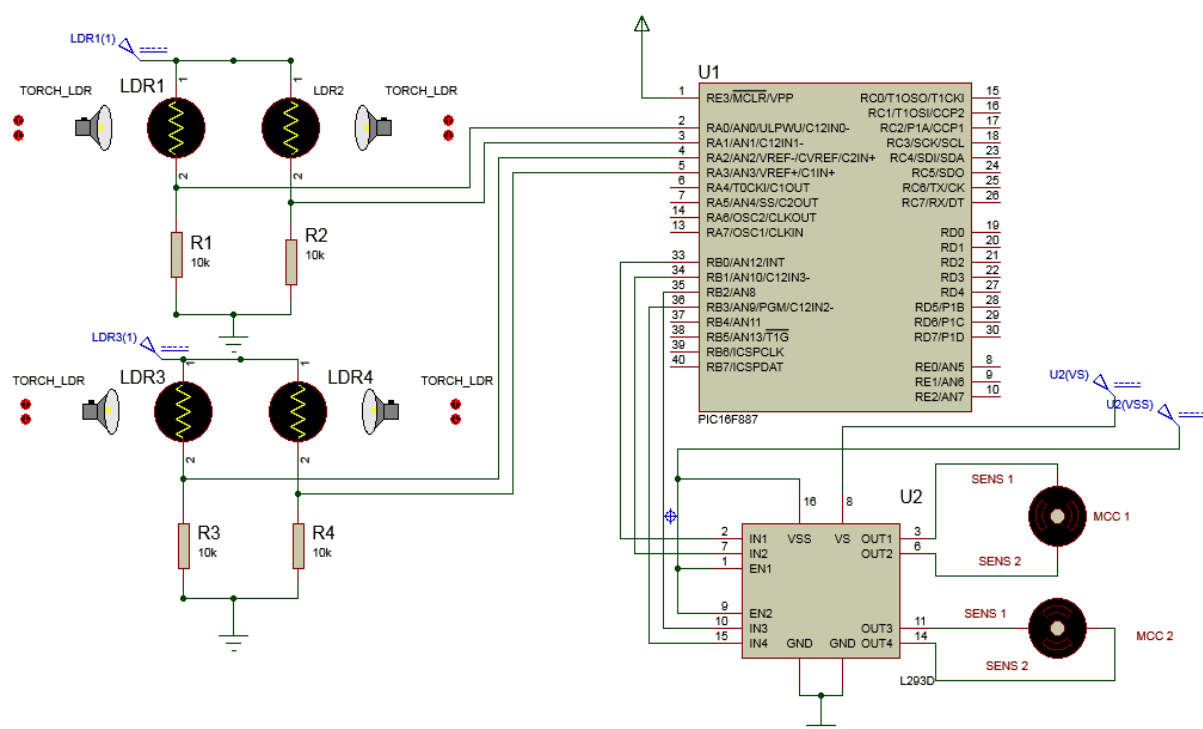


Figure III.8 Configuration du schéma de simulation

3.3 Fonctionnement de la carte de simulation

Les capteurs de lumières LDR envoient un signal électrique aux ports analogiques RA0/1 du microcontrôleur. Celui-ci lit le signal qui peut être $<2,63V$ pendant la nuit et $>2,63V$ dans le cas du jour. Si c'est ce dernier cas qui se présente, le PIC envoie un signal au circuit de puissance à travers les ports RB 0/1/2/3. Ce dernier provoque la rotation du moteur dans le sens de la LDR la moins éclairée. Deux moteurs à courant continu sont employés pour une rotation en monture azimutale et zénithale. L'amplitude et la durée de l'impulsion de la commande sont fixées durant la phase de programmation, elles dépendent du panneau PV utilisé et de la motorisation choisie (poids du module PV, couple moteur (N.m)).

Pour tester la carte de notre projet et pour visualiser les signaux de commande des deux moteurs à CC, nous avons branché un oscilloscope pour chaque sorties. Les figures suivantes représentent plusieurs cas en fonction de la variation de l'éclairement sur les quatre LDR.

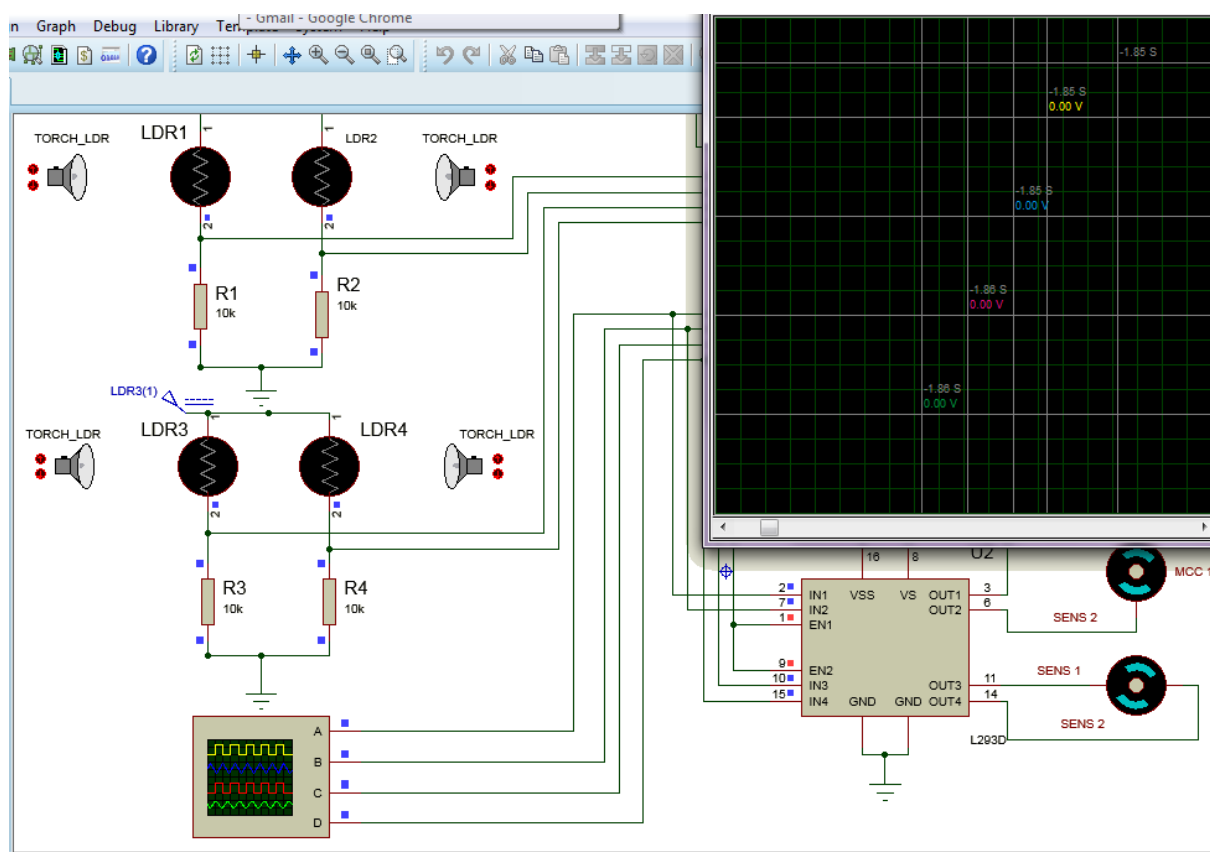


Figure III.9 Simulation de la sortie en absence d'éclairement

- La figure III.9 traduit une absence d'éclairement sur les quatre LDR et où la sortie indique une tension de 0V, le système est en mode arrêt, aucun moteur n'est en rotation.

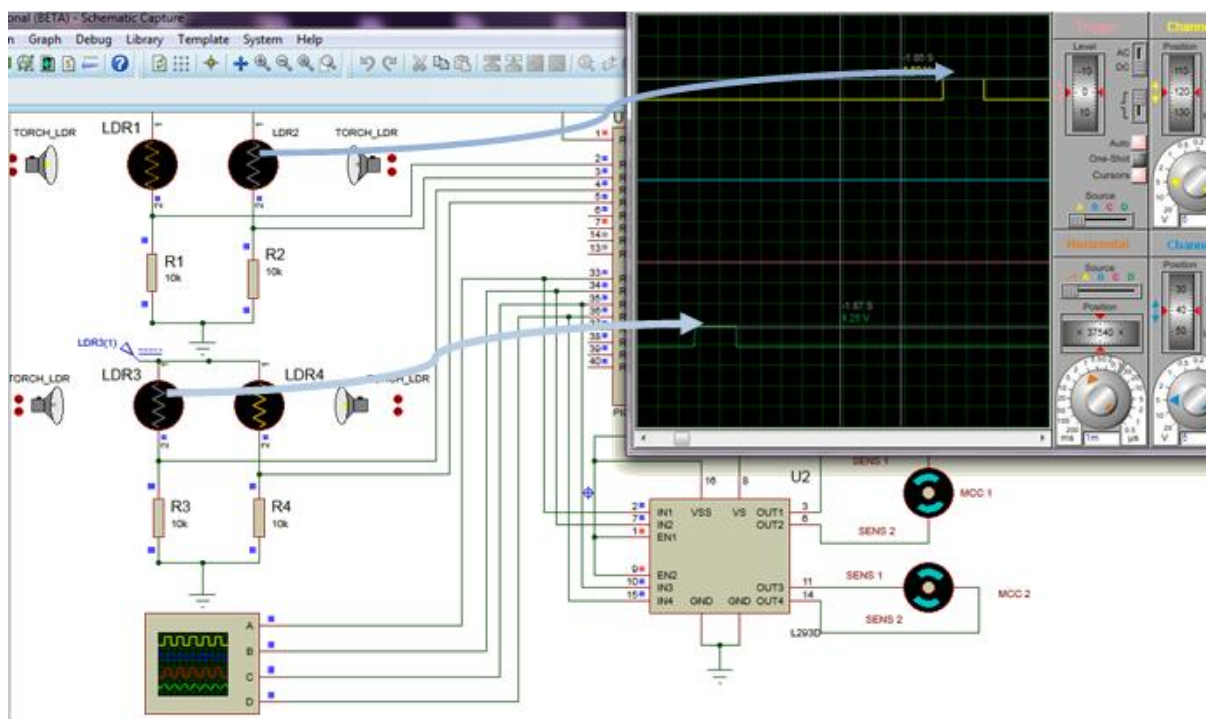


Figure III.10 Simulation de la sortie pour une variation de l'éclairement sur LDR-Ouest et LDR-Nord

- La rotation du moteur MCC1 est commandée dans le sens 1 lorsque la LDR située au quadrant Ouest est ombragée. Le signal représenté en jaune sur l'écran de l'oscilloscope de la figure III.10 correspond à l'impulsion délivrée au moteur 1 en fonction du temps. Le même raisonnement s'applique pour le moteur à CC 2 où l'impulsion est représentée en couleur verte sur l'écran de l'oscilloscope pour indiquer le sens de rotation.

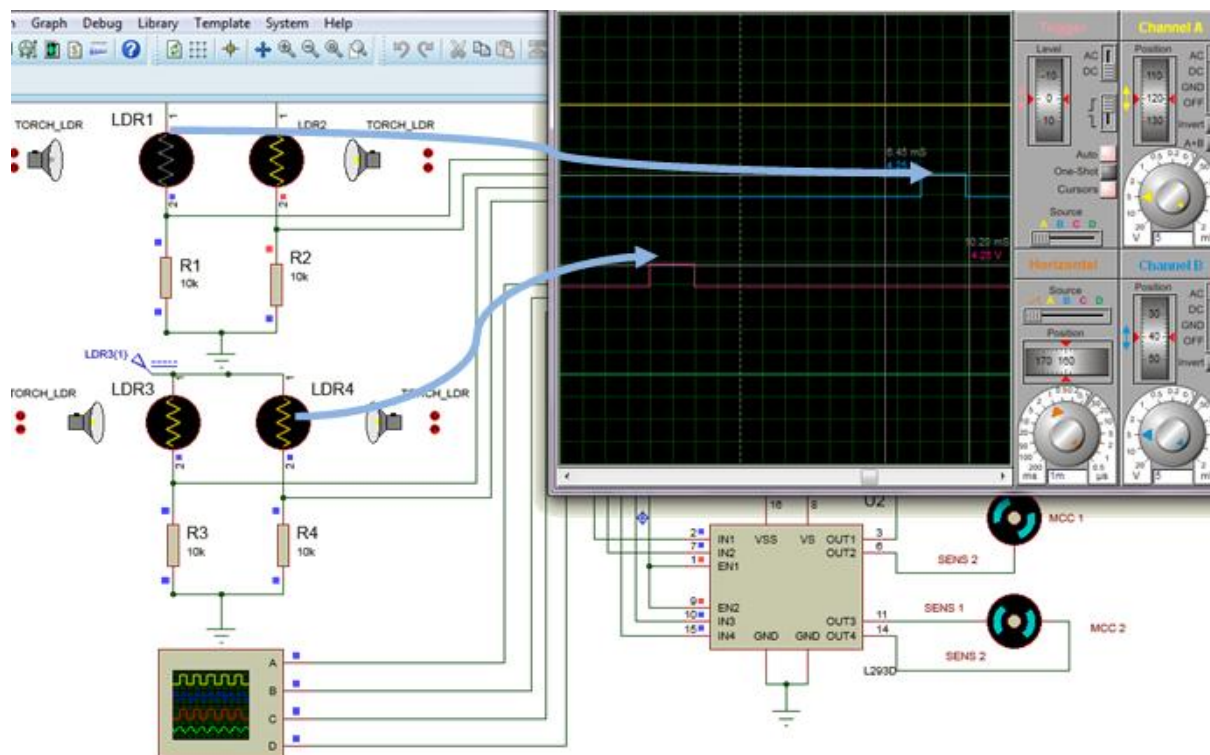


Figure III.11 Simulation de la sortie pour une variation de l'éclairement sur LDR-Est et LDR-Sud

- Par opposition aux cas simulés précédemment, nous avons dans la figure III.12 représenté la rotation des deux moteurs dans le sens inverse en agissant sur la différence d'éclairement sur les deux autres LDR à savoir ceux placées en Est et en Sud respectivement.

IV. Conclusion

L'objectif de cette dernière partie était de présenter les résultats finaux de l'implémentation matérielle de la technique de poursuite étudiée lors de ce projet, et ce à travers une simulation en temps réelle sous l'environnement logiciel. Nous avons énuméré les démarches suivies pour la programmation et l'implémentation, ensuite nous avons traité quelques cas possibles qui peuvent exister pour visualiser le sens de rotation des deux moteurs.

CONCLUSION GENERALE

Dans une installation photovoltaïque, un système de poursuite solaire se révèle important pour collecter le maximum d'énergie. Pour les modules PV à base de concentrateurs, où les rayons solaires doivent être constamment perpendiculaires au panneau, un système de poursuite solaire est indispensable. L'objectif de notre travail a porté sur l'élaboration d'une technique active de suivi de la trajectoire solaire durant toute l'année.

Notre solution consiste en l'utilisation de quatre capteurs de lumière (LDR) placés selon une géométrie bien précise sur le support des panneaux PV. Les signaux issus de ces quatre capteurs sont traités par le microcontrôleur PIC qui commande les moteurs à CC à travers un circuit de puissance.

Un premier prototype de la carte électronique de suivi a été réalisé afin d'évaluer expérimentalement les performances du système en visualisant les signaux de commande.

Nos perspectives pour ce projet seront de réaliser le prototype d'un tracker solaire double axe autonome, tout en améliorant le circuit de puissance pour adapter le système à tout types de structure. Nous pensons aussi à généraliser la commande des suiveurs solaires à bas coût pour toute une station photovoltaïque.

Ce projet de fin d'étude m'a apporté de nouvelles connaissances dans le domaine des énergies renouvelable et en particulier l'énergie solaire qui est en plein essor.

BIBLIOGRAPHIE /WEBOGRAPHIE

- [1] Statistiques (2011) de IEA : International Energy Agency ; www.iea.org/statistics
Consulté le 02/2014
- [2] www.masen.org.ma Consulté le 03/2014
- [3] www.invest.gov.ma Consulté le 03/2014
- [4] Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement Département de l'Energie
et des Mines www.mem.gov.ma Consulté le 04/2014
- [5] National Renewable Energy Laboratory (NREL) 2013 International Renewable Energy
Conference
- [6] Zafrullah Jagoo (11/2012), Tracking Solar Concentrators A Low Budget Solution, University
of Mauritius, SpringerBriefs in Energy.
- [7] True Local Solar Time, chapter from Heluo's Four Pillars of Destiny workbook (550 pages).
- [8] 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
- [9] Practical Solar - Technology- février 2008.
- [10] Sukhraj Singh Cheema (06/2012).Simulation Studies on Dual Axis Solar Photovoltaic Panel
Tracking System. Thapar University Patiala.
- [11] Yusie Rizala, Sunu Hasta Wibowoa, Feriyadi. Application of solar position algorithm for sun-
tracking system. International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application
ELSEVIER Energy Procedia (32) 2013; p. 160 – 65.
- [12] D. Vincenzi, F. Aldegheri, S. Baricordi, P. Bernardoni, G. Calabrese, V. Guidi, L. Pozzetti.
Low Concentration Solar Louvres For Building Integration. 9th International Conference on
Concentrator Photovoltaic Systems AIP Conf. Proc. 1556, 2013; p. 110-13.
- [13] Jiunn-Chi Wu, Wu-Chun Lin. High Accuracy Sun-Tracking Using CCD And Field Test For
PV System. 9th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems AIP Conf.
Proc. 1556, 2013; p. 214-17.

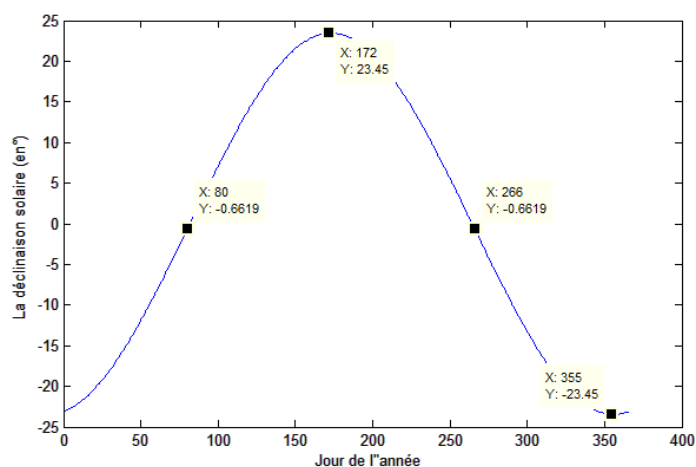
- [14] Optoelectronic detectors, Dr. Heiner Ryssel, Indian Institute of Technology, Madras 9th INDO –German Winter Academy 2010.
- [15] Data pack F Issued 232-3816 Light dependent resistors Datasheet NSL19-M51
- [16] Microchip PIC16F887 Data sheet 28/40/44-Pin Enhanced Flash-Based, 8Bit CMOS Microcontrollers
- [17] Texas Instruments L293, L293D Quadruple H drivers SLRS008C

ANNEXE 1

- La déclinaison solaire : calcul du numéro du jour
- $$\delta = \text{Arcsin} (\cos (0.98563(J - 173)) 0.39795$$

Mois	Numéro du jour
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	
Date	Numéro du jour
équinoxe printemps	21 mars 80
solstice été	21 juin 172
équinoxe automne	23 septembre 266
solstice hiver	21 décembre 355

Tableau A1.1 calcul du numéro du jour



Variation annuelle de la déclinaison solaire

➤ L'angle horaire $\omega(^{\circ})$:

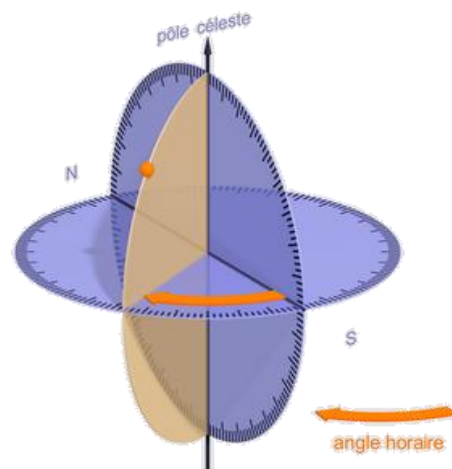


Figure A1.1 Représentation de l'angle horaire

$$\omega = 15(Ts - 12)$$

Ts : Temps solaire

Ts (Temps solaire) Calcul de l'heure qui est basé sur les déplacements du soleil par rapport à l'axe de la Terre durant une journée complète, Quand le soleil est à son zénith, le temps solaire indique qu'il est midi.

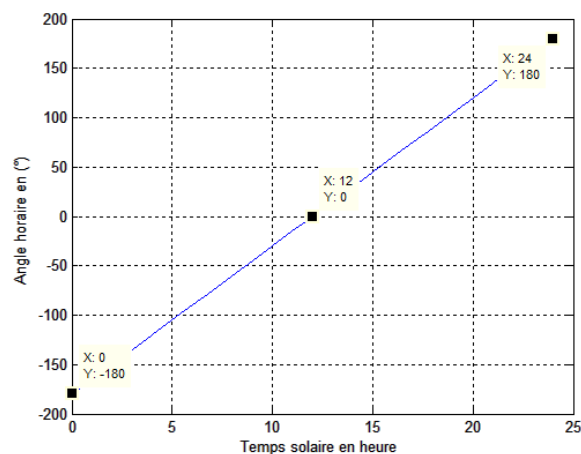
$$Ts = TL - \left(TU - \frac{L}{15}\right) + \frac{dt}{60}$$

TU : Temps universel, décalage horaire par rapport au méridien de greenwich.

TL : Temps légal

dt : correction de l'équation du temps

L : Longitude du lieu



➤ Elévation solaire

$$\alpha = \text{Arcsin}(\sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega)$$

Varie entre -90° à $+90^\circ$: $\alpha > 0^\circ$ le jour , $\alpha < 0^\circ$ la nuit et $\alpha = 0^\circ$ au lever et au coucher du soleil.

➤ Azimut du soleil

$$Az = \text{Arcsin}\left(\frac{\sin \omega \times \cos \delta}{\cos \alpha}\right)$$

Varie entre -180° à 180° : $Az > 0$ vers l'Ouest, $Az < 0$ vers l'Est, et $Az = 0$ direction du sud

ANNEXE II

➤ Caractéristiques de la LDR NSL-19M51 [15]

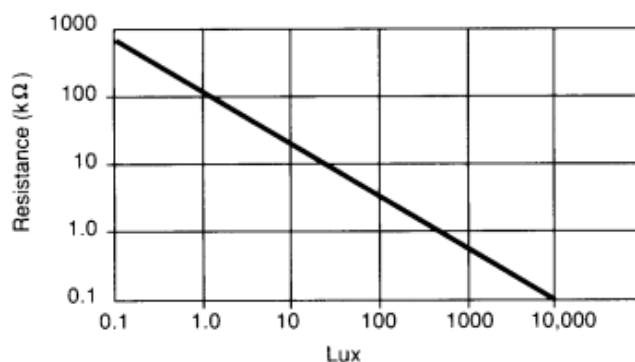


Figure A2.1 La résistance en fonction du flux de lumière (en lux)

avec : $1 \text{ w/m}^2 = 683 \text{ lux}$ (683 lumen/m²)

Dimensions

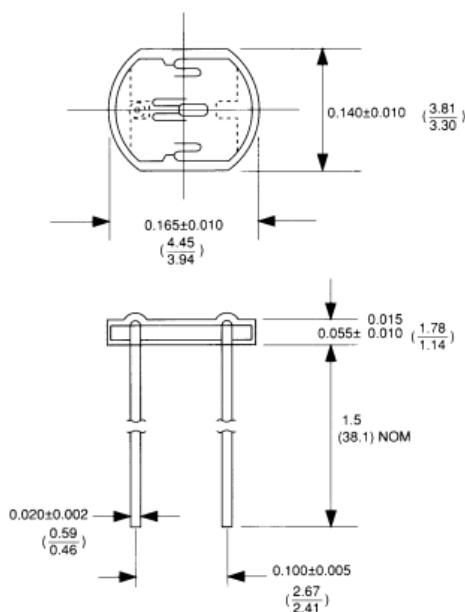


Figure A2.2 Dimensions en (mm) du capteur LDR

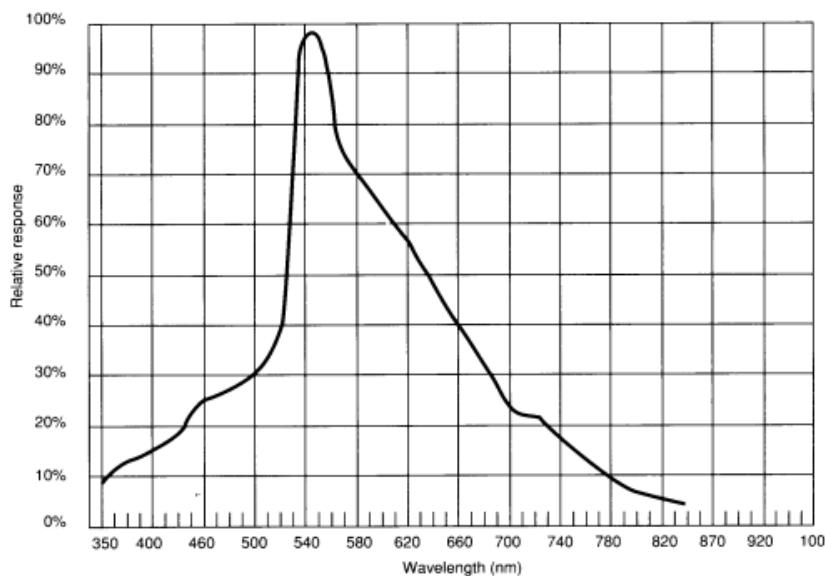


Figure A2.3 Réponse spectrale du capteur LDR

ANNEXE III

➤ Génération du fichier .Hex :

```
|:020000003F2897
:0E0006008312031321088A00200882000800DC
:0E0014001D3083120313FD00FD0B0E280800A3
:10002200C330831203139F05C0309F002B08F000DA
:10003200F00D7010F00D701070089F0483169F175A
:1000420083121F140A209F149F1C292800002528B0
:100052001F101E08F100F00183161E08F004003084
:04006200F10408009D
:1000660003208A110A128000840AA00A0319A10A31
:08007600F003031D332808000C
:10007E008312031386018316860103178901033049
:10008E0088000330031385008312A401A501A60185
:10009E00A701A201A301A801A901AA0108302A0201
:1000AE0003188B28AB01112070088312A407710866
:1000BE000318013EA5070130AB0011207008831212
:1000CE00A60771080318013EA7070230AB001120E6
:1000DE0070088312A20771080318013EA3070330AC
:1000EE00AB00112070088312A80771080318013E97
:1000FE00A9070630FC003030FD00FD0B8428FC0BF8
:10010E0084280000AA0A552829082302031D9128D5
:10011E00280822020318A82806150B30FC006230AE
:10012E00FD00FD0B9828FC0B9828000006110530E9
:10013E00FC002630FD00FD0BA228FC0BA2280000BF
:10014E00C42823082902031DAE28220828020318FA
:10015E00C42886150B30FC006230FD00FD0BB5285F
:10016E00FC0BB528000086110530FC002630FD0082
:10017E00FD0BBF28FC0BBF28000025082702031D1E
:10018E00CA28240826020318E12806140B30FC00A6
:10019E006230FD00FD0BD128FC0BD12800000610AB
:1001AE000530FC002630FD00FD0BDB28FC0BDB28A8
:1001BE000000FD2827082502031DE7282608240233
:1001CE000318FD2886140B30FC006230FD00FD0B79
:1001DE00EE28FC0BEE28000086100530FC002630C1
:1001EE00FD00FD0BF828FC0BF82800004B28FE281C
:04400E00F22F000786
:00000001FF
```

Figure A3.1 : Fichier.hex généré à parti de la compilation

D'après le datasheet du composant :

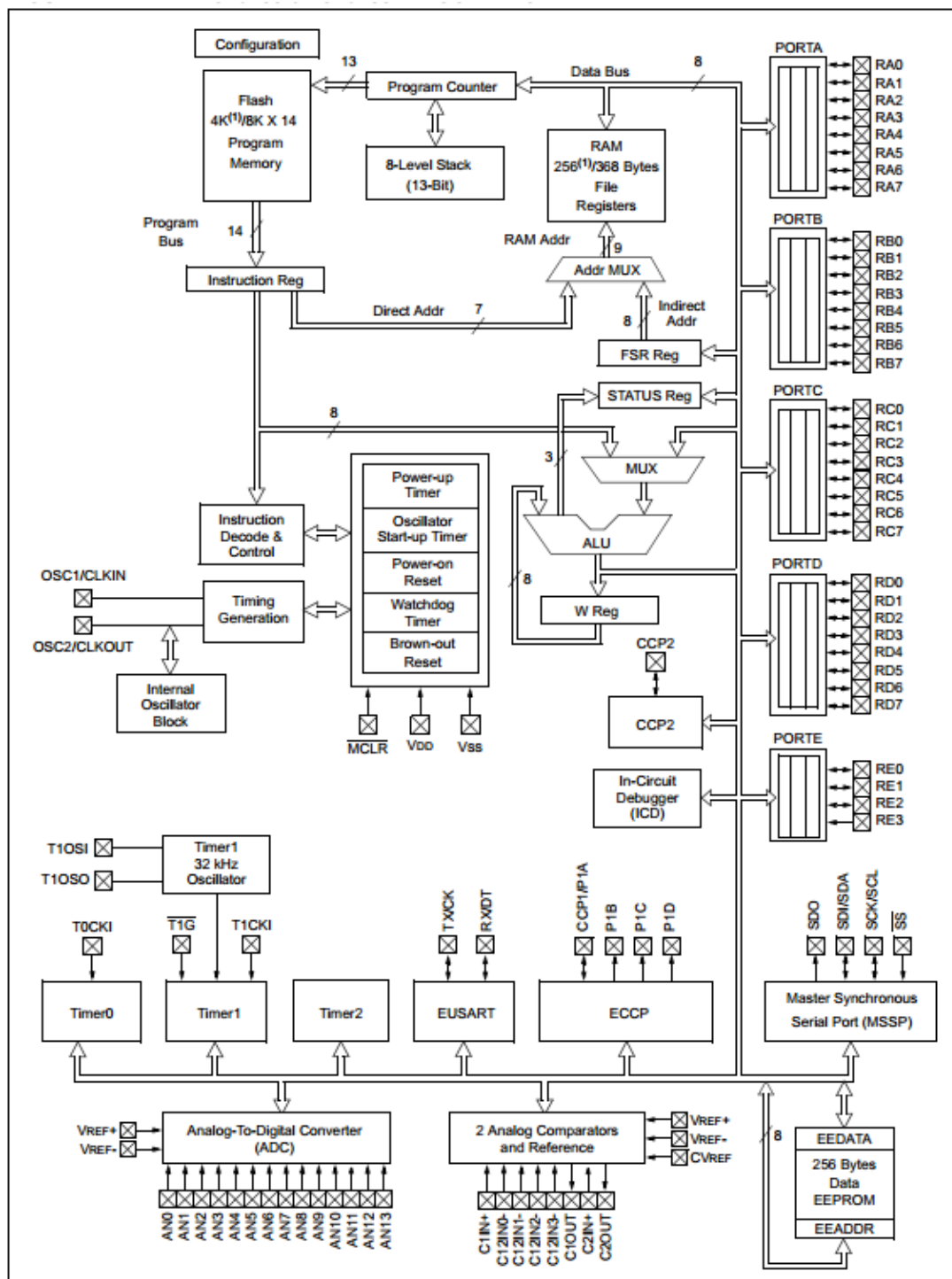


Figure A3. 2 Architecture interne du microcontrôleur PIC16F [16]

La figure A3.2 présente l'architecture interne du PIC16F887, commune à la majorité des microcontrôleurs PIC. C'est est un microcontrôleur 8 bits d'architecture de type RISC (Reduced

Instructions Set Computer), ce qui signifie « calculateur à jeu réduit d'instructions » Les instructions sont en effet au nombre de 35.

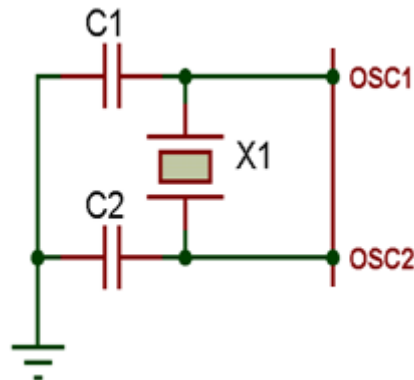


Figure A3.3: Schéma du câblage de l'oscillateur utilisé

- La fréquence de l'horloge interne du PIC est obtenue en divisant par 4 la fréquence de l'horloge externe. Pour un quartz à 11 MHz, la fréquence interne est donc de 2.75 MHz et la durée d'un cycle est de 0.36 μ s.

➤ **Autre calculs :**

$$\vec{P} = -m \cdot \vec{g}$$

m : masse du panneau PV en Kg

$\vec{P}$: poids du panneau en N

$\vec{g}$: l'accélération ou l'intensité de la pesanteur N/kg

Pour que le moteur -l'effort de rotation appliqué sur l'axe- soit capable de tourner le panneau il faut choisir un couple moteur (N.m) convenable au poids P résultant.