

N° d'ordre : .....



جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila  
كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie  
قسم الإلكترونيك  
Département d'Electronique



# MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : DAHMANE Nasser Eddine

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : TECHNOLOGIE DES SYSTEMES ELECTRO-ENERGETIQUES  
DE SOURCES D'ENERGIES RENOUVELABLES

## SUJET

Etude et Réalisation d'un Suiveur de Soleil pour un  
Panneau Solaire Photovoltaïque

Soutenue le : 08 Juin 2015 devant le jury composé de :

Mme. FODIL Malika

Mr. MEZAACHE Hatem

Mr. BRIK Youcef

Mr. KETFI Mohamed El Amine

Mr. CHOUDER Aissa

M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

M.C.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Président

Encadreur

Co-Encadreur

Examineur

Invité

Promotion : Juin 2015

# *Remerciements*

*Je tiens à remercier le dieu de m'avoir donné la patience de terminer ce travail.*

*Mes remerciements les plus particuliers vont à mes promoteurs monsieur **MEZAÂCHE Hatem** et monsieur **BRIK Youcef** pour leurs rôles dans l'élaboration de ce travail.*

*J'exprime ma reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir acceptés de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme finale de cet travail.*

*Je tiens à témoigner toutes mes gratitudes à Monsieur **CHOUDER Aissa**, et Monsieur **HARRAG Abdelghani**, pour leurs conseils.*

***Nasser Eddine***

# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire :*

***À la mémoire de mon père Ahmed,** qui nous a quitté voilà onze ans, il espérait toujours de me regarder succéder dans ma vie, et je souhaite que nous se réunions au Paradis.*

***À ma très chère mère,** qui m'a encouragé à aller de l'avant, en lui exprimant mon amour, mon respect et vive gratitude pour sa patience, son amour et ces prières qui sont toujours m'encourageant à la réussite tous les long de mes études que le dieu la protège.*

***À mes frères, à mes sœurs,** je leur souhaite la belle vie avec mes sincères gratitudes, je les remercie pour leurs sacrifices.*

***À mon amour et ma vie DALILA.***

*Une spéciale dédicace à monsieur **CHOUDER Aissa**, ce travail est de votre.*

*Tous mes chers amis, tous mes camarades de la promotion S3ER 2015 et tous mes collègues à l'institut algérien du pétrole.*

*À toute ma grande famille.*

**Nasser Eddine**

## Résumé :

L'énergie solaire devient actuellement une énergie alternative de l'énergie pétrolière devant les changements économiques, climatiques et la demande progressive de l'énergie dans la vie sociale. Au cours de la journée, le soleil se déplace continuellement, Si le panneau solaire photovoltaïque est fixé dans une position fixe qui ne change pas dans ce cas l'énergie ne peut être maximale seulement à midi. Pour obtenir un rendement maximal d'énergie, le panneau solaire photovoltaïque doit se situer exactement en face de la position du soleil pendant toute la journée.

Alors, il est nécessaire de le fixer sur un support vertical actionné par un système d'asservissement qui lui permet d'obtenir la position requise. Le matin, le système démarre en détectant la position du soleil et suit sa position durant la journée. Le soir, l'heure fixée suivant le mois, permet le retour automatique en position initiale. Après le retour, l'alimentation du dispositif de commande est coupée.

**Mots clés :** Energies renouvelable, traqueur solaire, suiveur solaire, panneaux photovoltaïques asservi, capteurs, microcontrôleur, commande, asservissement des moteurs.

## Abstract :

The solar energy becomes currently an alternative energy of the oil energy the economic, climatic changes and the progressive demand of the energy in the social life. During the day, the sun moves continually, If the photovoltaic solar panel is fixed in a stationary position that doesn't change in this case the energy cannot be only at noon maximal. To get a maximal output of energy, the photovoltaic solar panel must be located precisely in front of the position of the sun during all day.

Then, it is necessary to fix it on a vertical support manipulated by a system of servitude that allows him to get the requisite position. The morning, the system starts while detecting the position of the sun and follows his position during the day. In the evening, the hour fixed according to the month, permits the automatic return in initial position. After the return, the food of the order device is cut.

**Key words :** Energies renewable, solar tracker, solar follower, enslaved photovoltaic panels, sensors, microcontrôleur, command, servitude of the motors.

## المـلـخـص:

الطاقة الشمسية أصبحت مؤخراً طاقة بديلة للطاقت الأحفورية في مواجهة التغيرات الاقتصادية، المناخية والطلب المتزايد على الطاقة. تغير الشمس خلال اليوم موضعها على مسارها، إذا كان اللوح الشمسي مثبت في وضعية لا تتغير أبداً، في هذه الحالة الطاقة العظمى تكون فقط خلال فترة الظهيرة، ومن أجل الحصول على مردود أعظمي للطاقة يجب أن يكون الشعاع الشمسي المباشر عمودي على اللوح الشمسي خلال كامل اليوم.

إن، يجب تثبيته على حامل عمودي موجه بنظام لتتبع الشمس من أجل الحصول على الوضعية المناسبة، في الصباح يقوم النظام بتحديد وضعية الشمس ويقوم كذلك بتتبع مسارها خلال كامل اليوم. في المساء، الساعة مضبوطة حسب الشهر، تسمح بالرجوع إلى الوضعية الابتدائية، بعد الرجوع يتم تغذية كامل النظام.

**الكلمات المفتاحية:** طاقت جديدة، متتبع شمسي، متعقب شمسي، لوح شمسي موجه، لاقط، متحكم مجهري.

# SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre1. Présentation des systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction.....	6
1.2. Généralités .....	6
1.3. Systèmes photovoltaïques.....	8
1.3.1. Systèmes photovoltaïques avec stockage électrochimique (couplage indirect) .....	9
1.3.1.1. Systèmes PV autonomes .....	9
1.3.1.2. Systèmes PV hybrides .....	10
1.3.2. Systèmes photovoltaïques au fil du soleil (couplage direct) .....	10
1.3.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau .....	11
1.3.3.1. Systèmes PV connecté au réseau (centrale) .....	11
1.3.3.2. Systèmes PV inter changent l'énergie avec le réseau .....	12
1.4. Composants de base d'un système photovoltaïque .....	12
1.4.1. Générateur photovoltaïque .....	12
1.4.2. Régulateur de charge et de contrôle .....	13
1.4.3. Batteries .....	13
1.4.4. Onduleur.....	13
1.5. Conclusion .....	14

## Chapitre2. Notions d'astronomies et des systèmes de poursuite du soleil

2.1. Introduction .....	17
2.2. La sphère céleste .....	17
2.3. Le soleil .....	18
2.4. La terre .....	18
2.4.1. La distance terre-soleil .....	18
2.4.2. Mouvement de la terre .....	19
2.4.3. Mouvement de la terre autour du soleil .....	20
2.4.4. Mouvement apparent du soleil .....	20
2.5. Systèmes de coordonnées .....	22
2.5.1. Les coordonnées géographiques .....	22
2.5.1.1. Les parallèles.....	22
2.5.1.2. Les méridiens .....	22
2.5.1.3. La latitude $\varphi$ .....	22
2.5.1.4. La longitude $\lambda$ .....	22
2.5.1.5. L'altitude.....	22

2.5.2. Coordonnées du soleil .....	23
2.5.3. Coordonnées équatoriales .....	23
2.5.3.1. Déclinaison $\delta$ .....	23
2.5.3.2. Angle horaire $\omega$ .....	25
2.5.4. Coordonnées horizontales ou azimutales .....	26
2.5.4.1. Hauteur angulaire du soleil $h$ .....	26
2.5.4.2. Azimut du soleil $\psi$ .....	27
2.5.4.3. Angle zénithale $\theta_z$ .....	27
2.5.5. Caractérisation de l'orientation d'une surface .....	28
2.5.6. Récapitulatif des angles utilisés .....	29
2.6. Durée du jour .....	29
2.7. Système de poursuite .....	30
2.7.1. Orientation d'une surface .....	30
2.7.2. Position du soleil par rapport à un observateur .....	30
2.7.3. Angle d'incidence $\vartheta$ .....	31
2.7.4. Azimut du soleil $\psi$ .....	32
2.7.5. Hauteur angulaire du soleil $h$ .....	33
2.7.6. Inclinaison $\theta$ .....	33
2.8. Techniques de commande .....	33
2.8.1. Technique de l'asservissement .....	33
2.8.2. Technique de pré-programmation .....	34
2.9. Conclusion .....	34

## Chapitre3. Traitement de données et l'algorithme de poursuite

3.1. Introduction.....	37
3.2. La technique proposée dans notre travail .....	37
3.2.1. Principe de la technique utilisée .....	38
3.2.1.1. Etage de données et mesures.....	38
3.2.1.2. Etage de traitement et pilotage.....	38
3.2.1.3. Etage de puissance .....	39
3.3. Site étudié.....	39
3.4. Présentation de JRC.....	39
3.5. Analyse et traitement de données .....	40
3.5.1. Mois de décembre .....	41
3.5.2. Mois de mars .....	43
3.5.3. Mois de juin .....	45

3.5.4. Mois de septembre .....	47
3.6. Algorithme de poursuite proposé .....	50
3.7. Conclusion .....	52
<b>Chapitre 4. Réalisation hardware</b>	
4.1. Introduction .....	55
4.2. Conception du système de poursuite .....	55
4.2.1. Partie de mesure .....	55
4.2.1.1. LDR .....	55
4.2.1.2. Anémomètre .....	56
4.2.1.3. Cellule PV calibrée .....	56
4.2.2. Interface PC .....	57
4.2.3. Partie de commande .....	58
4.2.4. Liste des composants de la carte de commande .....	59
4.2.5. Partie de puissance .....	60
4.2.6. Liste des composants de la carte de puissance .....	61
4.3. Système d'acquisition de données .....	61
4.3.1. Liste des composants de la carte d'acquisition .....	62
4.4. Conclusion .....	63
Conclusion générale .....	64
Références bibliographiques	

# NOMENCLATURE

<b>CDER</b>	Centre de Développement des Energies Renouvelables
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>GPV</b>	Générateur Photovoltaïque
<b>PAC</b>	Pile à Combustible
<b>PPM</b>	Point de Puissance Maximale
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
$D_{Ts}$	La distance Terre-Soleil
$\varphi$	Latitude (degré)
$\lambda$	Longitude (degré)
$\delta$	Déclinaison du soleil (degré)
$\omega$	Angle horaire (degré)
<b>TSV</b>	Temps Solaire Vrai (heure)
<b>ET</b>	Equation du Temps (heure)
<b>GMT</b>	Temps universel du méridien de Greenwich
$h$	Hauteur du soleil (degré)
$\Psi$	Azimut du soleil (degré)
$\theta_z$	Angle zénithal (degré)
$\beta$	Inclinaison du module (degré)
$\alpha$	Orientation du module (degré)
$\omega_{sr}$	Angle de lever du soleil (degré)
$\omega_{ss}$	Angle de coucher du soleil (degré)
$H_L$	Heure de lever du soleil
$H_C$	Heure de coucher du soleil
$T_j$	Durée du jour
$\theta$	Angle d'incidence (degré)
<b>LDR</b>	Light-Dependent Resistor
<b>JRC</b>	Joint Research Center
<b>RTC</b>	Real Time Clock (Horloge temps réelle)
<b>PVGIS</b>	Système d'information géographique photovoltaïque
<b>H_D</b>	Heure de Démarrage
<b>H_F</b>	Heure de Fin
<b>E</b>	Eclairement ( $\text{w/m}^2$ )
$I_{cc}$	Courant de court-circuit (A)



# Liste des figures

**Figure I-1** : Cellule photovoltaïque

**Figure I-2** : Module photovoltaïque

**Figure I-3** : Panneau Solaire

**Figure I-4** : Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général

**Figure I-5** : Schéma synoptique d'un système PV autonome

**Figure I-6** : Schéma synoptique d'un système PV hybride

**Figure I-7** : Schéma synoptique d'un système PV au fil du soleil

**Figure II-1** : La sphère céleste

**Figure II-2** : Variation de la distance terre-soleil au cours de l'année

**Figure II-3** : Représentation du mouvement de la terre autour du soleil

**Figure II-4** : Mouvement apparent du soleil

**Figure II-5** : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné

**Figure II-6** : Variation annuelle de la déclinaison solaire

**Figure II-7** : Les coordonnées équatoriales

**Figure II-8** : Les coordonnées horizontales

**Figure II-9** : Définition des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$

**Figure II-10** : Les rayons Solaires sur un plan incliné

**Figure II-11** : Poursuite du soleil suivant deux axes

**Figure II-12** : Principe de la technique d'asservissement

**Figure III-1** : Schéma synoptique général de la technique de commande proposée

**Figure III-2** : L'interface graphique de PVGIS

**Figure III-3** : Variation de  $H$  ( $33^\circ$ ),  $H$  ( $63^\circ$ ) et  $HS$  au cours de la journée

**Figure III-4** : Variation de l'inclinaison, la hauteur et l'azimut du soleil le 10 décembre

**Figure III-5** : Variation de  $H$  ( $33^\circ$ ),  $H$  ( $39^\circ$ ) et  $HS$  au cours de la journée

**Figure III-6** : Variation de l'inclinaison, la hauteur et l'azimut du soleil le 16 mars

**Figure III-7** : Variation de  $H$  ( $33^\circ$ ),  $H$  ( $03^\circ$ ) et  $HS$  au cours de la journée

**Figure III-8** : Variation de l'inclinaison, la hauteur et l'azimut du soleil le 11 juin

**Figure III-9** : Variation de  $H$  ( $33^\circ$ ), et  $HS$  au cours de la journée

**Figure III-10** : Variation de l'inclinaison, la hauteur et l'azimut du soleil le 15 septembre

**Figure IV-1** : Schéma synoptique générale du système de poursuite

**Figure IV-2** : Schéma de la carte LDR réalisée

**Figure IV-3** : Anémomètre

**Figure IV-4** : Brochage du circuit MAX232

**Figure IV-5** : Schéma de la carte de commande réalisée

**Figure IV-6** : Circuit imprimé de la carte de commande

**Figure IV-7** : Schéma de la carte de puissance réalisée

**Figure IV-8** : Circuit imprimé de la carte de puissance

**Figure IV-9** : Schéma du système d'acquisition de données

**Figure IV-10** : Circuit imprimé de la carte d'acquisition de données

# Liste des tableaux

**Tableau II-1** : Les angles utilisés

**Tableau III-1** : Les angles d'inclinaisons mensuels

**Tableau III-2** : Irradiation journalière de mois de décembre

**Tableau III-3** : Irradiation journalière de mois de mars

**Tableau III-4** : Irradiation journalière de mois de juin

**Tableau III-5** : Irradiation journalière de mois de septembre

## **Introduction Générale**

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique, le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'importation de sources d'énergies fossile (pétrole, gaz, charbon, ...etc.) ou en énergie d'origine thermonucléaire (Uranium, Plutonium,...), motivée par des considérations économiques. D'autres facteurs comme l'épuisement inévitable de ces sources, leur impact négatif sur l'environnement (les émissions de  $CO_2$ , la catastrophe nucléaire de Tchernobyl, ...etc.), et l'indépendance énergétique nationale n'ont pas été prise en compte.

Comme alternative à ces préoccupations, ont beaucoup stimulé la recherche et le développement de nouvelles sources dites renouvelables, sont potentiellement inépuisables, la nature peut les reconstituer assez rapidement telles que l'énergie hydraulique, éolienne, géothermique, biomasse ou notamment la plus ancienne le soleil.

Actuellement, il existe deux voies d'utilisation de l'énergie solaire qui transforment le rayonnement en chaleur ou en électricité, respectivement le solaire thermique et le solaire photovoltaïque. Cette dernière basée sur l'effet photoélectrique, la conversion du rayonnement solaire en électricité par le biais des cellules photovoltaïques. Plusieurs cellules sont reliées entre elles pour former un module photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former un générateur photovoltaïque qui produise de l'électricité lors qu'il est exposé à la lumière [1].

La puissance électrique produite par un système photovoltaïque dépend de l'intensité du flux lumineux reçu sur la surface du module photovoltaïque selon la position du soleil qui varie le long de la journée. Dans la majorité des cas, le générateur photovoltaïque est fixé par rapport au sol et orienté vers le sud (implantation en hémisphère nord), l'énergie solaire incidente sur les modules n'est donc pas optimale en fonction de la variation du temps dans la journée et par rapport aux changements des saisons, son rendement énergétique n'est pas constant au cours de la journée, le mauvais positionnement du panneau, diminue le rendement de production électrique [2].

Afin de collecter le maximum d'énergie, l'optimisation par poursuite de la trajectoire du soleil est une technique qui permet de mieux exploiter les cellules photovoltaïques et avoir

un gain de 30% à 40% supérieure à celle qui est fixe (orientée plein sud et inclinée d'un angle égal à la latitude du lieu) [2].

On utilise des dispositifs dits systèmes de poursuite solaires, ce dernier doit être ajusté de sorte qu'il soit toujours visé avec précision face au soleil, afin de maximiser l'ensoleillement en gardant la surface active du module photovoltaïque perpendiculaire aux radiations solaires [3].

On peut distinguer deux types de systèmes de poursuite solaire, les systèmes à un seul axe (Est-Ouest ou bien Nord-Sud) et les systèmes à deux axes (Est-Ouest et Nord-Sud), le premier type sont moins coûteux et leur commande est facile à mettre en œuvre, par contre leur efficacité est inférieure à celle du deuxième type [4].

Les techniques de commande sont diverses, mais peuvent être subdivisées en deux catégories, les unes basées sur l'asservissement, des capteurs détectent en permanence la position du soleil, les autres sur la pré-programmation de la trajectoire du soleil, ce type basé sur le fait que le soleil suit une trajectoire relativement périodique pour un observateur situé à un endroit donné sur la terre [3].

Dans la première technique, la poursuite s'effectue indépendamment de la zone dans laquelle le système sera situé, la poursuite est plus précise, mais il y a des pertes d'énergie dues à la consommation du système de commande qui est actif en permanence, dans cette catégorie, on peut citer un certain nombre de travaux :

- A. Vial, 'Lignes de Déclinaison d'un Cadran Solaire Plan d'Orientation Quelconque', Université de Technologie de Troyes, Pôle Physique, Matériaux et Nanotechnologies, N°981 - 998, Octobre 2007.
- M. Haddadi, 'Elaboration d'une Commande pour Héliostat', Revue des Energies Renouvelables, Numéro Spécial, pp. 153 – 157, 2003.
- S. Chin, J. Gadson and K. Nordstrom, 'Nerd Girls, Maximum Power Point Tracker', Nerd Girls Solar/MPPT Group May 12, 2003.
- Mostefa Ghassoul, « Design of an Automatic Solar Tracking System to Maximize Energy Extraction », International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 3, Issue 5, May 2013.

Dans la deuxième technique, la poursuite du soleil peut dès lors s'effectuer par des méthodes de pré-programmation de la trajectoire du soleil qui est gouvernée par des équations appelées « équations du temps » [5], parmi les travaux utilisant cette technique :

- Document, 'Export Bureau International' Manufacture Export Directory, Solar-Azimuth Trackers.
- Report, 'Array Technologies', Inc. Wattsun Solar Trackers.
- S. Abdallah et S. Nijmeh, 2002 [4], ont utilisé une méthode de pré-programmation avec un système de boucle ouverte. Ils ont atteint à un rendement de 41.43 % par rapport au système fixe.
- S. Abdallah, A. El-Qadan et V. Hamudeh, 2004 [5], ont utilisé une méthode de programmation à base d'un PIC 16F877. Ils ont constaté que la puissance délivrée par le système à deux axes augmente jusqu'à 37.24 % par rapport au système fixe.

Le travail que nous aurons présenté aujourd'hui est une amélioration et optimisation des travaux réalisés en 3<sup>ème</sup> année licence S2E, « Etude et réalisation d'un suiveur de soleil à base d'un capteur LDR ». Et son objectif est de réaliser et élaborer une commande d'un système de poursuite à deux axes en prenant en considération la durée astronomique de chaque jour de l'année, l'intensité lumineuse du rayonnement solaire et l'état du ciel.

Dans ce mémoire nous présentons les chapitres suivants :

- Dans le premier chapitre, nous présentons les systèmes photovoltaïques.
- L'objectif du deuxième chapitre est de donner des notions astronomiques et des systèmes de poursuite du soleil.
- Par la suite, le chapitre trois est consacré pour le traitement de données et l'algorithme de poursuite.
- Le quatrième chapitre est le fruit de notre travail où on va présenter la partie Hardware de la commande du système de poursuite.

Et à la fin, nous terminerons par une conclusion générale et perspective.

# Chapitre

# 01

## **PRÉSENTATION DES SYSTEMES PHOTVOLTAÏQUES**

## Chapitre 1. Présentation des Systèmes Photovoltaïques

<b>1.1. Introduction .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2. Généralités .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3. Systèmes photovoltaïques .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3.1. Systèmes photovoltaïques avec stockage électrochimique (couplage indirect) .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3.1.1. Systèmes PV autonomes.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3.1.2. Systèmes PV hybrides .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3.2. Systèmes photovoltaïques au fil du soleil (couplage direct).....</b>	<b>10</b>
<b>1.3.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3.3.1. Systèmes PV connecté au réseau (centrale).....</b>	<b>11</b>
<b>1.3.3.2. Systèmes PV inter changent l'énergie avec le réseau .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4. Composants de base d'un système photovoltaïque .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4.1. Générateur photovoltaïque.....</b>	<b>12</b>
<b>1.4.2. Régulateur solaire de charge et de contrôle .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4.3. Batteries.....</b>	<b>13</b>
<b>1.4.4. Onduleur .....</b>	<b>13</b>
<b>1.5. Conclusion.....</b>	<b>14</b>



## 1.1. Introduction

L'être humain a pu exploiter de nombreuses richesses terrestres tels que le pétrole, le gaz, le fer, l'or, mais n'a pu jusqu'à aujourd'hui exploiter l'énergie de la plus grande étoile de l'univers qui est le soleil. Cet énorme gisement émet une énergie de 175 milliards de kW/h. Depuis les siècles derniers des recherches ont été entamées pour transformer les rayons solaires en énergie électrique de type continu directement utilisable. Cette opération est appelée la conversion photovoltaïque, elle a été découverte en 1839 par le physicien français Antoine Henri Becquerel [13].

## 1.2. Généralités

Le processus de conversion photovoltaïque est assuré par une cellule photovoltaïque ou cellule solaire ou photopile qui est l'élément de base de la conversion photovoltaïque. La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell.

Malgré l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace en 1958. Ce n'est qu'à partir des années 1970 qu'ont eu lieu les premières utilisations terrestres.

Les cellules photovoltaïques connectées ensembles et encapsulées sous du verre forment un module solaire qui peut fournir une quantité d'électricité suffisante pour certains appareils de faible consommation (lampe, radio, télévision).



**Figure I-1** : Cellule photovoltaïque



**Figure I-2 :** Module photovoltaïque

Plusieurs modules solaires peuvent être groupés pour former un panneau solaire. Plus le panneau est grand, plus la quantité d'électricité qu'il produit est grande. Ces panneaux eux-mêmes sont associés pour former le champ photovoltaïque. Le terme générateur photovoltaïque est réservé à l'ensemble producteur d'énergie qui comprend donc le champ photovoltaïque, le stockage d'énergie, l'électronique de gestion (ou contrôle) et l'élément de conversion en alternatif [14].



**Figure I-3 :** Panneau Solaire

Tous les modules sont testés en usine sous simulateur de rayonnement, permettant de leur attribuer une norme de qualité. Cette température effective de fonctionnement teste la sensibilité du module pour des élévations dangereuses de température pouvant induire des occultations accidentelles à l'encapsulation.

L'usine de la SARL 'Algerian PV Company', basée à Tlemcen, c'est la première entreprise de production commerciale des panneaux solaires photovoltaïques en Algérie et la deuxième en Afrique dont le premier module sorti en juillet 2011 a été testé et caractérisé au niveau du CDER [15].

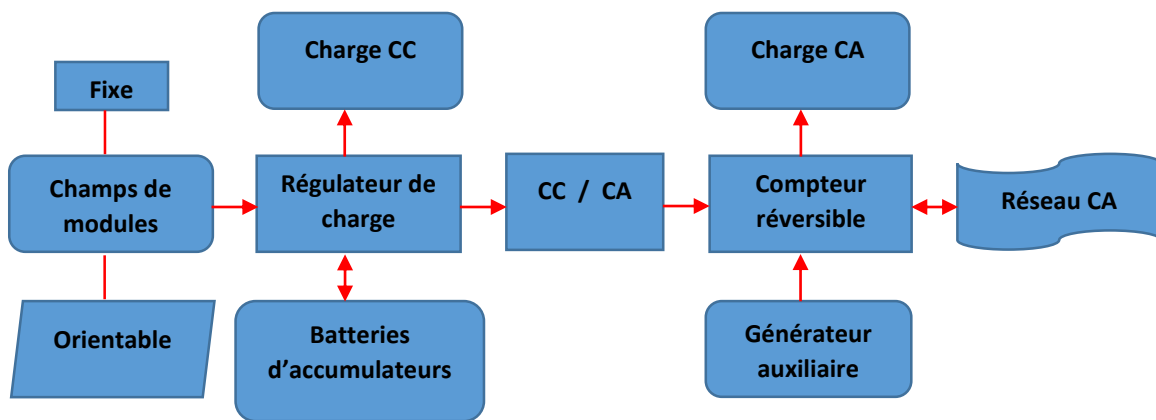
### 1.3. Systèmes photovoltaïques

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système PV, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait l'associer étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique.

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur précédemment décrit, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants :

- Un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),
- Une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- Un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- Un convertisseur DC/AC
- Une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

La Figure (I-4) représente symboliquement les divers éléments du système le plus général. Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales.



**Figure I-4** : Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général

Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont de trois types :

1. Les systèmes PV avec stockage électrique (batterie d'accumulateurs électrochimiques). Ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :
  - Soit directement en courant continu.
  - Soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - alternatif (onduleur).

2. Les systèmes à couplage direct sans batterie (fonctionnement dit aussi « au fil du soleil »). Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu (adaptateur d'impédance).

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique.

**Exemples :** Pompage : stockage par réservoir d'eau, Réfrigération : stockage de froid (stockage de glace ou eutectique), Electrolyse de l'eau : stockage d'hydrogène.

3. Les systèmes connectés au réseau local par l'intermédiaire d'un onduleur piloté à la fréquence du réseau, le réseau servant de stockage.

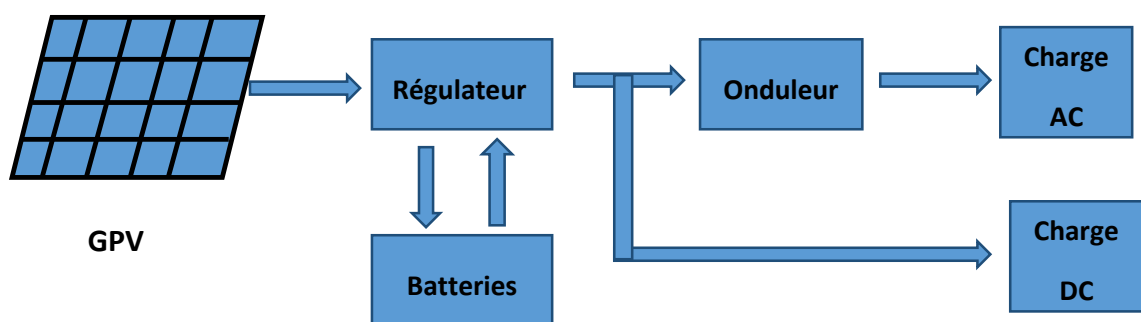
L'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge. On recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

### 1.3.1. Systèmes photovoltaïques avec stockage électrochimique (couplage indirect)

Deux configurations sont possibles :

#### 1.3.1.1. Systèmes PV autonomes

C'est la configuration la plus courante des systèmes PV, il se caractérise par leur capacité à couvrir la totalité de la demande énergétique. Dans la plupart des applications des systèmes autonomes la consommation se produit à des horaires distincts du soleil, ce qui nécessite un système de stockage adéquat. Ce même système doit assurer la fourniture énergétique durant les périodes climatiques les plus défavorables et dans la nuit.



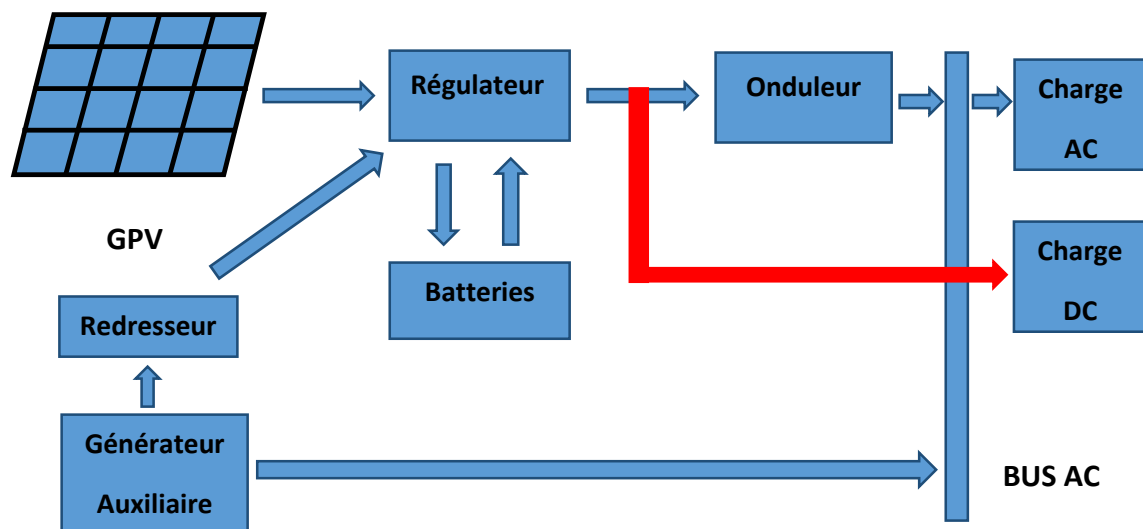
**Figure I-5 :** Schéma synoptique d'un système PV autonome

### 1.3.1.2. Systèmes PV hybrides

Appelé aussi système PV autonome avec source auxiliaire, il se caractérise par l'adjonction d'une autre source auxiliaire de puissance qui peut être un générateur diesel ou essence ou un générateur à éolien ou encore PAC.

Normalement ces systèmes incluent des batteries de faible capacité que celle du système PV autonome. Sa fiabilité due à la disponibilité de plusieurs sources d'énergies peut être plus grandes, l'inconvénient majeure est la complexité de système de régulation et contrôle.

La figure (I-6) représente un schéma synoptique des différents composants d'un système PV hybride.



**Figure I-6 :** Schéma synoptique d'un système PV hybride

### 1.3.2. Systèmes photovoltaïques au fil du soleil (couplage direct)

Ce sont les systèmes les plus simples, puisque l'énergie PV est utilisée directement à partir des modules PV, c'est-à-dire la charge est alimentée directement par le champ de panneaux "au fil du soleil". Les appareils utilisés ne fonctionnent pas qu'en l'absence de la lumière.

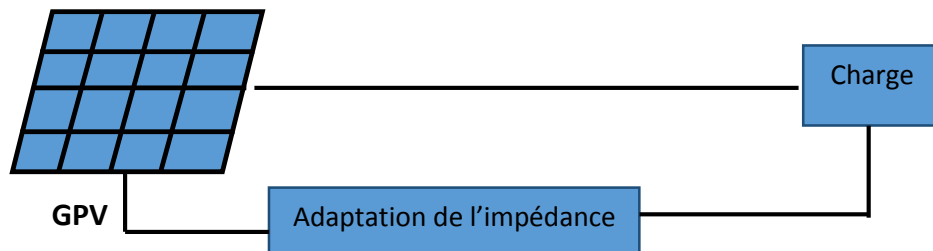
Exemple : le pompage PV au fil du soleil.

Il existe plusieurs cas importants pour lesquels le stockage sous forme d'énergie électrique n'est pas nécessaire :

- ✓ l'électrolyse de l'eau avec stockage sous forme d'hydrogène.
- ✓ le pompage de l'eau et on stockage dans des réservoirs.
- ✓ les réfrigérateurs et le stockage du froid sous forme de glace.

- ✓ le séchage des végétaux par ventilation, qui ne nécessite pas de stockage.

Comme il n'y a pas de batterie interposée pour fixer la tension de travail, c'est l'impédance de la charge qui fixe le point de fonctionnement. Il faut donc adapter du mieux qu'il est possible le groupement de modules à la charge. Nous allons considérer plus en détail certaines de ces adaptations d'impédance, en particulier celles qui se font de façon naturelle.



**Figure I-7** : Schéma synoptique d'un système PV au fil du soleil

### 1.3.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

N'incluent pas de batteries, la connexion entre le GPV et le réseau est obtenue à travers un onduleur (convertisseur DC/AC), cet onduleur doit être capable d'accepter les variations de tensions et de puissance propres aux modules PV, et travail de façon instantané au PPM, dépendant de la tension du réseau au point de connexion et pour des valeurs plus grandes que (220V – 380V), il est nécessaire d'utiliser des transformateurs avec les protections adéquats.

L'interconnexion au réseau de système PV peut s'effectuer grâce à deux types d'application :

#### 1.3.3.1. Systèmes PV connecté au réseau (centrale)

Ces systèmes injectent toute l'énergie électrique produite dans le réseau via de grands onduleurs. Le courant électrique continu, de tension variable, fourni par les panneaux solaires photovoltaïques est transformé par des onduleurs en courant alternatif de fréquence, tension et phase adaptées aux caractéristiques du réseau. Il est ensuite injecté dans le réseau électrique. La production d'une centrale photovoltaïque est cyclique et varie en fonction de l'intensité solaire et donc de l'heure du jour et de la saison.

Ces centrales comprennent généralement des traqueurs solaires automatiques pour orienter les panneaux solaires photovoltaïques face au soleil.

### **1.3.3.2. Systèmes PV inter changent l'énergie avec le réseau**

Ces systèmes sont destinés essentiellement à des consommateurs qui utilisent le réseau conventionnel à qui on ajoute le système PV, cette association de deux formes d'énergie permet soit de soustraire l'énergie de réseau (hachât), soit d'injecter dans le réseau (vente) via des compteurs bidirectionnels (réversible).

Déficit = utilisation du réseau.

Surplus = injection dans le réseau.

## **1.4. Composants de base d'un système photovoltaïque**

### **1.4.1. Générateur photovoltaïque**

Un générateur photovoltaïque est un groupement des cellules photovoltaïques en série et en parallèle. Donc l'élément de base d'un générateur photovoltaïque est la cellule solaire photovoltaïque.

### **1.4.2. Régulateur solaire de charge et de contrôle**

Un régulateur de charge appelé aussi contrôleur de charge, est un système ou appareil électronique fonctionnant de façon complètement automatique auquel sont raccordés le générateur (modules PV) la batterie ainsi que d'éventuels équipements de l'installation.

Il a principalement sert avant tout à contrôler l'état de la batterie. Il existe plusieurs valeurs limites correspondant chacune à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc. Les nouvelles générations de régulateurs, quant à eux, sont de plus en plus perfectionnées et proposent des fonctionnalités plus nombreuses et de plus en plus évoluées.

Il intègre aussi la fonction MPPT, le contrôle et l'optimisation des paramètres de fonctionnement des composants de l'installation (générateur, batterie, etc.) via des mécanismes de type MPPT («Maximum Power Point Tracking» c'est-à-dire «Poursuite du point de puissance maximal»).

### 1.4.3. Batteries

Une batterie est constituée d'un ensemble de plaques de plomb interconnectées qui baignent dans un bain d'électrolyte (eau distillée + acide sulfurique). L'ensemble est contenu dans un bac plastique rigide [23].

Il existe différentes sortes de batteries, les alliages les plus utilisés sont :

- Plomb-calcium
- Plomb-antimoine (6%)
- Plomb-antimoine (<2%)
- Nickel- cadmium

Les batteries (au plomb) stationnaires à usage solaire se déchargent naturellement lorsqu'elles sont laissées en circuit ouvert c'est-à-dire au repos. Les facteurs qui augmentent l'autodécharge sont :

- La température qui double le taux d'autodécharge des batteries
- Le vieillissement de la batterie
- Le complément avec l'eau non déminéralisée contenant des impuretés
- Le mauvais entretien.

### 1.4.4. Onduleur

Un onduleur est convertisseur DC/AC permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables. Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion AC\*/DC\* est le même. La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système.



### 1.5. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons donné une présentation des différents systèmes photovoltaïques et leurs composants, maintenant nous orientons notre travail dans le but d'améliorer la puissance obtenue par un panneau solaire photovoltaïque et ce, en lui appliquant une orientation suivant le mouvement apparent du soleil.

Cette orientation donne au panneau deux degrés de liberté, le premier autour de l'axe vertical (mouvement en hauteur) et l'autre en horizontal (mouvement en azimuth).

# Chapitre

# 02

## **NOTIONS D'ASTRONOMIE ET DES SYSTEMES DE POURSUITE DU SOLEIL**

## Chapitre 2. Notions d'astronomie et des systèmes de poursuite du soleil

2.1.	Introduction .....	17
2.2.	La sphère céleste .....	17
2.3.	Le soleil .....	18
2.4.	La terre .....	18
2.4.1.	Distance terre-soleil .....	19
2.4.2.	Mouvement de la terre.....	20
2.4.3.	Mouvement de la terre autour du soleil.....	20
2.4.4.	Mouvement apparent du soleil .....	21
2.5.	Systèmes de coordonnées .....	22
2.5.1.	Les coordonnées géographiques .....	22
2.5.1.1.	Les parallèles .....	22
2.5.1.2.	Les méridiens.....	22
2.5.1.3.	La latitude $\varphi$ .....	22
2.5.1.4.	La longitude $\lambda$ .....	23
2.5.1.5.	L'altitude .....	23
2.5.2.	Coordonnées de soleil .....	23
2.5.3.	Coordonnées équatoriales.....	24
2.5.3.1.	Déclinaison $\delta$ .....	24
2.5.3.2.	Angle horaire $\omega$ .....	25
2.5.4.	Coordonnées horizontales ou azimutales.....	27
2.5.4.1.	Hauteur angulaire du soleil $h$ .....	27
2.5.4.2.	Azimut du soleil $\Psi$ .....	27
2.5.4.3.	Angle zénithal $\theta_z$ .....	27
2.5.5.	Caractérisation de l'orientation et l'inclinaison des modules .....	28
2.5.6.	Récapitulatif des angles utilisés .....	29
2.6.	Durée du jour .....	29
2.7.	Système de poursuite .....	30
2.7.1.	Orientation d'une surface.....	30
2.7.2.	Position du soleil par rapport à un observateur .....	30
2.7.3.	Angle d'incidence $\theta$ .....	31
2.7.4.	Azimut du soleil $\Psi$ .....	32
2.7.5.	Hauteur du soleil $h$ .....	33
2.7.6.	Inclinaison $\beta$ .....	33
2.8.	Techniques de commande .....	33
2.8.1.	Technique de l'asservissement.....	33
2.8.2.	Technique de pré-programmation.....	34
2.9.	Conclusion .....	34

## 2.1. Introduction

L'orientation et l'inclinaison des modules PV est un problème important dans une n'importe quel installation photovoltaïque. En effet, le principe est de supposer que le rayonnement solaire parvienne à la surface du panneau dans une direction déterminée. Puisque la position apparente du soleil par rapport à un point donné sur la terre est constamment variable à l'échelle d'une journée, nous serons donc obligés de modifier constamment la position du panneau afin de suivre celle du soleil en utilisant un système de poursuite automatique.

Donc, la connaissance de la trajectoire du soleil et sa position en chaque point du ciel est nécessaire pour une bonne poursuite, et pour la repérer il faut définir les systèmes de coordonnées utilisées. Dans ce chapitre, nous donnons une brève présentation de la géométrie terre-soleil, les systèmes de coordonnées célestes et les techniques d'orientation d'une surface.

## 2.2. La sphère céleste

Au-dessus d'un observateur terrestre, le ciel semble former une voûte qui a la forme d'une demi-sphère limité par l'horizon, la sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. Cette sphère est unique pour tous les habitants de la terre et son centre qui représente tous les lieux d'observation situés à la surface terrestre peut être confondu en toute logique avec le centre de la terre.

L'intersection de cette sphère avec l'axe de rotation de la terre (appelé aussi axe du monde) sont les deux pôles célestes : N le pôle Nord et S le pôle Sud. Le cercle (A) de cette sphère, perpendiculaire à l'axe des pôles est appelé : équateur céleste [7,9] (Figure II-1).

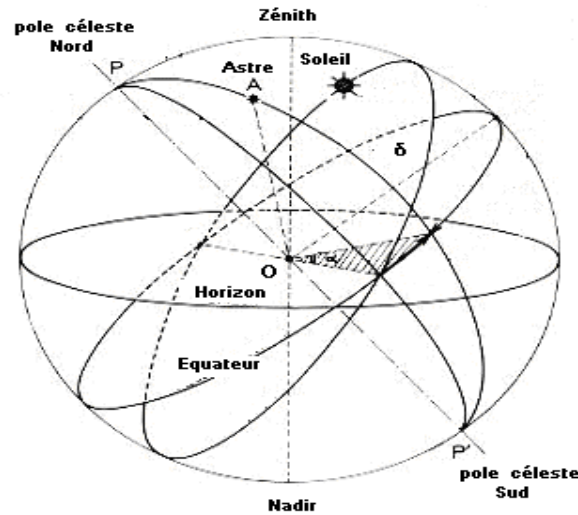


Figure II-1 : La sphère céleste

### 2.3. Le soleil

Le Soleil est une sphère gazeuse de  $1.392 \cdot 10^9 m$  de diamètre et est à distance moyenne de  $149.6 \cdot 10^6 Km$  de la terre ; c'est une étoile résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce type de nuage est essentiellement composé d'hydrogène, d'hélium, et dans une moindre mesure de carbone, d'azote et d'autres éléments. Le noyau du soleil ( $400,000 Km$  de diamètre) à une température de l'ordre de  $15 \cdot 10^6$  à  $16 \cdot 10^6 K$  et agit comme un réacteur thermonucléaire. Les réactions de fusion nucléaire y transforment l'hydrogène en hélium en libérant  $4 \cdot 10^9 Kg/s$  d'énergie de masse selon la célèbre équation d'Einstein  $E = m \cdot c^2$  [6]

### 2.4. La terre

La terre est la troisième des planètes principales du système solaire dans l'ordre croissant des distances au soleil. Elle s'intercale entre Vénus et Mars. Elle tourne sur elle-même, d'un mouvement quasi uniforme, autour d'un axe passant par son centre de gravité (axe des pôles), tout en décrivant autour du soleil une orbite elliptique.

La révolution de la terre autour du soleil détermine la durée de l'année, et sa rotation sur elle-même celle du jour. Elle a la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati. Son diamètre équatorial mesure  $12\,756 Km$  environ et son diamètre polaire  $12\,713 Km$ . Sa superficie est de  $510\,101 \cdot 10^3 Km^2$ , son volume de  $1\,083\,320 \cdot 10^6 Km^3$ , sa masse de  $5.98 \cdot 10^{24} Kg$  et sa densité moyenne est de 5.52 [10].

### 2.4.1. Distance terre-soleil

Le soleil est situé à une distance moyenne de 149 598 000 *Km* de la terre .Cette distance varie peu au cours de l'année ( $\pm 1.65\%$ ), car l'excentricité de l'orbite terrestre est peu accentuée ( $e = 0.017$ ). La relation suivante donne la variation en fonction du numéro de jour. [11.12] :

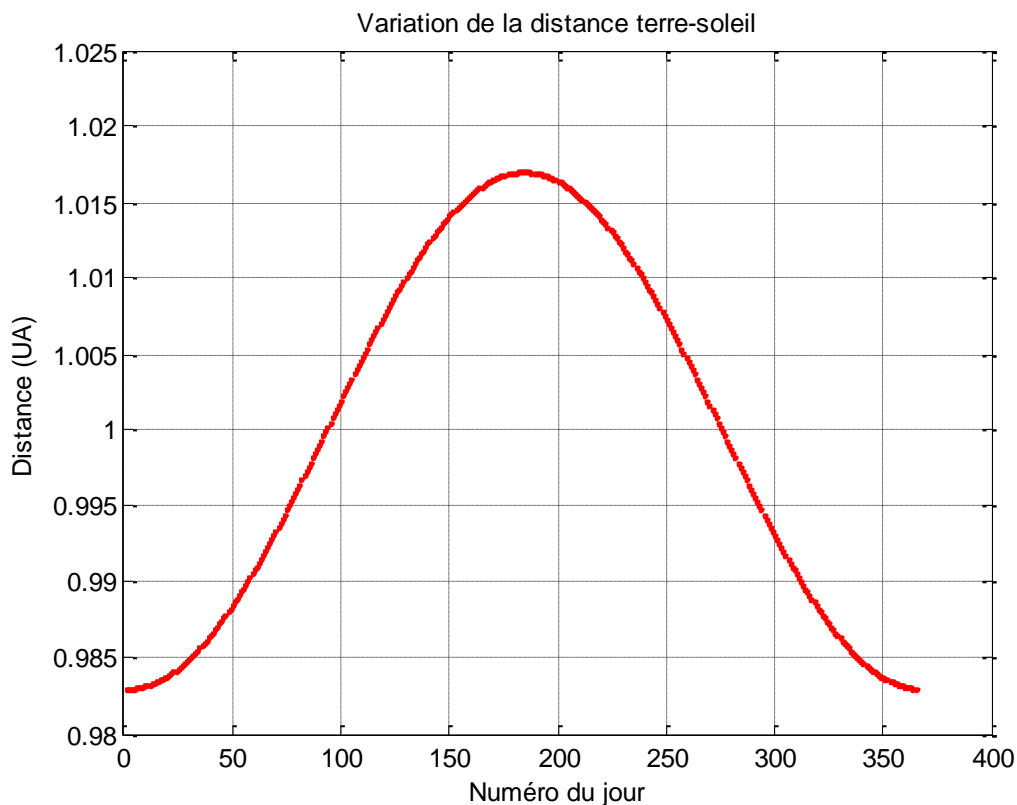
$$D_{Ts}(N) = 1 - 0.017 \cos \left[ \frac{360(N - 2)}{365} \right] \quad II.1$$

$N$  : est le numéro du jour compté à partir du 1<sup>er</sup> janvier.

Année civile :  $N = 365$  jours

Année bissextile :  $N = 366$  jours

La variation de la distance terre-soleil est représenté par la figure II.2



**Figure II-2:** Variation de la distance terre-soleil au cours de l'année

Les valeurs extrêmes de la distance terre-soleil sont données respectivement :

$D_{Ts}(MAX) = 1.017 \text{ UA}$  Vers le 05 Juillet

$D_{Ts}(MIN) = 0.983 \text{ UA}$  Vers le 02 Janvier

### 2.4.2. Mouvement de la terre

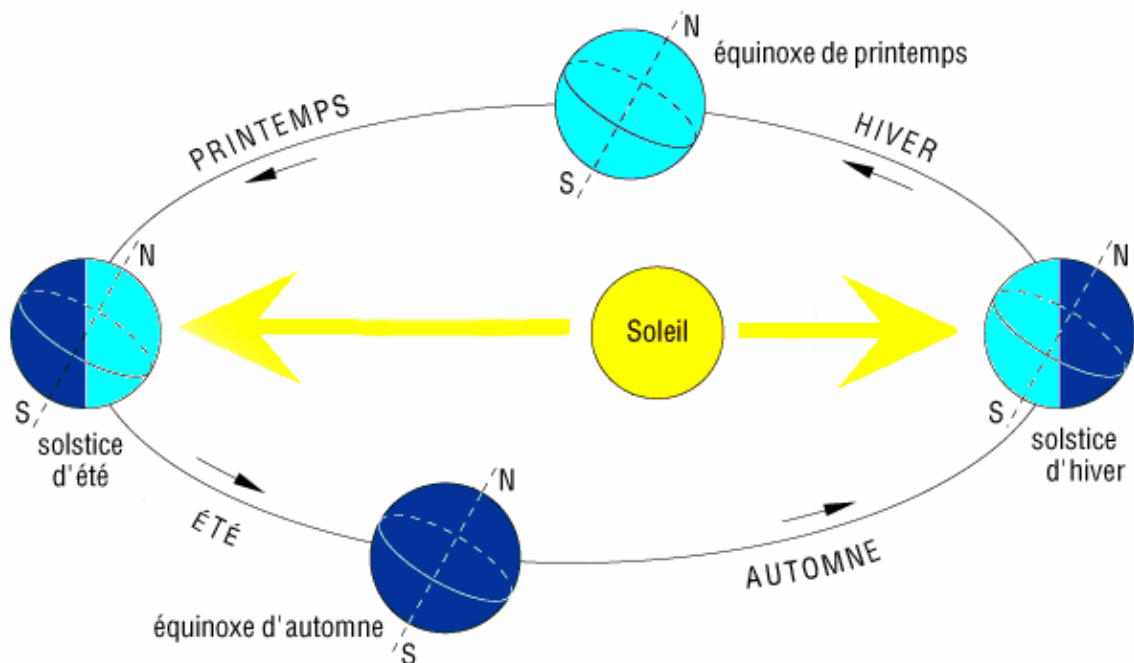
Tout d'abord, il n'est pas inutile d'introduire quelques définitions :

Le terme « rotation » se réfère au mouvement d'un objet autour de son axe propre, tandis que le terme « révolution » se réfère au mouvement d'un centre de masse d'un objet autour d'un autre objet.

La rotation de la Terre autour de son axe par rapport aux étoiles a une période de 86164 secondes, soit 236s moins que le jour solaire moyen. Son inclinaison par rapport au plan de l'écliptique est de  $23,45^\circ$  [8].

### 2.4.3. Mouvement de la terre autour du soleil

La terre parcourt son orbite elliptique autour du soleil en 365 jours, 6 heures, 9 minutes, dont le soleil est l'un des foyers. Du fait de l'excentricité de son orbite, sa vitesse varie entre 29.29 et 30.29 Km/s au cours de l'année. Les 6 heures, 9 minutes et quelques donnent un jour supplémentaire tous les quatre ans. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil, et au solstice d'été (22 juin) qu'elle en est la plus éloignée [7.8].

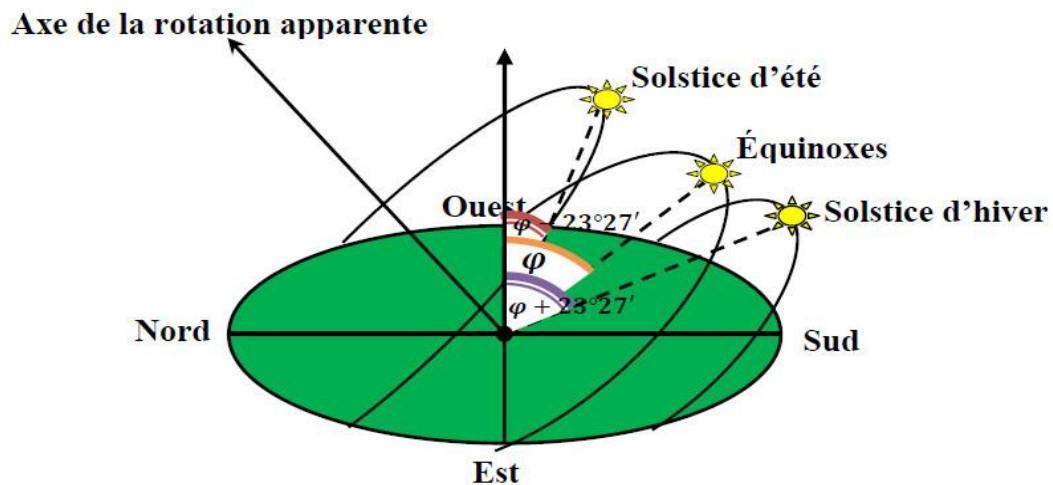


**Figure II-3** : Représentation du mouvement de la terre autour du soleil

#### 2.4.4. Mouvement apparent du soleil

Pour étudier le mouvement du soleil nous examinerons le mouvement apparent du soleil pour un observateur sur terre.

Le mouvement apparent du soleil observé d'un point quelconque de l'équateur est représenté sur la figure (II-4). Aux équinoxes, le soleil se lève à l'est, passe à la verticale à midi (heure solaire) et se couche à l'ouest. Entre le 21 mars et le 23 septembre, le soleil passe au nord de la verticale et pendant la deuxième moitié de l'année il passe au sud de la verticale.



**Figure II-4 :** Mouvement apparent du soleil

En un point de latitude  $\varphi$  au Nord de l'équateur est représenté sur la figure II-4. On notera qu'aux équinoxes, le soleil décrit un arc de cercle de  $180^\circ$  dans la voûte céleste à raison de  $15^\circ$  par heure, ce qui donne des journées de 12 heures. Au midi solaire, l'angle que fait la direction du soleil avec l'axe vertical est égal à latitude du lieu  $\varphi$ .

Entre le 23 septembre et le 21 mars, ou plus particulièrement au solstice d'hiver, le 21 décembre, le soleil décrit dans la voûte céleste un arc de cercle inférieur à  $180^\circ$ . L'intersection du plan de rotation apparent du soleil avec le plan horizontal de l'observateur est une ligne parallèle à la direction Est-Ouest mais se trouvant vers le sud. Le soleil décrivant toujours un arc de  $15^\circ$  par heure. Au solstice d'été et plus généralement entre le 21 mars et le 23 septembre, le soleil décrit un arc de cercle supérieur à  $180^\circ$ .

L'angle que fait la direction du soleil avec le vertical du lieu est appelé « Distance Zénithale (ou angle zénithal) » noté  $\theta_z$ . Elle varie quotidiennement et annuellement entre [12] :



$$\varphi - 23^{\circ}27' \leq \theta_z \leq \varphi + 23^{\circ}27'$$

- Aux équinoxes (EA et EP)  $\rightarrow \theta_z = \varphi$ , Les journées ont une durée de 12h.
- Au solstice hiver (SH)  $\rightarrow \theta_z = \varphi + 23^{\circ}27'$ , Les journées ont une durée inférieure à 12h.
- Au solstice été (SE)  $\rightarrow \theta_z = \varphi - 23^{\circ}27'$ , Les journées ont une durée supérieure à 12h.

En un point de l'équateur ( $\varphi=0^{\circ}$ ),  $\varphi - 23^{\circ}27' \leq \theta_z \leq \varphi + 23^{\circ}27'$ , La durée des jours est de 12h = constante.

En un point de l'attitude  $\varphi$ , le mouvement du soleil sera identique si on inverse les positions du sud et du nord.

## 2.5. Systèmes de coordonnées

### 2.5.1. Les coordonnées géographiques

Les coordonnées géographiques utilisées pour déterminer la localisation d'un point sur la surface terrestre sont : la latitude, la longitude et l'altitude, qui sont calculées en angle et qui s'expriment en degrés, minutes et secondes d'angle.

#### 2.5.1.1. Les parallèles

Ce sont des cercles concentriques qui découpent notre planète de l'équateur jusqu'aux pôles.

#### 2.5.1.2. Les méridiens

Ce sont des cercles perpendiculaires à l'équateur, passant par les deux pôles déterminant une série de fuseaux.

#### 2.5.1.3. La latitude $\varphi$

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie de  $0^{\circ}$  à l'équateur à  $90^{\circ}$  Nord ou Sud aux pôles. Elle représente la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur [12].

$$-90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ \text{ Tel que : } \begin{cases} \varphi > 0 \text{ vers le Nord} \\ \varphi < 0 \text{ vers le Sud} \end{cases}$$

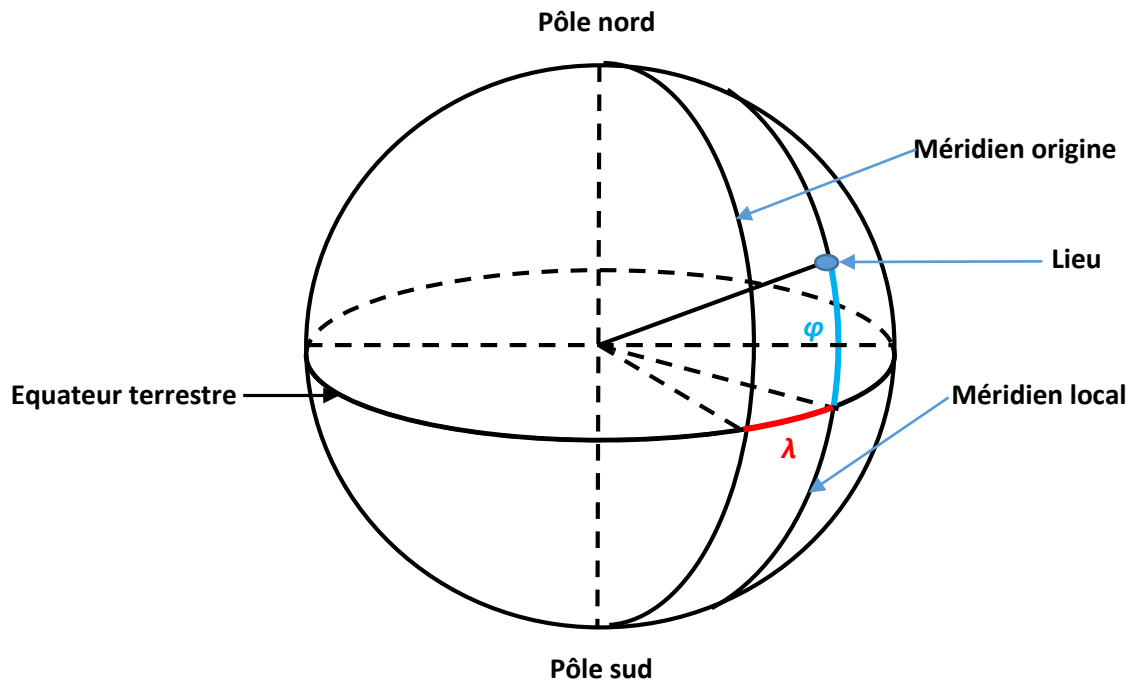
#### 2.5.1.4. La longitude $\lambda$

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich [12].

$$-180^\circ \leq \lambda \leq +180^\circ \text{ Tel que : } \begin{cases} \lambda > 0 \text{ à l'est du méridien de Greenwich} \\ \lambda < 0 \text{ à l'ouest du méridien de Greenwich} \end{cases}$$

#### 2.5.1.5. L'altitude

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre.



**Figure II-5** : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné

#### 2.5.2. Coordonnées de soleil

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents

- ❖ Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- ❖ Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

### 2.5.3. Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles ( $\delta$ ,  $\omega$ ).

#### 2.5.3.1. Déclinaison $\delta$

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil-Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre  $-23.45^\circ$  et  $+23.45^\circ$ . Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre).

La variation journalière de la déclinaison est d'environ de  $0,5^\circ$ . Elle est calculée par une équation simple approximative :

$$\delta(^{\circ}) = 23.45 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} (J + 284) \right] \quad II.2$$

Varie entre deux valeurs extrêmes :  $-23.45^\circ < \delta < +23.45^\circ$ , cette formule donne la déclinaison en degrés, l'erreur sur  $\delta$  est comprise dans l'intervalle  $[-1,4^\circ; +0,5^\circ]$ .

J est le rang du jour dans l'année (1 pour le 1er janvier).

Une autre formule approchée proposée par Chr. Perrin de Brichambaut:

$$\delta(^{\circ}) = \arcsin \left[ 0.4 \cdot \sin \left( \frac{360}{365} (J + 80) \right) \right] \quad II.3$$

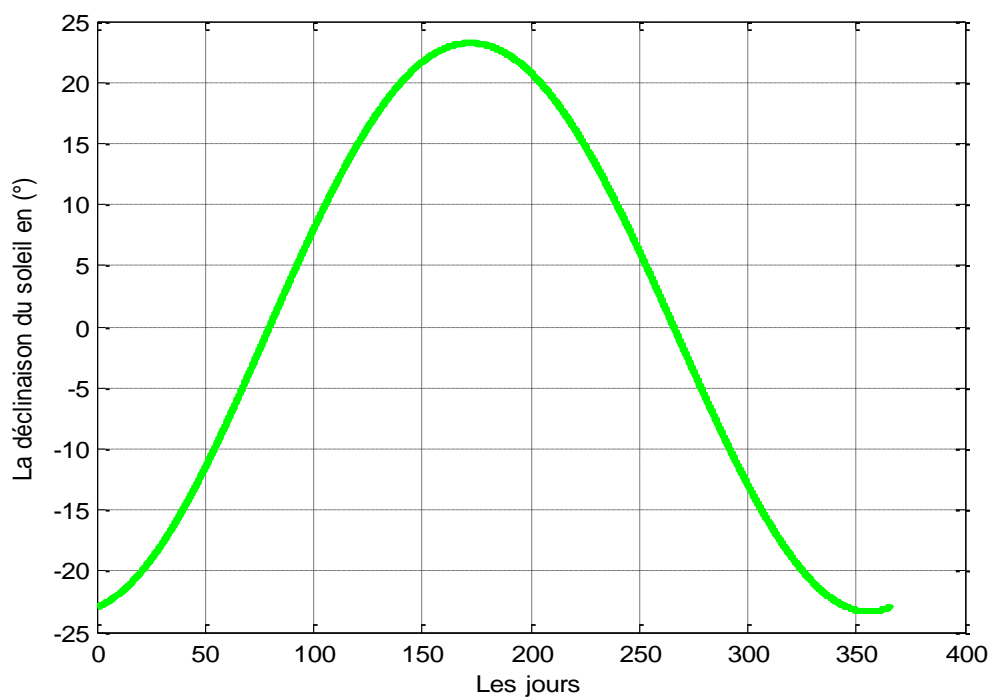
L'erreur sur  $\delta$  est comprise dans l'intervalle  $[-1,9^\circ ; +0,8^\circ]$ .

Une de ces deux formules fait l'affaire pour les calculs d'énergétique de précision moyenne. Pour plus de précision, on peut facilement ajuster une fonction périodique composée de la somme de deux (ou plus si le besoin de précision le justifie) fonctions sinusoïdales et d'un terme constant sur les données calculées (à quelques  $10^{-4}$  secondes d'arc près) par le Bureau des Longitudes. Par exemple, pour la période 2013 - 2023, on trouve en degrés :

$$\delta(^{\circ}) = 0.38 + 23.26 \cdot \sin \left( \frac{2\pi J'}{365.24} - 1.395 \right) + 0.375 \cdot \sin \left( \frac{4\pi J'}{365.24} - 1.47 \right) \quad II.4$$

$J'$  Vaut 1 au premier janvier 2013, 366 au premier janvier 2014, 731 au premier janvier 2015, 1096 au premier janvier 2016, 1462 au premier janvier 2017, etc.... On a tenu compte du fait que 2016 sera une année bissextile. Cette fonction est comparée avec les calculs du bureau des longitudes. L'erreur, non décelable à l'échelle du graphique, reste toujours inférieure à  $0,20^\circ$  ( $11,8'$ ). Un développement avec des termes supplémentaires permettrait de réduire encore l'erreur résiduelle [21].

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure (II-6).



**Figure II-6 :** Variation annuelle de la déclinaison solaire

### 2.5.3.2. Angle horaire $\omega$

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [12] :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad II.5$$

$TSV$  : temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi, se calcul par la formule suivante :

$$TSV = GMT + \left(\frac{ET}{60}\right) + \left(\frac{\lambda - \lambda_{réf}}{15}\right) \quad II.6$$

$$ET = \{0.000075 + 0.00186 \cos(B) - 0.032077 \sin(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.04089 \sin(2B)\} 229.18 \quad II.7$$

$$B = \left( \frac{360}{365} (Nj - 1) \right) \quad II.8$$

$GMT$ : est le temps universel du méridien de Greenwich.

$ET$ : est l'équation du temps en minute.

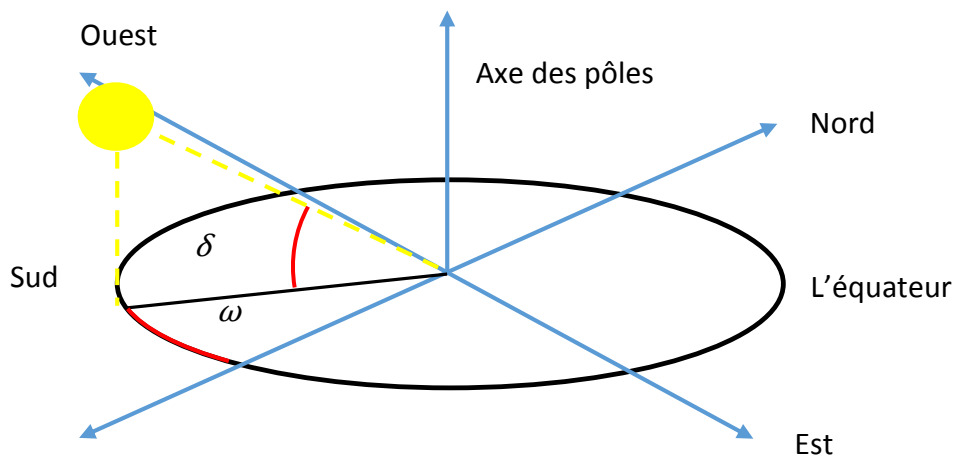
$\lambda$ : la longitude du lieu.

$\lambda_{ref}$ : Longitude du méridien de Greenwich, égal 0.

Avec  $TSV$  en heures et  $\omega$  en degrés. L'angle horaire  $\omega$  varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ .

Cette formule provient du fait que le soleil semble tourner dans le plan de l'équateur de  $360^\circ$  en 24 heures soit  $15^\circ$  par heure. De plus, le choix arbitraire de prendre l'angle horaire nul quand le soleil est dans le plan du méridien local (il est alors midi solaire) finit d'expliquer la formule.

$$\text{On prend } \begin{cases} \omega > 0 & \text{après midi (PM)} \\ \omega < 0 & \text{avant midi (AM)} \\ \omega = 0 & \text{midi TSV} \end{cases}$$



**Figure II-7** : Les coordonnées équatoriales

### 2.5.4. Coordonnées horizontales ou azimutales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan horizontal du lieu de latitude  $\varphi$  par deux angles  $h$  et  $\Psi$ .

#### 2.5.4.1. Hauteur angulaire du soleil $h$

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante [12] :

$$h = \arcsin(\cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta)) \quad II.9$$

Varie entre deux valeurs extrêmes :  $-90^\circ < \alpha < +90^\circ$ , on prend :

$$\begin{cases} h > 0 & \text{le jour} \\ h < 0 & \text{la nuit} \\ h = 0 & \text{au lever et coucher du soleil} \end{cases}$$

#### 2.5.4.2. Azimut du soleil $\Psi$

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée [12].

$$\Psi = \arcsin\left(\frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)}\right) \quad II.10$$

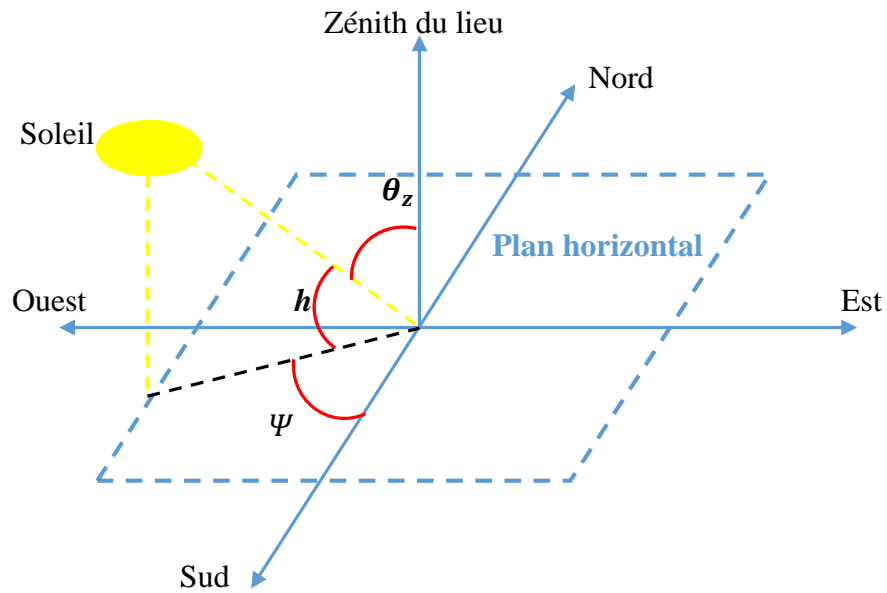
$\Psi$  : varie entre :  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ , on prend :

$$\begin{cases} \Psi > 0 & \text{vers l'ouest} \\ \Psi < 0 & \text{vers l'est} \\ \Psi = 0 & \text{direction du sud} \end{cases}$$

#### 2.5.4.3. Angle zénithal $\theta_z$

C'est l'angle entre la verticale d'une surface et un rayon du soleil, il est donné par l'équation suivante [12] :

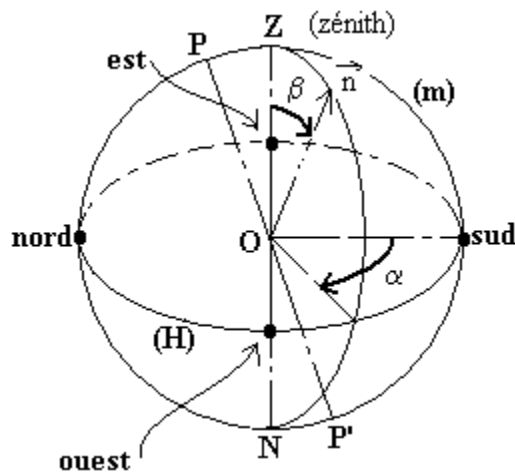
$$\theta_z = \cos^{-1}[\sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)] \quad II.11$$



**Figure II-8** : Les coordonnées horizontales

### 2.5.5. Caractérisation de l'orientation et l'inclinaison des modules

L'orientation et l'inclinaison d'un plan sont caractérisées par les variables  $\psi$  et  $\beta$  définies comme indiqué à la figure ci-dessous, où le vecteur  $\vec{n}$  est le vecteur perpendiculaire au plan considéré [22].



**Figure II-9** : Définition des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$

La variable  $\alpha$  qui désigne l'orientation des panneaux est choisie de telle sorte que :

$\alpha = -90^\circ$  Pour une orientation Est.

$\alpha = 0^\circ$  Pour une orientation Sud.

$\alpha = 90^\circ$  Pour une orientation Ouest.

$\alpha = 180^\circ$  Pour une orientation Nord.

Par ailleurs, l'inclinaison  $\beta$  est choisie de telle sorte que :

$\beta = 0^\circ$  Pour un plan horizontal tourné vers le haut.

$\beta = 90^\circ$  Pour un plan vertical.

$\beta = 180^\circ$  Pour un plan horizontal tourné vers le bas.

### 2.5.6. Récapitulatif des angles utilisés

Repère	Angles	Dénomination
Les coordonnées géographiques	$\varphi$	Latitude
	$\lambda$	Longitude
Les coordonnées horaires	$\delta$	La déclinaison du soleil
	$\omega$	L'angle horaire
Les coordonnées horizontales	$h$	Hauteur angulaire du soleil
	$\psi$	L'azimut du soleil
	$\beta$	Inclinaison du module
	$\alpha$	Orientation du module

Tableau II-1 : Les angles utilisés

### 2.6. Durée du jour

Le jour est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donne une hauteur  $h$  du soleil nulle sont appelés : le lever et le coucher du soleil.

L'angle de lever du soleil est donné par la formule suivante :

$$\omega_{sr} = -\arccos(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad II.12$$

L'heure de lever de soleil est donnée par la formule suivante :

$$H_L = \left(\frac{1}{15}\right) \cdot \omega_{sr} + 12 \quad II.13$$

L'angle de coucher du soleil est donné par la formule suivante :

$$\omega_{ss} = -\omega_{sr} = \arccos(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad II.14$$

L'heure de coucher de soleil est donnée par la formule suivante :

$$H_C = \left(\frac{1}{15}\right) \cdot \omega_{ss} + 12 \quad II.15$$



La durée du jour  $T_j$  est calculée à partir du lever jusqu'au coucher du soleil, c'est-à-dire :

$$T_j = H_c - H_L \quad II.16$$

On obtient :

$$T_j = \left(\frac{2}{15}\right) \cdot \text{acos}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad II.17$$

$T_j$  : Est la durée du jour exprimée en h, précision meilleure que 4%.  $\varphi$  Est la latitude du lieu.

Une formule rigoureusement équivalente [21] :

$$T_j = 24 \left[ 1 - \frac{\text{acos}(\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta))}{\pi} \right] \quad II.18$$

## 2.7. Système de poursuite

### 2.7.1. Orientation d'une surface

Le positionnement d'une surface face au soleil par rapport à même surface positionné de manière permanente en plein Sud se justifie pour les raisons suivantes :

- Permet d'augmenter le rendement du panneau solaire de 30 à 40% si elle est réalisée sur 2 axes.
- Le temps de retour sur investissement est réduit.

### 2.7.2. Position du soleil par rapport à un observateur

La position du soleil change au fil de la journée (en fonction de la rotation de la Terre) et de la période de l'année (en fonction des variations d'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à l'orbite du soleil).

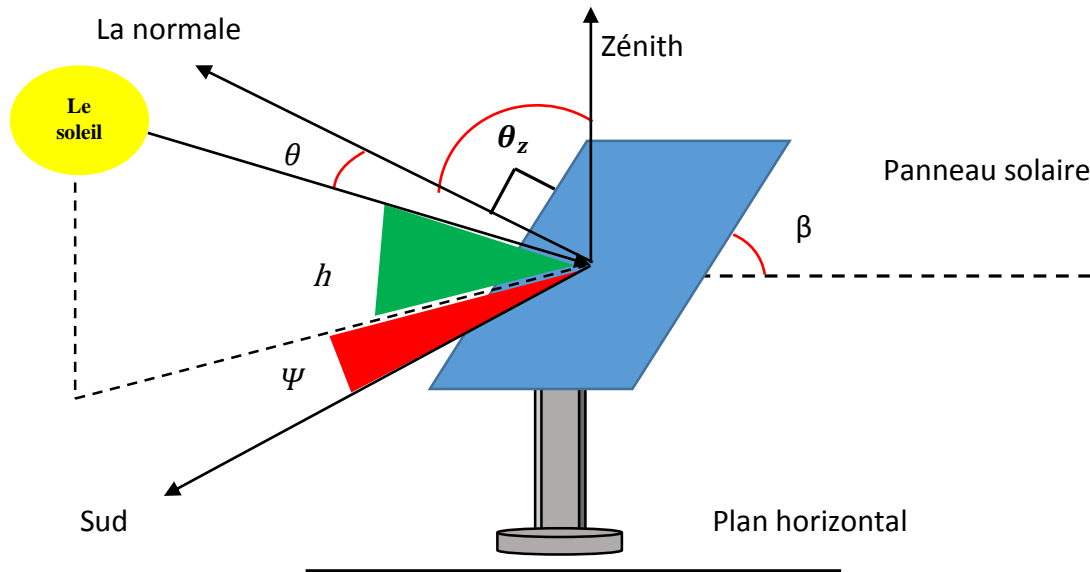
L'énergie solaire que reçoit une surface est régie uniquement par des lois astronomiques et géométriques. Ces dernières faisant intervenir la latitude de lieu, la déclinaison solaire, l'heure du jour et enfin l'orientation de la surface réceptrice.

Le repérage de la position du soleil s'effectue par les deux angles l'azimut et la hauteur du soleil. Trois cas peuvent se présenter : le panneau en position horizontale, le panneau incliné fixe et le panneau perpendiculaire suivant la trajectoire des rayons solaires.

Nous désirons dans notre travail de maintenir le panneau solaire toujours face au soleil, c'est-à-dire perpendiculaire aux rayons solaires.

Les rayons solaires forment un angle incident  $\theta$  avec la normale au plan considéré, comme le montre la figure (II-10) :

Le panneau est incliné d'un angle  $\beta$ , les rayons solaires arrivent avec une hauteur  $h$ , les deux angles doivent être complémentaires et former  $90^\circ$ . Nous devons incliner le panneau de telle sorte que les rayons solaires arrivent perpendiculairement sur la surface. Cela revient donc à annuler l'angle incident  $\theta$  et à déterminer l'angle d'inclinaison du panneau  $\beta$  [23].



**Figure II-10** : Les rayons solaires sur un plan incliné

### 2.7.3. Angle d'incidence $\theta$

C'est l'angle entre le rayon solaire direct et la normale extérieure de la surface du plan, il est donné par l'équation suivante :

$$\theta = \cos^{-1}[\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(\beta) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\Psi) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\beta) + \sin(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\Psi) + \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\Psi)] \quad II.19$$

Cette équation nous permet de calculer les angles ( $\Psi$ ,  $h$ ) pour les différentes positions du panneau solaire.

#### 2.7.4. Azimut du soleil $\Psi$

➤ **1<sup>er</sup> cas : plan horizontal**

L'inclinaison du panneau est nulle et l'équation (II.19) devient :

$$\theta = \cos^{-1}[\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\omega)] \quad II.20$$

➤ **2<sup>ème</sup> cas : plan perpendiculaire**

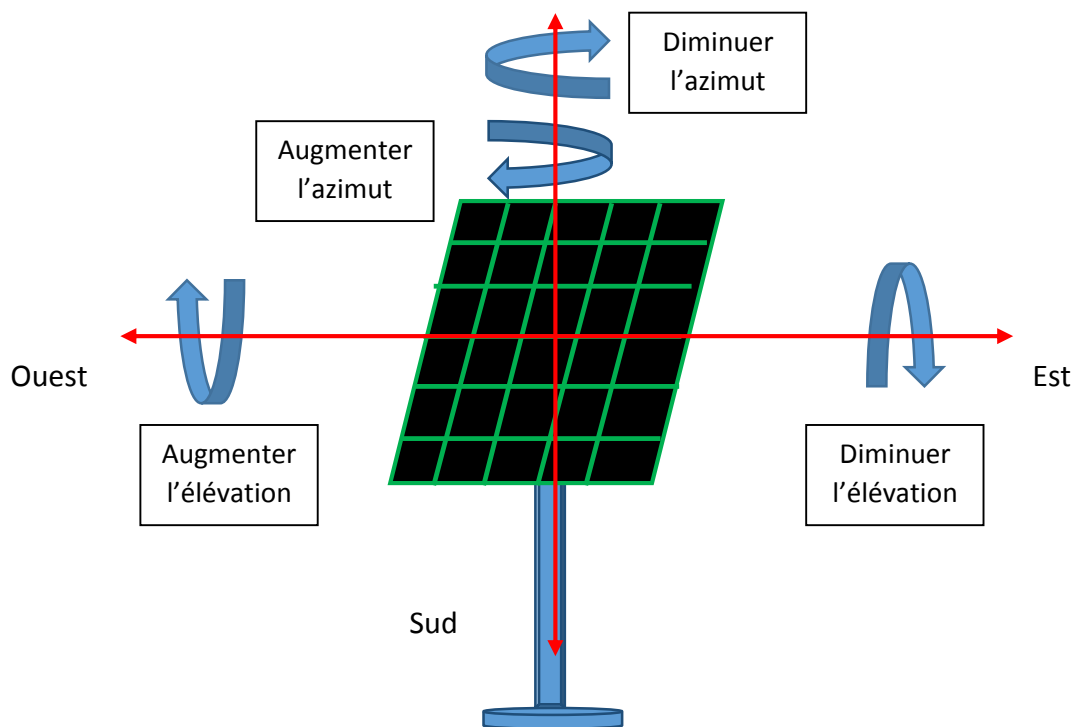
L'équation (II.19) devient :

$$\theta = \cos^{-1}[-\cos(\varphi) \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(\Psi) + \sin(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\Psi) + \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(\Psi)] \quad II.21$$

➤ **3<sup>ème</sup> cas : avec un suiveur à deux axes**

Pour une poursuite du soleil suivant deux axes, avec le panneau orienté en permanence face au soleil, sous une incidence normale l'angle incident  $\theta$  doit être nul L'équation (II.19) devient :

$$\theta = 0^\circ; \Leftrightarrow \cos(\theta) = 1 \quad II.22$$



**Figure II-11 : Poursuite du soleil suivant deux axes**

### 2.7.5. Hauteur du soleil $h$

La hauteur du soleil  $h$  peut alors se déduire par la relation suivante :

$$\psi = \sin^{-1} \left( \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \right) \Leftrightarrow h = \cos^{-1} \left( \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\sin(\psi)} \right) \quad II.23$$

### 2.7.6. Inclinaison $\beta$

L'inclinaison du panneau se détermine finalement par la relation suivante :

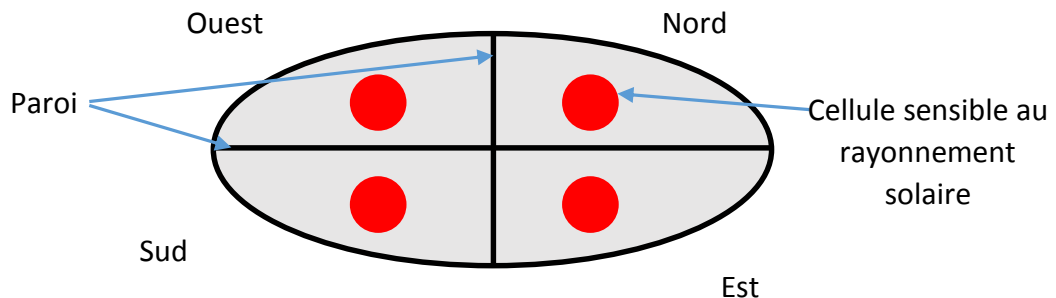
$$\beta = 90 - h \quad II.24$$

## 2.8. Techniques de commande

Les techniques de commande sont diverses, mais peuvent être subdivisées en deux catégories, les unes basées sur l'asservissement, des capteurs détectent en permanence la position du soleil, les autres sur la pré-programmation de la trajectoire du soleil, ce type basé sur le fait que le soleil suit une trajectoire relativement périodique pour un observateur situé à un endroit donné sur la terre [3].

### 2.8.1. Technique de l'asservissement

Le principe est simple, quatre cellules sensibles au rayonnement solaire séparées sert à capter la position du soleil en permanence (exemple : 4 LDR), la poursuite s'effectue indépendamment de la zone dans laquelle le système sera situé, et elle est plus précise, mais il y a des pertes d'énergie dues à la consommation du système de commande qui est actif en permanence.



**Figure II-12** : Principe de la technique d'asservissement

### **2.8.2. Technique de pré-programmation**

Dans la deuxième technique, la poursuite du soleil peut dès lors s'effectuer par des méthodes de pré-programmation de la trajectoire du soleil qui est gouvernée par des équations appelées « équations du temps », le soleil est repéré par son hauteur et son azimut [5]. Ces deux derniers sont programmés sur microcontrôleur pour piloter le système.

La poursuite liée par la zone dans laquelle le système sera situé, et elle est moins précise que la première méthode, mais la consommation du système de contrôle est faible.

### **2.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné une présentation des principaux systèmes de coordinations utilisés dans la géométrie terre-soleil, et les angles utilisés pour repérer le soleil afin de déterminer son trajectoire, plus une démonstration du système de poursuite avec les techniques de commande et contrôle utilisées.

# Chapitre

# 03

## **TRAITEMENT DE DONNÉES ET L'ALGORITHME DE POURSUITE**

## Chapitre 3. Traitement de données et l'algorithme de poursuite

<b>3.1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.</b>	<b>La Technique proposée dans notre travail.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Principe de la technique proposée .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.1.1.</b>	<b>Étage de données et mesures .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.1.2.</b>	<b>Étage de traitement et pilotage.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.1.3.</b>	<b>Étage de puissance.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3.</b>	<b>Site étudié .....</b>	<b>39</b>
<b>3.4.</b>	<b>Présentation de JRC.....</b>	<b>39</b>
<b>3.5.</b>	<b>Analyse et traitement de données .....</b>	<b>40</b>
<b>3.5.1.</b>	<b>Inclinaison optimale mensuel .....</b>	<b>41</b>
<b>3.5.2.</b>	<b>Mois de décembre.....</b>	<b>41</b>
<b>3.5.3.</b>	<b>Mois de mars.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5.4.</b>	<b>Mois de juin.....</b>	<b>45</b>
<b>3.5.5.</b>	<b>Mois de septembre.....</b>	<b>47</b>
<b>3.6.</b>	<b>Algorithme de poursuite proposé.....</b>	<b>50</b>
<b>3.7.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>52</b>

### 3.1. Introduction

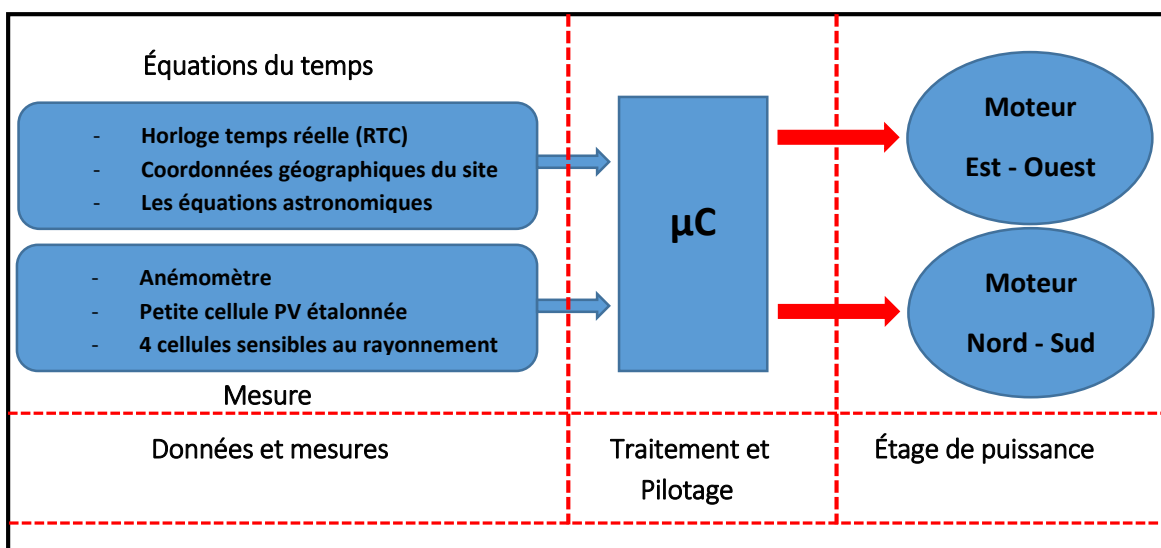
L'objectif de ce chapitre, et de traiter les données du site étudié fournies par JRC (Joint Research Center) sous forme de rayonnement solaire journalier moyen, sur un plan incliné d'un angle optimal annuel, sur un plan incliné d'un angle optimal mensuel et sur un plan monté sur un suiveur à deux axes, ces données nous permettent d'estimer les irradiances directes horaires moyennes reçu durant une journée en intervalle d'une heure, afin d'établir un algorithme pour notre suiveur.

L'objectif de l'algorithme qui sera programmé sur un microcontrôleur est d'orienter le panneau perpendiculairement aux rayons solaires directs et de suivre le mouvement tracé par le soleil du levé au couché dans le but d'obtenir un rendement maximal.

### 3.2. La Technique proposée dans notre travail

Nous voulons réaliser un suiveur solaire à deux axes, un axe Est-Ouest (l'azimut du soleil), et un axe Nord-Sud (hauteur du soleil), et la technique de commande et de contrôle que nous souhaitons élaborer pour piloter notre traqueur solaire est une hybridation des deux techniques citées dans le chapitre 2, l'asservissement et la pré-programmation pour dégager les inconvénients de chacune, tout en gagnant une meilleure précision de poursuite et une faible consommation du système de commande.

La figure III-1 représente un schéma synoptique général de notre technique proposée pour piloter notre traqueur solaire.



**Figure III-1** : Schéma synoptique général de la technique de commande proposée



### 3.2.1. Principe de la technique proposée

Pour toucher la technique de pré-programmation, on va programmer toutes les équations astronomiques du chapitre 2 qui traçant le mouvement apparent du soleil sur un microcontrôleur, on va définir des intervalles de temps pour générer les impulsions de commande, et pour que nos calculs astronomiques serrons en temps réel, il faut brancher une horloge temps réel (RTC) pour lire le temps et la date locales du site étudié.

On va aussi placer quatre cellules sensibles au flux lumineux fonctionnent comme un correcteur de position pour toucher la technique d'asservissement.

Et pour bien optimiser notre système de poursuite, on va intégrer un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent et de maître le système hors service en cas d'un vent violent, une petite cellule étalonnée fonctionne comme un pyréliomètre pour mesurer l'intensité lumineuse du rayonnement solaire incident sur la surface du panneau photovoltaïque et de maitre aussi le système hors service si le rayonnement solaire inférieur à un certain seuil bien définit.

#### 3.2.1.1. Étage de données et mesures

Cet étage comporte deux parties, l'une est concernée par les équations de temps (Coordonnées du site plus les équations astronomiques), qui serrent programmées sur un microcontrôleur, et l'autre qui consiste à mesurer :

- La vitesse du vent en cas du vent violent par un anémomètre.
- Le rayonnement solaire incident sur la surface active du GPV par une petite cellule PV étalonnée, pour déterminer un certain gain qui va nous permettre de commencer la poursuite ou de détecter l'état du ciel.
- Les quatre tensions des cellules sensibles au rayonnement solaire pour bien positionner notre GPV face au soleil lors de la poursuite.

#### 3.2.1.2. Étage de traitement et pilotage

Les tensions des signaux venant du (anémomètre, cellule PV étalonnée et les quatre cellules sensibles au rayonnement solaire), doivent être adaptés avant de les envoyer au microcontrôleur, ce dernier va générer les signaux de commande suivant les paramètres d'entrés et les équations programmées.

### 3.2.1.3. Étage de puissance

Il est composé de deux moteurs, l'un pour l'azimut et l'autre pour l'élévation, plus un étage d'adaptation (commande - puissance), ces moteurs sont commandés suivant les signaux sortants du microcontrôleur.

### 3.3. Site étudié

Le site qui sera étudié est un petit village nommé Awassa sise à la commune de Souamâa, wilaya de M'sila, dont les coordonnées géographiques sont :

La latitude : 35°34'18" Nord.

La longitude : 4°41'16" Est.

L'altitude : 409 m.

L'angle d'inclinaison optimal est 33°. [26]

### 3.4. Présentation de JRC

JRC : Joint Research Centre, en français Le Centre commun de recherche (CCR) de la commission européenne est un service de la science sous la responsabilité de Tibor Navracsics, commissaire de l'éducation, la culture, la jeunesse et sports. Le directeur général actuel de CCR est Vladimír Šucha.

Le CCR fournit des avis scientifiques et techniques dépend à la Commission européenne, il permet de soutenir un large éventail de politiques de l'Union européenne. Il dispose de sept instituts scientifiques situés dans six sites différents en Belgique (Bruxelles et Geel), Allemagne (Karlsruhe), Italie (Ispra), les Pays-Bas (Petten), et en Espagne (Séville) [24].

Le CCR compte sept instituts scientifiques :

- 1- Institut de l'environnement durable (IES).
- 2- Institut de l'énergie et des transports (IET).
- 3- Institut pour la santé et de la protection des consommateurs (IHCP).
- 4- Institut de prospective technologique (IPTs).
- 5- Institut des matériaux et mesures de référence (IRMM).
- 6- Institut de Transformation d'uranium en Eléments (UIT).
- 7- Institut pour la protection et la sécurité des citoyens (IPSC).

Le système d'information géographique photovoltaïque (PVGIS) de l'institut de l'énergie et des transports (IET), est une application Web pour l'estimation de la performance des photovoltaïques (PV) en Europe et en Afrique, qui a été largement utilisés par la communauté de PV en Europe. Il présente les résultats de l'adaptation des données de rayonnement solaire calculées à partir de données satellitaires par l'utilisation CM-SAF pour PVGIS. Le CM – SAF est une base de données de rayonnement solaire caractérisé par une très faible biais global et montre une bonne précision sur les sites de validation. L'application de PVGIS apporte des améliorations importantes par rapport aux bases de données de rayonnement solaire existant au sein PVGIS [25].

Le lien électronique de PVGIS sur internet est : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

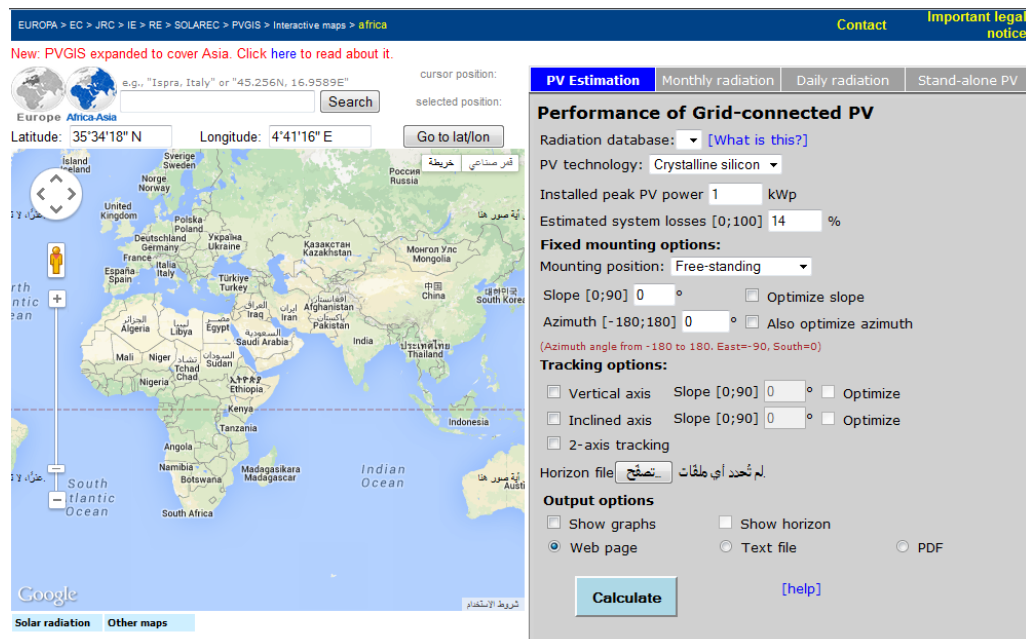


Figure III-2: L'interface graphique de PVGIS

### 3.5. Analyse et traitement de données

Dans cette étape, nous aurons traité les données du site étudié fournit par PVGIS sous forme de rayonnement solaire journalier moyen pour chaque mois de l'année, reçu sur une surface de  $1\text{m}^2$  pour un plan incliné d'un angle optimale annuel et un angle optimale mensuel et orienté plein sud, et pour un plan monté sur un suiveur solaire à deux axes. Ensuite en calculant les irradiances horaires moyennes reçues durant une journée en intervalle d'une heure pour chaque cas afin de faire une comparaison pour déduire le gain d'utilisation de suiveur par rapport à un système fixe.

Nous avons choisis les mois de décembre, mars, juin et septembre, les mois qui sont compatibles respectivement avec solstice d'hiver, l'équinoxe de printemps, solstice d'été et l'équinoxe d'automne.

### 3.5.1. Inclinaison optimale mensuel

Le tableau (III-1) représente l'inclinaison optimale dans chaque mois de l'année pour le site étudié [26]

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
$\beta_{opt}$	60°	52°	39°	24°	11°	03°	06°	18°	34°	48°	58°	63°	33°

**Tableau III-1** : Les angles d'inclinaisons mensuels

### 3.5.2. Mois de décembre

- Angle d'inclinaison annuel : 33°.      - Angle d'inclinaison mensuel : 63°.
- Orientation : 0° (plein sud).              - Journée type : 10.

Heure	H (33°)	H (63°)	H <sub>s</sub>	Gain (33)	Gain (63)
07:30	75.5	96.5	163.5	117	28
08:30	319.5	383.5	563.5	68	20
09:30	505.4	579.5	685.25	36	15
10:30	636.5	711.5	756.75	19	12
11:30	703.5	778.25	786	12	11
12:30	703.5	778.25	786	12	11
13:30	636.5	711.5	756.75	19	12
14:30	505.4	579.5	685.25	36	15
15:30	319.5	383.5	563.5	68	20
16:30	75.5	96.5	163.5	117	28
Total	4497	5121	5897	31	14

**Tableau III-2** : Irradiation journalière de mois de décembre [26]

**H (33°)** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan fixe en (Wh/m<sup>2</sup>), incliné d'un angle  $\beta = 33^\circ$  (inclinaison annuel) et l'orientation plein sud,  $\alpha = 0^\circ$ .

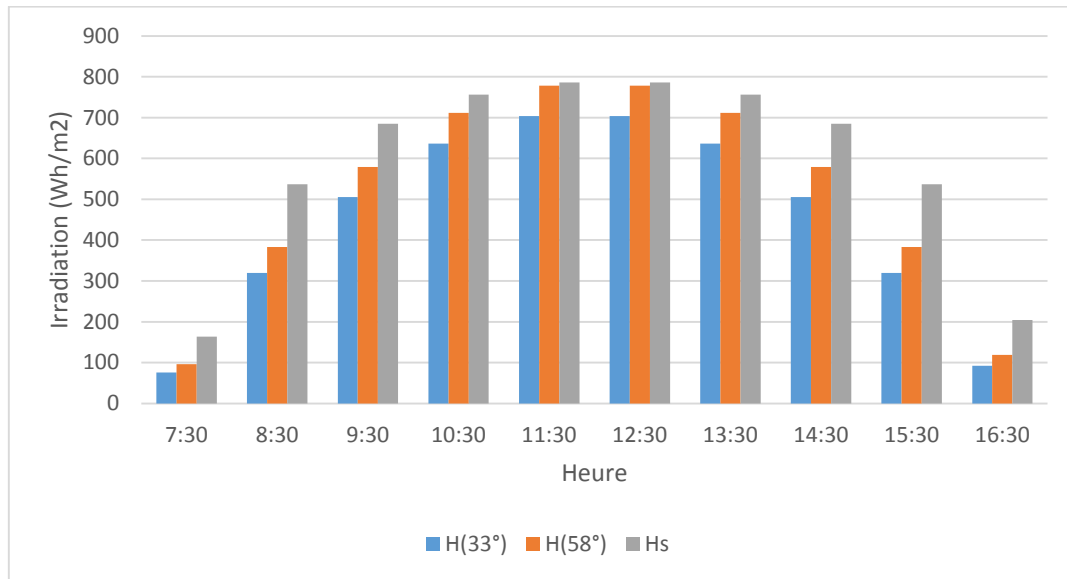
**H (63°)** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan fixe en (Wh/m<sup>2</sup>), incliné d'un angle  $\beta = 63^\circ$  (inclinaison mensuel) et l'orientation plein sud,  $\alpha = 0^\circ$ .

**H<sub>s</sub>** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan monté sur un suiveur solaire à deux axes en (Wh/m<sup>2</sup>).

**Gain(33)** : La différence entre  $H_s$  et  $H(33^\circ)$  en % (le gain de suiveur par rapport à un système fixe et incliné d'un angle  $\beta = 33^\circ$  et  $\alpha = 0^\circ$ ).

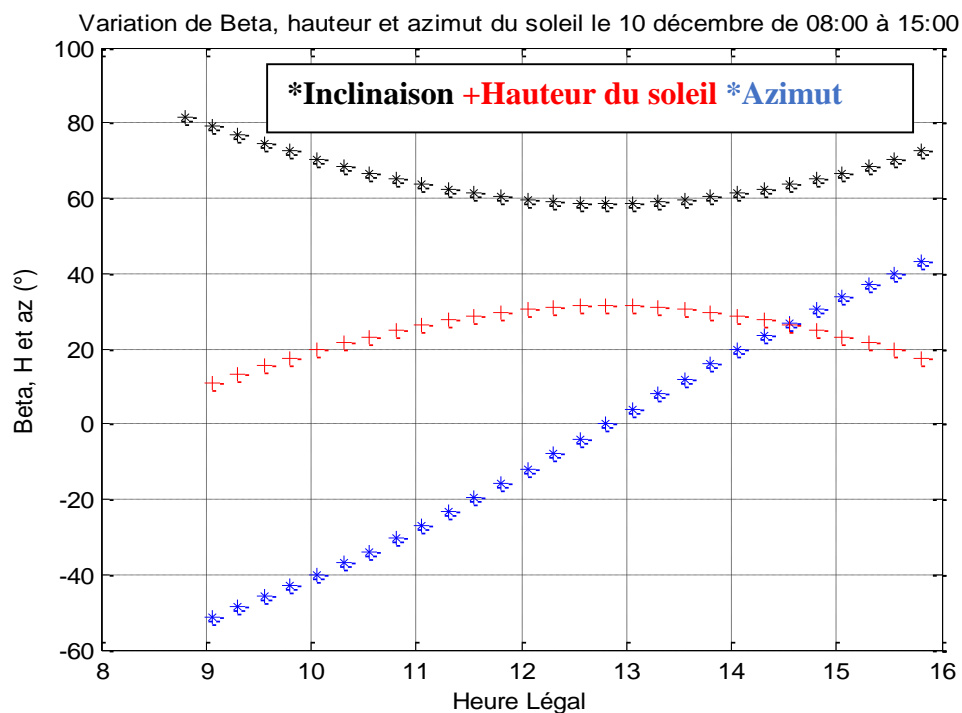
**Gain(63)** : La différence entre  $H_s$  et  $H(63^\circ)$  en % (le gain de suiveur par rapport à un système fixe et incliné d'un angle  $\beta = 63^\circ$  et  $\alpha = 0^\circ$ ).

On remarque que l'énergie reçu sur un plan monté sur suiveur solaire à deux axes est supérieur à celle qui reçoit sur un plan fixe et incliné d'un angle de  $33^\circ$  et  $63^\circ$  et orienté plein sud respectivement d'un gain de 31% et 14%.



**Figure III-3** : Variation de  $H(33^\circ)$ ,  $H(63^\circ)$  et  $H_s$  au cours de la journée

Pour un suivi économique et envisageable, une poursuite de 08:00 du matin à 15:00 après-midi est très bénéfique, avec un pas d'une heure, la figure (III-4) représente la variation de l'inclinaison du panneau, la hauteur et l'azimut du soleil au cours de la journée le 10 décembre.



**Figure III- 4 :** Variation de l'inclinaison, la hauteur et l'azimut du soleil le 10 décembre

### 3.5.3. Mois de mars

- Angle d'inclinaison annuel :  $33^\circ$ .      - Angle d'inclinaison mensuel :  $39^\circ$ .
- Orientation :  $0^\circ$  (plein sud).              - Journée type : 16.

Heure	H ( $33^\circ$ )	H ( $39^\circ$ )	$H_s$	Gain (33)	Gain (39)
06:30	72.75	72.75	230.25	216	0
07:30	284.75	286.25	594.25	109	1
08:30	504.75	507.25	763.25	51	0
09:30	688.75	692.5	846.75	23	1
10:30	818	822.75	884.25	8	1
11:30	884.5	889.25	897.75	1	1
12:30	884.5	889.25	897.75	1	1
13:30	818	822.75	884.25	8	1
14:30	688.75	692.5	846.75	23	1
15:30	504.75	507.25	763.25	51	0
16:30	284.75	286.25	594.25	109	1
17:30	77.75	77.75	284.25	220	0
Total	6512	6547	8452	30	1

**Tableau III-3 :** Irradiation journalière de mois de mars [26]

**H (33°)** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan fixe en ( $\text{Wh/m}^2$ ), incliné d'un angle  $\beta = 33^\circ$  (inclinaison annuel) et l'orientation plein sud,  $\alpha = 0^\circ$ .

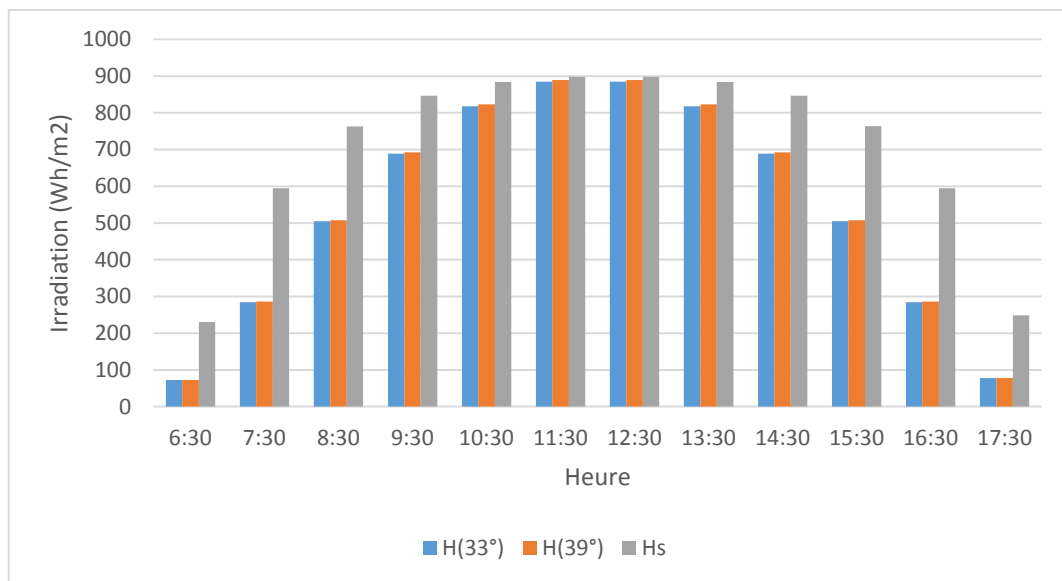
**H (39°)** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan fixe en ( $\text{Wh/m}^2$ ), incliné d'un angle  $\beta = 39^\circ$  (inclinaison mensuel) et l'orientation plein sud,  $\alpha = 0^\circ$ .

**H<sub>s</sub>** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan monté sur un suiveur solaire à deux axes en ( $\text{Wh/m}^2$ ).

**Gain(33)** : La différence entre **H<sub>s</sub>** et **H (33°)** en % (le gain de suiveur par rapport à un système fixe et incliné d'un angle  $\beta = 33^\circ$  et  $\alpha = 0^\circ$ ).

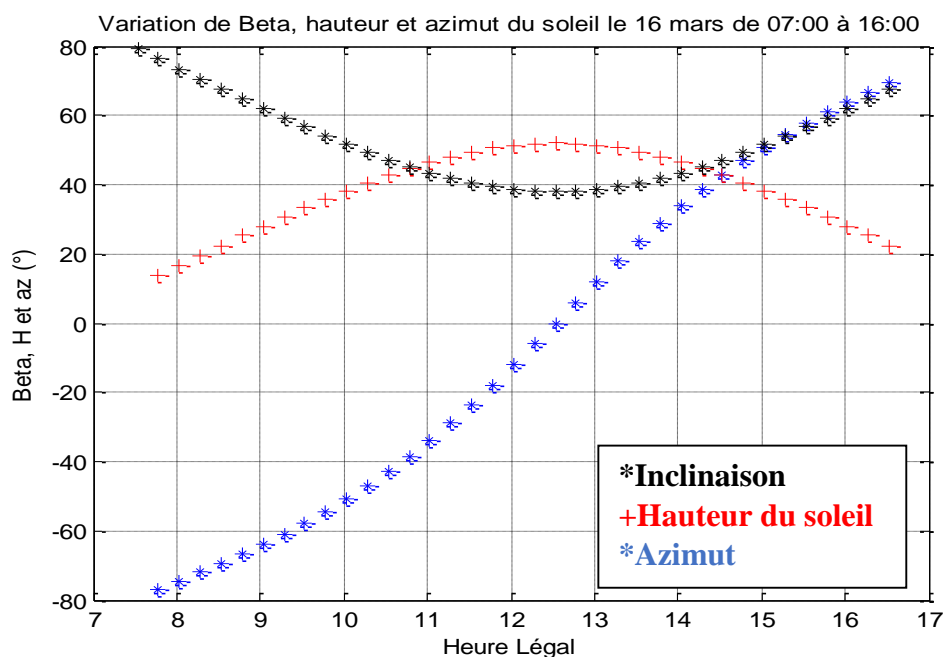
**Gain(39)** : La différence entre **H<sub>s</sub>** et **H (39°)** en % (le gain de suiveur par rapport à un système fixe et incliné d'un angle  $\beta = 39^\circ$  et  $\alpha = 0^\circ$ ).

On remarque que l'énergie reçu sur un plan monté sur suiveur solaire à deux axes est supérieur à celle qui reçoit sur un plan fixe et incliné d'un angle de  $33^\circ$  et  $39^\circ$  et orienté plein sud respectivement d'un gain de 30% et 01%.



**Figure III-5** : Variation de H (33°), H (39°) et HS au cours de la journée

Pour un suivi économique et envisageable, une poursuite de 07:00 du matin à 16:00 après-midi est très bénéfice, avec un pas d'une demi-heure, la figure (III-6) représente la variation de l'inclinaison du panneau, la hauteur et l'azimut du soleil au cours de la journée le 16 mars.



**Figure III-6** : Variation de l'inclinaison, la hauteur et l'azimut du soleil le 16 mars

#### 3.5.4. Mois de juin

- Angle d'inclinaison annuel :  $33^\circ$ .      - Angle d'inclinaison mensuel :  $03^\circ$ .
- Orientation :  $0^\circ$  (plein sud).              - Journée type : 11.

Heure	H ( $33^\circ$ )	H ( $03^\circ$ )	$H_s$	Gain (33)	Gain (03)
05:30	39.75	71.5	293.5	638	80
06:30	139.75	232.5	606	334	66
07:30	335	427	786	135	27
08:30	539	615	884.25	64	14
09:30	715.25	771.5	934	31	8
10:30	842.25	882.75	955.5	13	5
11:30	908.5	939.75	963.25	6	3
12:30	908.5	939.75	963.25	6	3
13:30	842.25	882.75	955.5	13	5
14:30	715.25	771.5	934	31	8
15:30	539	615	884.25	64	14
16:30	335	427	786	135	27
17:30	139.75	232.5	606	334	66
18:30	39.75	71.5	293.5	638	80
Total	7039.5	7880	10846	54	12

**Tableau III-4** : Irradiation journalière de mois de juin [26]



**H (33°)** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan fixe en ( $\text{Wh/m}^2$ ), incliné d'un angle  $\beta = 33^\circ$  (inclinaison annuel) et l'orientation plein sud,  $\alpha = 0^\circ$ .

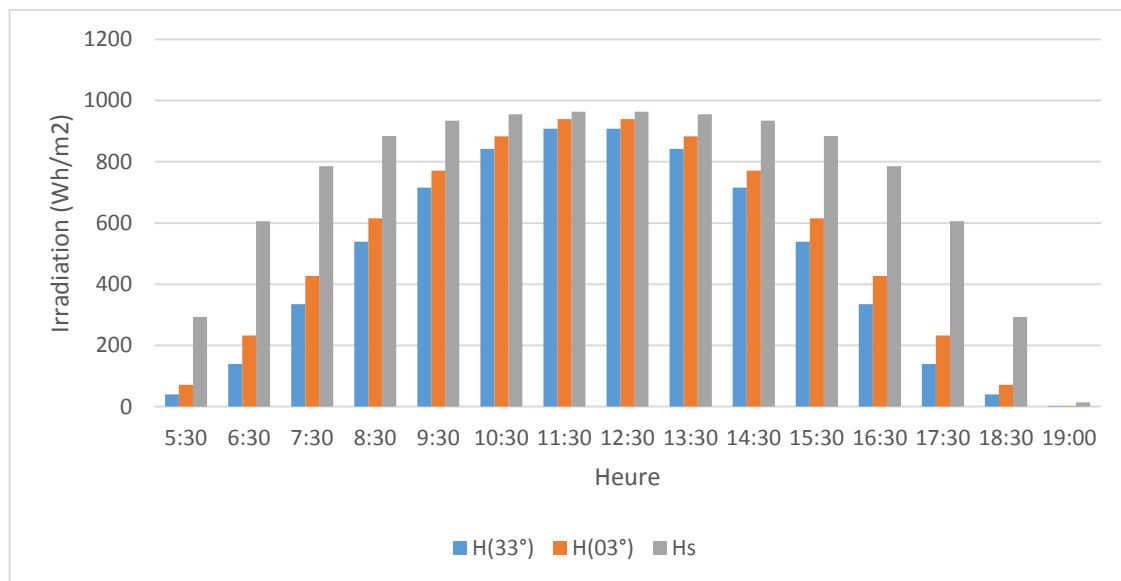
**H (03°)** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan fixe en ( $\text{Wh/m}^2$ ), incliné d'un angle  $\beta = 03^\circ$  (inclinaison mensuel) et l'orientation plein sud,  $\alpha = 0^\circ$ .

**H<sub>s</sub>** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan monté sur un suiveur solaire à deux axes en ( $\text{Wh/m}^2$ ).

**Gain(33)** : La différence entre **H<sub>s</sub>** et **H (33°)** en % (le gain de suiveur par rapport à un système fixe et incliné d'un angle  $\beta = 33^\circ$  et  $\alpha = 0^\circ$ ).

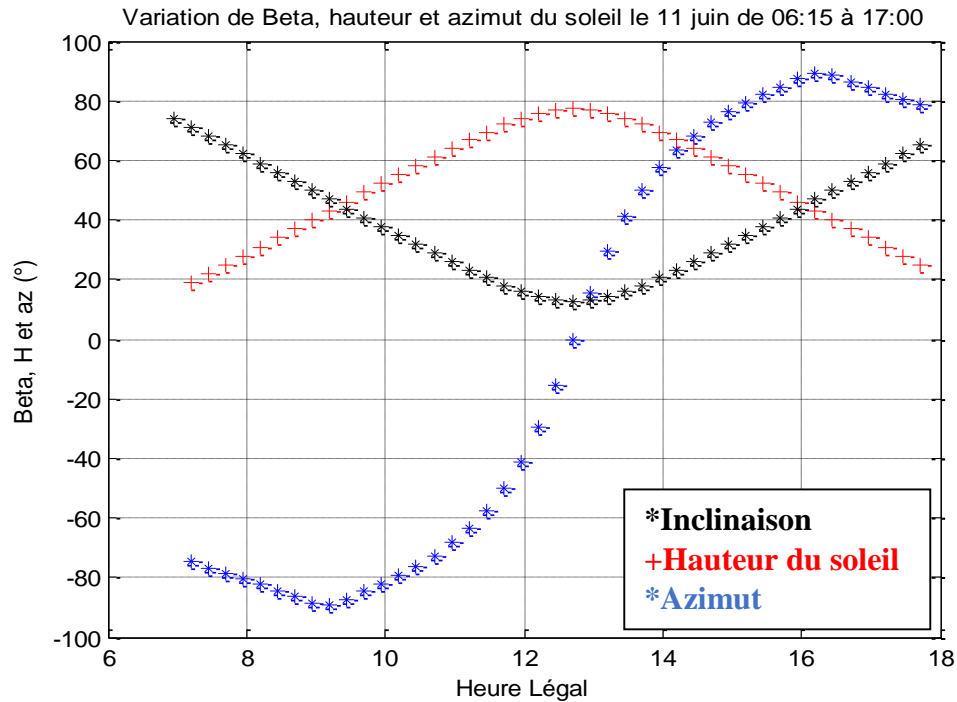
**Gain(03)** : La différence entre **H<sub>s</sub>** et **H (03°)** en % (le gain de suiveur par rapport à un système fixe et incliné d'un angle  $\beta = 03^\circ$  et  $\alpha = 0^\circ$ ).

On remarque que l'énergie reçu sur un plan monté sur suiveur solaire à deux axes est supérieur à celle qui reçoit sur un plan fixe et incliné d'un angle de  $33^\circ$  et  $03^\circ$  et orienté plein sud respectivement d'un gain de 54% et 12%.



**Figure III-7** : Variation de H (33°), H (03°) et H<sub>s</sub> au cours de la journée

Pour un suivi économique et envisageable, une poursuite de 06:15 du matin à 17:00 après-midi est très bénéfique, avec un pas de 20 mn, la figure (III-8) représente la variation de l'inclinaison du panneau, la hauteur et l'azimut du soleil au cours de la journée le 11 juin.



**Figure III-8** : Variation de l'inclinaison, la hauteur et l'azimut du soleil le 11 juin

### 3.5.5. Mois de septembre

- Angle d'inclinaison annuel :  $33^\circ$ .      - Angle d'inclinaison mensuel :  $34^\circ$ .
- Orientation :  $0^\circ$  (plein sud).      - Journée type : 15.

Heure	H ( $33^\circ$ )	H <sub>s</sub>	Gain (33)
06:30	78	258.75	232
07:30	268	568.75	112
08:30	484.5	741	53
09:30	674.75	831.75	23
10:30	812	875.5	8
11:30	883.5	892.5	1
12:30	883.5	892.5	1
13:30	812	875.5	8
14:30	674.75	831.75	23
15:30	484.5	741	53
16:30	268	568.75	112
17:30	78	258.75	232
Total	6403	8345	30

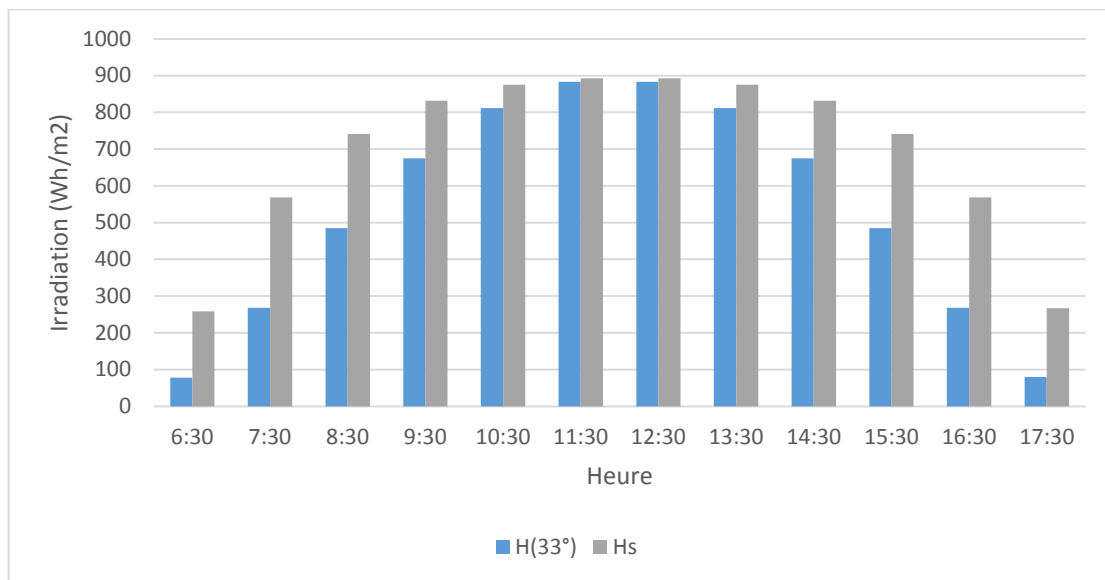
**Tableau III-5** : Irradiation journalière de mois de septembre [26]

**H (33°)** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan fixe en ( $\text{Wh/m}^2$ ), incliné d'un angle  $\beta = 33^\circ$  (inclinaison annuel) et l'orientation plein sud,  $\alpha = 0^\circ$ .

**H<sub>s</sub>** : Irradiation globale moyenne journalière sur un plan monté sur un suiveur solaire à deux axes en ( $\text{Wh/m}^2$ ).

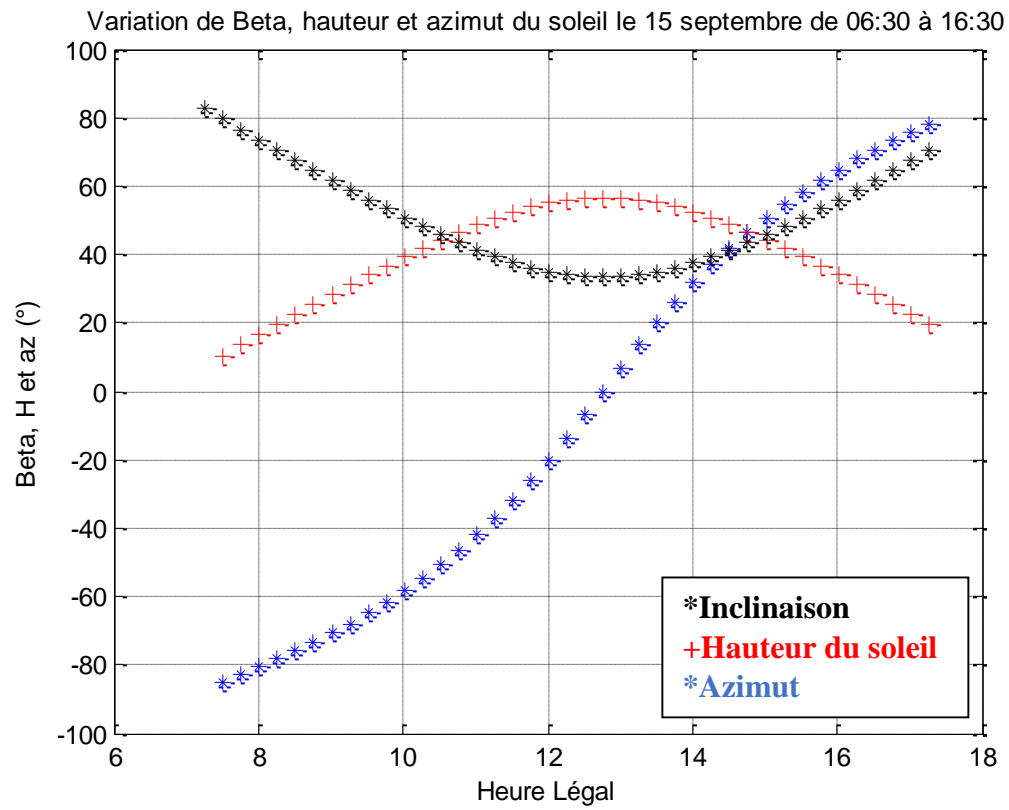
**Gain(33)** : La différence entre **H<sub>s</sub>** et **H (33°)** en % (le gain de suiveur par rapport à un système fixe et incliné d'un angle  $\beta = 33^\circ$  et  $\alpha = 0^\circ$ ).

Puisque l'inclinaison optimale mensuel est presque égale l'inclinaison optimale annuel, donc nous avons calculer seulement l'énergie reçu sur un plan fixe et incliné d'un angle de  $33^\circ$  et orienté plein sud, et sur un plan monté sur un suiveur solaire à deux axes, et on remarque que l'irradiation reçu sur cet dernier est supérieur à celle à celle qui reçoit sur un plan fixe et incliné d'un angle de  $33^\circ$  et orienté plein sud d'un gain de 30% .



**Figure III-9** : Variation de H (33°), et H<sub>s</sub> au cours de la journée

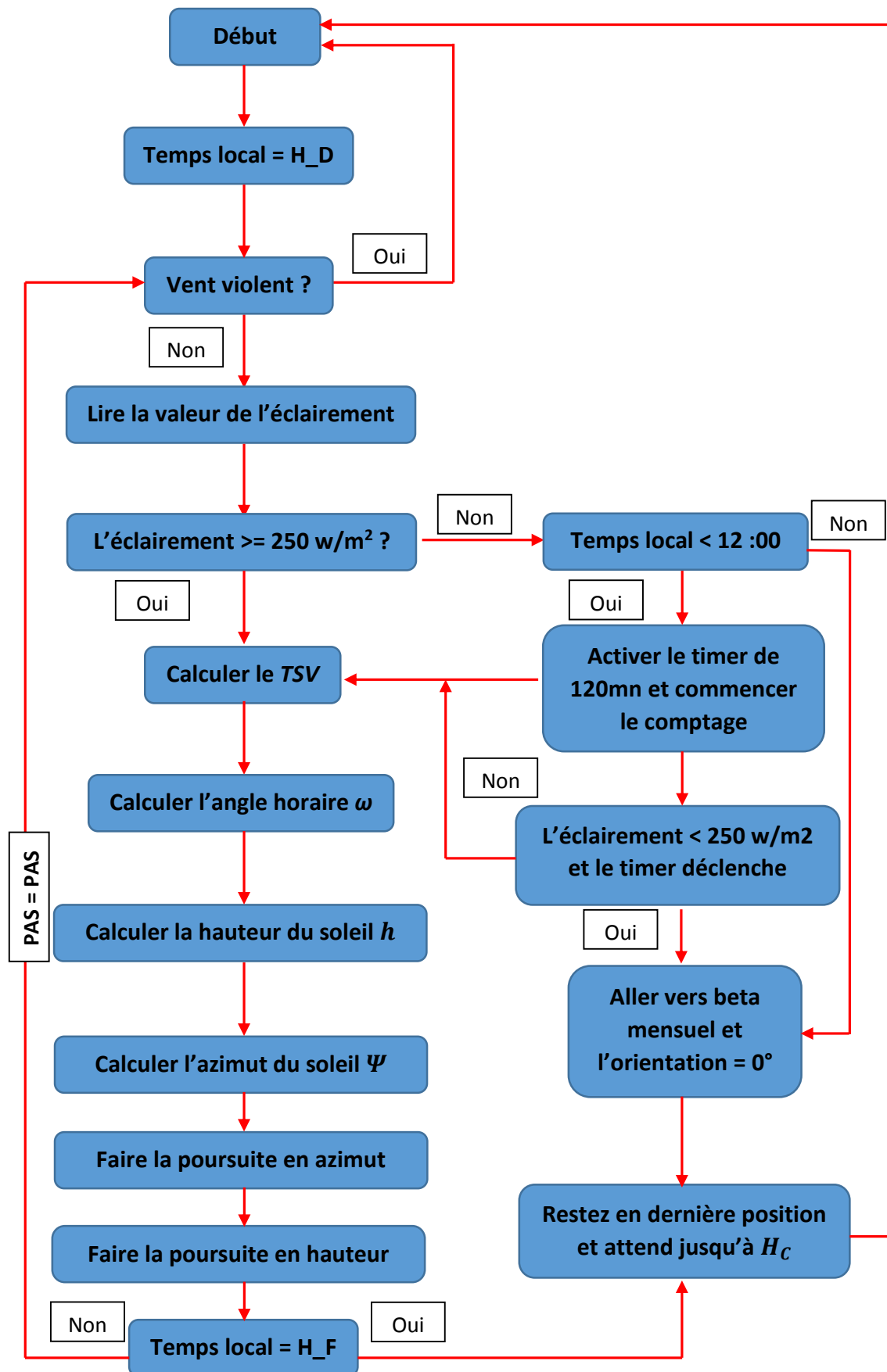
Pour un suivi économique et envisageable, une poursuite de 06:30 du matin à 16:30 après-midi est très bénéfique, avec un pas d'une demi-heure, la figure (III-10) représente la variation de l'inclinaison du panneau, la hauteur et l'azimut du soleil au cours de la journée le 15 septembre.



**Figure III-10 :** Variation de l'inclinaison, la hauteur et l'azimut du soleil le 15 septembre

### 3.6. Algorithme de poursuite proposé

- 1- Régler l'heure et la dates locales.
- 2- Déterminer le numéro de jour  $J$ .
- 3- Calculer la déclinaison du soleil  $\delta$  à partir d'équation II.2.
- 4- Calculer l'équation du temps  $ET$  à partir d'équation II.7.
- 5- Calculer l'angle de lever du soleil  $w_{sr}$  à partir d'équation II.12.
- 6- Calculer l'heure de lever du soleil  $H_L$  à partir d'équation II.13.
- 7- Calculer l'angle de coucher du soleil  $w_{ss}$  à partir d'équation II.14.
- 8- Calculer l'heure de coucher du soleil  $H_C$  à partir d'équation II.15.
- 9- Déterminer quel mois de l'année ?
- 10- Pour le mois de :
  - Janvier {H\_D = 08:00 ; PAS = 60mn ; H\_F = 15:00 ; beta mensuel =  $60^\circ$ }
  - Février {H\_D = 07:30 ; PAS = 45mn ; H\_F = 15:30 ; beta mensuel =  $52^\circ$ }
  - Mars {H\_D = 07:00 ; PAS = 30mn ; H\_F = 16:00 ; beta mensuel =  $39^\circ$ }
  - Avril {H\_D = 06:45 ; PAS = 20mn ; H\_F = 16:30 ; beta mensuel =  $24^\circ$ }
  - Mai {H\_D = 06:30 ; PAS = 30mn ; H\_F = 16:45 ; beta mensuel =  $11^\circ$ }
  - Juin {H\_D = 06:00 ; PAS = 20mn ; H\_F = 17:00 ; beta mensuel =  $03^\circ$ }
  - Juillet {H\_D = 06:15 ; PAS = 20mn ; H\_F = 17:00 ; beta mensuel =  $06^\circ$ }
  - Août {H\_D = 06:30 ; PAS = 20mn ; H\_F = 16:45 ; beta mensuel =  $18^\circ$ }
  - Septembre {H\_D = 06:45 ; PAS = 30mn ; H\_F = 16:30 ; beta mensuel =  $34^\circ$ }
  - Octobre {H\_D = 07:00 ; PAS = 30mn ; H\_F = 16:00 ; beta mensuel =  $48^\circ$ }
  - Novembre {H\_D = 07:30 ; PAS = 45mn ; H\_F = 15:30 ; beta mensuel =  $58^\circ$ }
  - Décembre {H\_D = 08:00 ; PAS = 60mn ; H\_F = 15:00 ; beta mensuel =  $63^\circ$ }



### 3.7. Conclusion

Le principe de la technique de commande utilisée ainsi que les irradiances journalières des mois de décembre, mars, juin et septembre ont été présentées dans ce chapitre.

À la fin, et en prenant en compte la vitesse du vent et l'intensité du rayonnement, nous avons pu d'établir un algorithme pour notre traqueur solaire, ce dernier sera programmé sur microcontrôleur pour gérer notre commande. L'objectif du chapitre suivant, est de présenter les différents composants de la carte de commande réalisée, plus les essais de suiveur.

# Chapitre

# 04

## RÉALISATION HARDWARE



## Chapitre 4. Réalisation hardware

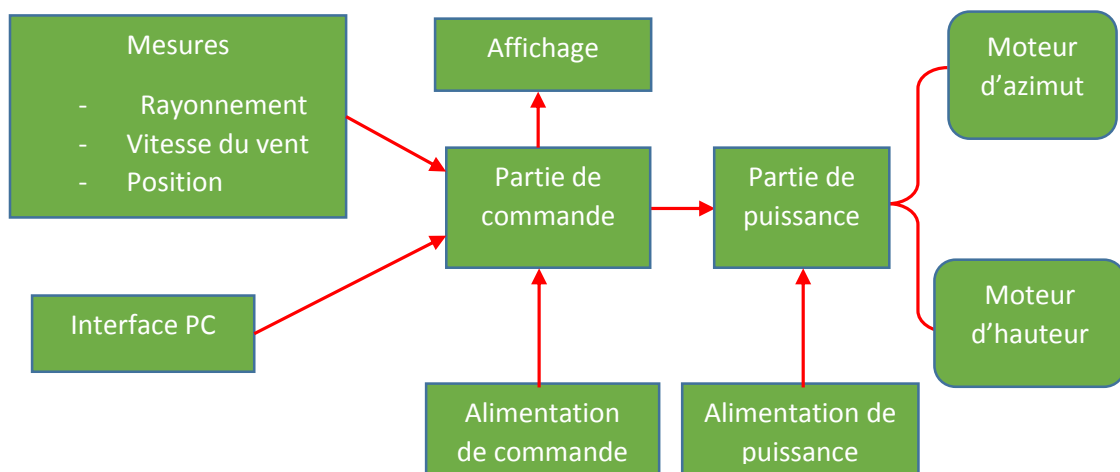
<b>4.1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.</b>	<b>Conception générale du système de poursuite .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.1.</b>	<b>Partie de mesures .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.1.1.</b>	<b>LDR .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.1.2.</b>	<b>Anémomètre.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.1.3.</b>	<b>Cellule PV calibrée .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>Interface PC .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2.3.</b>	<b>Partie de commande.....</b>	<b>58</b>
<b>4.2.4.</b>	<b>Liste des composants de la carte de commande.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.5.</b>	<b>Partie de puissance .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2.6.</b>	<b>Liste des composants de la carte de puissance.....</b>	<b>61</b>
<b>4.3.</b>	<b>Système d'acquisition de données .....</b>	<b>61</b>
<b>4.3.1.</b>	<b>Liste des composants de la carte d'acquisition de données .....</b>	<b>62</b>
<b>4.4.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>63</b>

## 4.1. Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter notre conception du système de poursuite que nous avons réalisé. Ce système est constitué de deux grandes parties une partie de puissance et une partie de commande. Cette partie présente le cerveau de notre système de poursuite, puisque une fois la commande est fiable elle sera valable à l'adapter à n'importe quelle partie de puissance. Pour cette dernière nous avons utilisés deux moteurs à courant continu commandés par des relais formants deux ponts en H.

## 4.2. Conception générale du système de poursuite

Le système de poursuite solaire que nous avons réalisée comporte les blocs suivants :



**Figure IV-1** : Schéma synoptique générale du système de poursuite

### 4.2.1. Partie de mesures

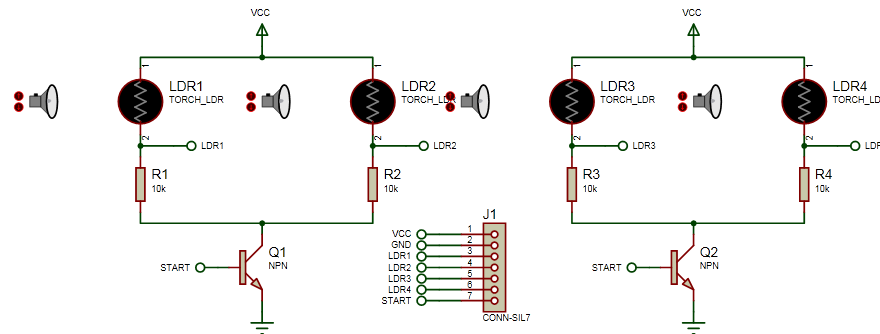
Cette partie est composé de :

- 4 capteurs LDR pour bien positionné le panneau face au soleil lors de la poursuite.
- Un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent.
- Une petite cellule PV calibrée de tel sort pour fonctionner comme un pyrhéliomètre.

#### 4.2.1.1. LDR

Un LDR est une photorésistance qui est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de la quantité de lumière incidente. On peut également la nommer résistance photo-dépendante, en anglais (Light-Dependent-Resistor) ou cellule photoconductrice. [27]

La carte LDR que nous avons schématisée est composée de 4 cellules LDR, chaque cellule est branchée en série avec une résistance pour mesurer la variation de la tension, et chaque deux cellule destinée pour un axe, et contrairement à la méthode d'asservissement où les capteurs LDR sont alimentés toujours et détectent en permanence la position du soleil, ici ils ont seulement alimentés lors de la période de la poursuite.



**Figure IV-2 : Schéma de la carte LDR réalisée**

#### 4.2.1.2. Anémomètre

Un anémomètre est un appareil servant à mesurer la vitesse d'écoulement d'un fluide gazeux, en particulier la vitesse du vent. [28]



**Figure IV-3 : Anémomètre**

#### 4.2.1.3. Cellule PV calibrée

Notre petite cellule est calibrée au niveau de Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) à Bouzaréah, Alger, elle a le rôle de mesurer l'intensité du rayonnement solaire direct et fonctionne comme un pyréliomètre.

Pour une cellule photovoltaïque le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est proportionnel à l'éclairement  $E$ .  $I_{cc} = K \cdot E$ . Connaissant  $K$  on pourra déterminer l'éclairement  $E$  correspondant à un courant de court-circuit.  $E = I_{cc}/K$ .

Pour notre système nous avons utilisé une cellule étalant qui délivre une tension voisinant 2V pour un éclairage de 1000W/m<sup>2</sup>.

#### 4.2.2. Interface PC

L'interface entre notre carte de commande et PC est assurée par le bus RS232 via la porte série (UART).

L'émetteur-récepteur asynchrone universel (UART) est un logiciel de bibliothèque utilisé pour le bus RS232 de la communication série entre deux appareils électroniques, seulement deux câbles (plus un câble de terre) sont nécessaires pour transférer des données dans les deux sens. Les données sont envoyés en format série bit par bit, normalement le dispositif de réception est en repos.

Pour l'émission la patte TX est au niveau logique 1, également connu sous le nom MARK, la transmission des données commence lorsque le niveau logique sur cette patte passe de 1 à 0, également connu sous le nom ESPACE. Le premier bit envoyé est le bit de départ à la logique 00. La suite de ce bit, 7 ou 8 bits de données sont envoyés, suivie par un bit de parité en option. Le dernier bit envoyé s'appelle bit d'arrêt est au niveau logique 1. Les données en série est généralement envoyé sous forme de 10 bits : un bit de départ, 8 bits de données, et un bit d'arrêt, et aucun bits de parité [29].

Les niveaux de tension spécifiés par le protocole RS232 sont  $\pm 12V$ . Un signal logique HIGH (haut) est à - 12V et un signal logique LOW (bas) est à + 12V. Les microcontrôleurs PIC, fonctionnent normalement à des niveaux de tension : 0 et 5 V. Donc les signaux pour RS232 doivent être convertis pour l'entrée d'un microcontrôleur. De même, la sortie du microcontrôleur doit être convertie en  $\pm 12V$  avant l'envoi au dispositif de réception RS232. La conversion de tension est généralement réalisée avec des circuits de conversion, comme le MAX232, fabriqué par Maxim Inc.

La figure IV.4 montre le brochage du circuit MAX232 avec la porte DB9 et PIC, noté que le fonctionnement correct du circuit MAX232 nécessite quatre condensateurs à être connecté au circuit.

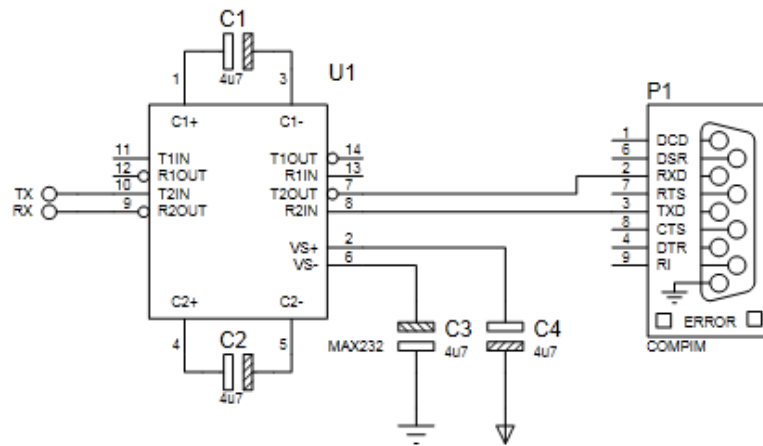


Figure IV-4 : Brochage du circuit MAX232

#### 4.2.3. Partie de commande

La partie de commande (Figure IV.5) est composée d'un PIC18F4550, une horloge temps réelle (RTC) représentée par le circuit intégré DS1307 et connecté avec le PIC via la porte I2C et le circuit intégré ULN2003, pour commander les relais la partie puissance.

Le PIC18F4550 est le cerveau qui gère tout le système, il est programmé suivant notre algorithme de poursuite pour commander le suiveur solaire, le rôle de la DS1307 est de générer l'heure et la date locaux et l'ULN2003 va commander les relais de l'étage de puissance.

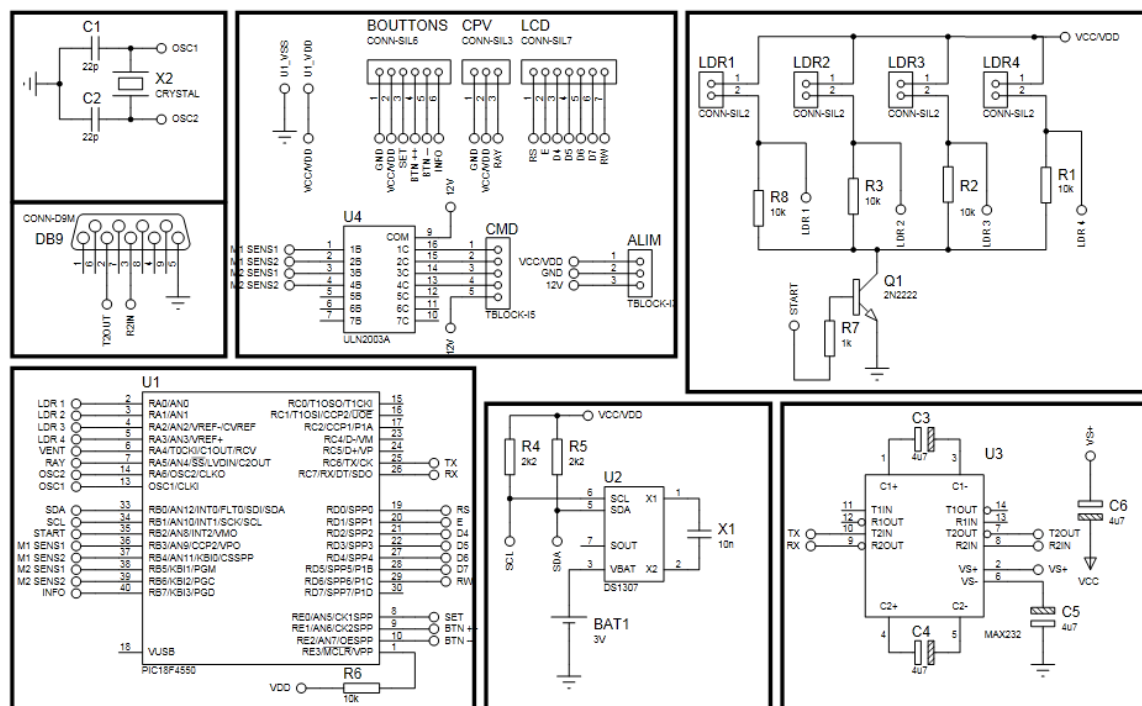


Figure IV-5 : Schéma de la carte de commande réalisée

#### 4.2.4. Liste des composants de la carte de commande

##### 1- Condensateurs

Quantité	Référence	Valeur
2	C1-C2	22pF
4	C3-C6	4u7

##### 2- Résistances

Quantité	Référence	Valeur
5	R1-R3-R6-R8	10k
2	R4-R5	2k2
1	R7	1k
4	LDR	1M (Dark)
1	RV1	1k

##### 3- Circuits intégré

Quantité	Référence	Valeur
1	U1	PIC18F4550
1	U2	DS1307
1	U3	MAX232
1	U4	ULN2003A

##### 4- Transistors

Quantité	Référence	Valeur
1	Q1	2N2222

##### 5- Afficheur

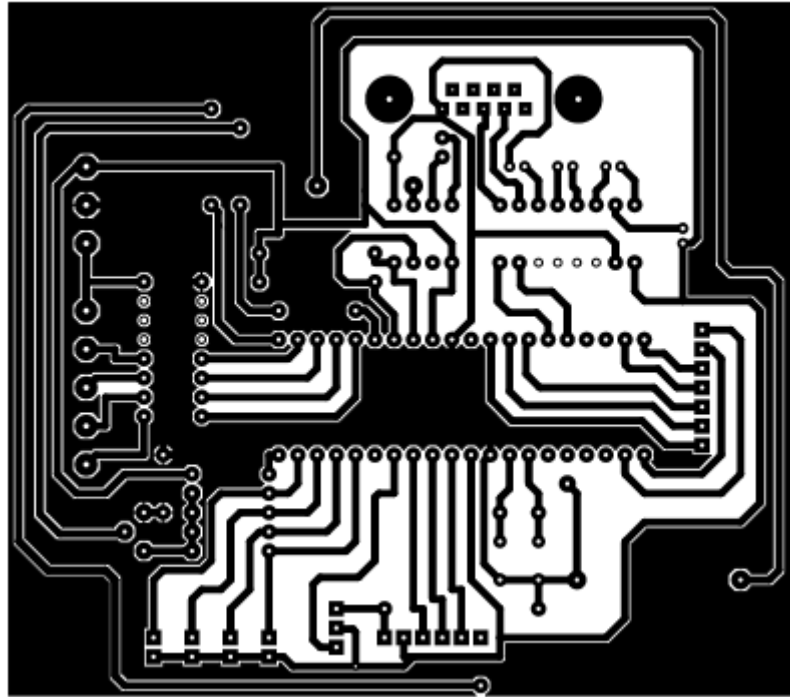
Quantité	Référence	Valeur
1	LCD 16x2	LM016L

##### 6- Quartz

Quantité	Référence	Valeur
1	X1	8 MHz
1	X2	32.768 KHz

7- 4 boutons poussoirs.

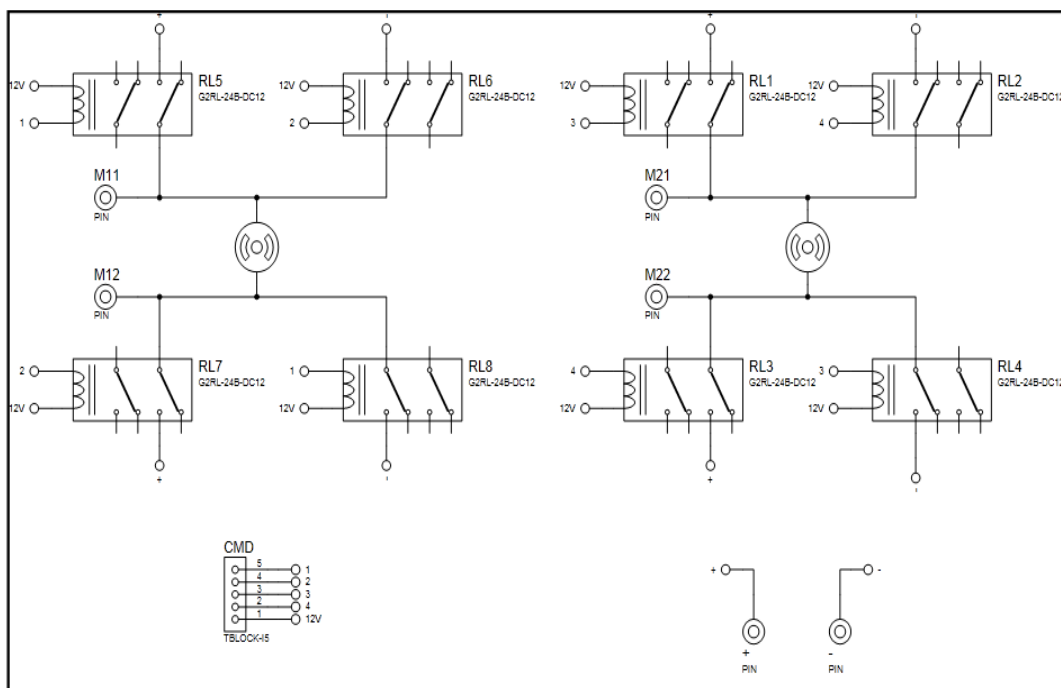
8- Une porte DB-9 femelle.



**Figure IV-6 :** Circuit imprimé de la carte de commande

#### 4.2.5. Partie de puissance

Comme nous avons deux moteurs, et chaque moteur va tourner dans deux sens, nous avons utilisé un pont H pour chacun des moteurs, et chaque pont est composé de quatre relais (figure IV.7) pour assurer l'isolation galvanique entre l'étage de puissance et l'étage de commande.

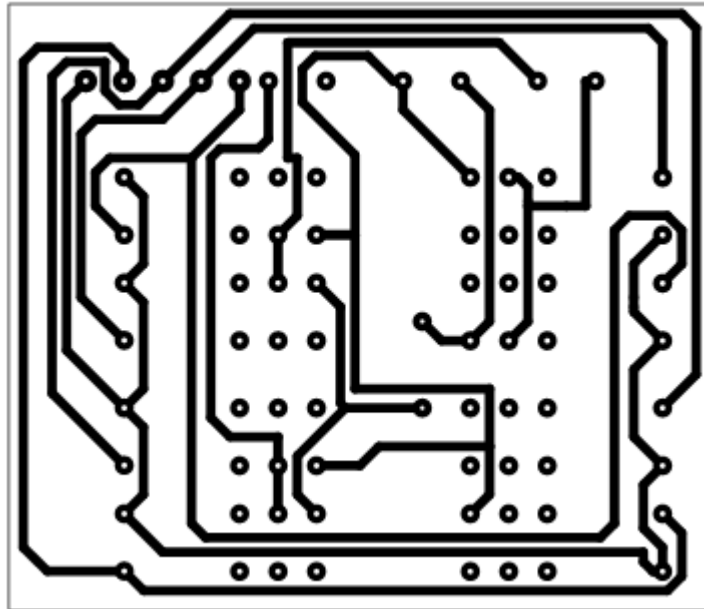


**Figure IV-7 :** Schéma de la carte de puissance réalisée

#### 4.2.6. Liste des composants de la carte de puissance

- Relais 12V

Quantité	Référence	Valeur
8	RL1-RL8	G2RL-24B-DC12



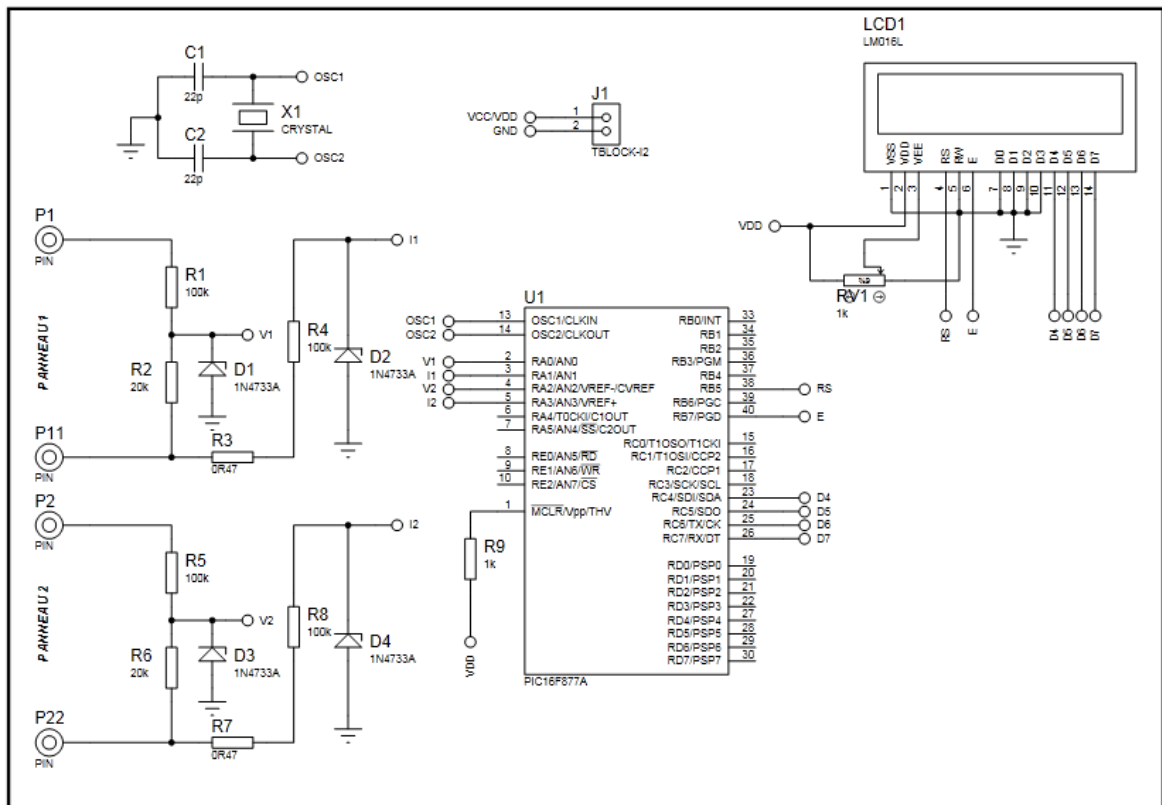
**Figure IV-8 :** Circuit imprimé de la carte de puissance

#### 4.3. Système d'acquisition de données

Pour connaître le gain énergétique d'utilisation d'un suiveur solaire, il faut comparer l'énergie produite par un système monté sur notre suiveur solaire et l'énergie produite par un système fixe et incliné d'un angle de  $33^\circ$  et orienté plein sud (comme référence). Le rôle du système d'acquisition de données est de faire cette comparaison.

Le système d'acquisition de données que nous avons réalisé est un compteur d'énergie simple, il a une entrée pour chaque panneau solaire, chaque une des entrées comporte deux bornes de connexion, la borne plus et la borne moins pour connecter directement le panneau solaire.





**Figure IV-9 : Schéma du système d'acquisition de données**

#### 4.3.1. Liste des composants de la carte d'acquisition de données

## 1- Condensateurs

Quantité	Référence	Valeur
2	C1-C2	22pF

## 2- Résistances

Quantité	Référence	Valeur
4	R1-R4-R5-R8	100k
2	R2-R6	20k
2	R3-R7	0R47
1	RV1	1k

### 3- Diodes

Quantité	Référence	Valeur
4	D1-D4	1N4733A (5.1V)

#### 4- Circuits intégrés

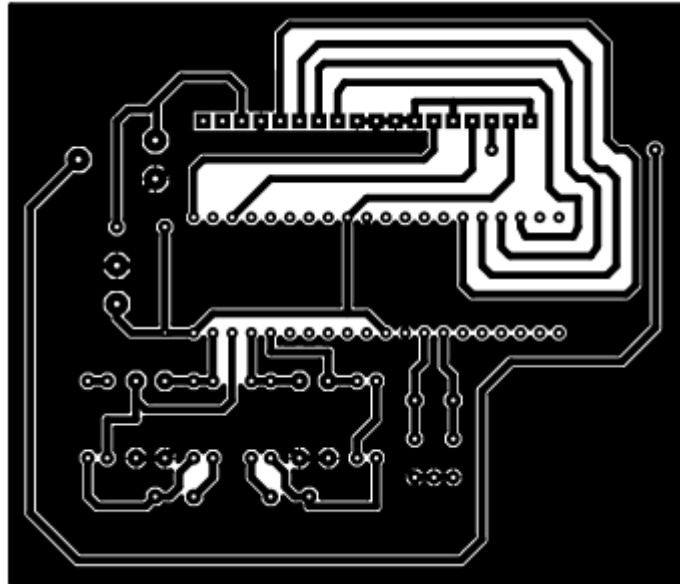
Quantité	Référence	Valeur
1	U1	PIC16F877A

## 5- Afficheur

Quantité	Référence	Valeur
1	LCD 16x2	LM016L

#### 6- Quartz

Quantité	Référence	Valeur
1	X1	8 MHz



**Figure IV-10** : Circuit imprimé de la carte d'acquisition de données

#### 4.4. Conclusion

L'objectif ciblé par ce chapitre est de réaliser les cartes électroniques du système de poursuite a été atteint, après cette réalisation de la carte de commande, la carte de puissance et la carte d'acquisition de données, il reste que la conception mécanique pour les essais expérimentales.

## *Conclusion générale*

Les travaux présentés dans ce mémoire ont porté une étude avec une réalisation d'un système de commande d'un suiveur de soleil pour un panneau photovoltaïque à l'aide des composants électroniques programmable, on utilisant un processeur très répandu dans l'industrie : un microcontrôleur de la famille PIC qui est le 18F4550.

Le but de ce projet réside au niveau de la mise en œuvre d'une solution technique permettant de transformer un panneau photovoltaïque fixe en un suiveur de soleil afin d'améliorer son rendement.

Pendant ce projet, nous avons essayé d'élaborer une commande hybride fiable et capable d'intégrer les deux célèbres méthodes (l'asservissement et la pré-programmation) pour dégager les inconvénients de chacune, tout en gagnant une meilleure précision de poursuite avec une consommation faible du système de contrôle. Le système de commande et les signaux de pilotage générer ont été en premier lieu simulé par le logiciel proteus design suite et MATLAB.

En deuxième lieu, notre projet a donné des bon résultats en simulation, les cartes de commande et de puissance ont été réalisées, il ne reste seulement la réalisation de la partie mécanique avec le système d'acquisition de données que nous l'avons proposé qui présentent l'un de nos perspective.

Cette étude peut trouver son application dans les systèmes PV connectés au réseau. Notre étude peut être développée et comme perspectives nous souhaitons seras amélioré par les prochains promos en tenant compte des points suivant :

- L'intégration d'un détecteur d'orage et de grêle.
- L'intégration d'un système d'auto nettoyage des panneaux solaires lors de la pluie.
- L'ajout d'un enregistreur de données pour former une base de données concernée par le rayonnement solaire.

Ce projet de fin d'études était pour nous l'occasion précieuse pour découvrir le monde des énergies renouvelables, qui fait partis de notre spécialité.

## **Références bibliographiques**

- [1] ANNE LABOURET, PASCAL CUMUNEL, JEAN-PAUL BRAUN, BENJAMIN FARAGGI, « Cellules solaires », Dunod, 5<sup>ème</sup> édition.
- [2] M.D. Draou et B.Draoui, « Etude, conception et expérimentation d'un système de contrôle pour système suiveur de soleil », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°2 (2007) 229 – 238.
- [3] R.Rezoug et A.Zaatri, « Optimisation du rendement d'un système photovoltaïque par poursuite du soleil », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12 N°2 (2009) 299 – 306.
- [4] T.Bendib, B.Barkat, F.Djeffal, N.Hamia et A.Nidhal, « Commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes à base d'un microcontrôleur PIC16F84A », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°4 (2008) 523 – 532.
- [5] Document in International Competition (1993/94) '*First Step to Nobel Prize in Physics*' and published in the competition proceedings (Acta Phys. Pol. A 88 Supplement, S-49 (1995)).
- [6] <http://www.devis-panneaux-photovoltaiques.fr/photovoltaique.html>
- [7] Zeghib Ilhem, mémoire magister, « Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire parabolique », université de Constantine, 2005.
- [8] Documents de l'observatoire de Paris, « Introduction à la mécanique céleste et élément de mécanique spatiale », Paris, 7 mars 2011.
- [9] Alain Vienne, « Eléments d'astronomie fondamentale », Université des Sciences et Techniques de Lille, LAL-IMCCE Laboratoire d'Astronomie de Lille de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides Lille 1 et Observatoire de Paris, UMR 8028 du CNRS, Janvier 2008.
- [10] LE PETIT LAROUSSE 2008.
- [11] Samira MOUHOUS-CHAOUCHI, mémoire magister, « Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné », Université ABOU BEKER BELKAID, Tlemcen, 2012.
- [12] RAHMANI Djelloul, mémoire magister, « Analyse d'un système de concentration solaire pour la production d'hydrogène (cas de l'Algérie) », Université HASSIBA BENBOUALI, Chlef, 2012.

- [13] Brochure, Dimensionnement et installation des systèmes Solaires PV pour l'éclairage domestique, Centre de Développement des Energies Renouvelables Royaume du Maroc Marrakech édition l'UNESCO et l'IEPF Marrakech 29 juillet 2000.
- [14] Daniel DESMETTRE et Florence MATTERA, Batteries à Usage Solaire, école d'été – juillet 99, GNEC/DER/SSAE/LVT, BT 315, C.N. Cadarache, 13108 Saint-Paul-lez-Durance CEDEX.
- [15] Brochure, Manuel d'installation, d'entretien et de maintenance des systèmes solaires photovoltaïques pour l'éclairage domestique et le pompage d'eau, édition l'UNESCO et l'IEPF Marrakech 29 juillet 2000.
- [16] Bernard EQUER « Energie solaire photovoltaïque », volume 1, publié par Ellipses Editions Marketing et l'UNESCO 1993.
- [17] S.Martinuzzi . UNESCO 1999 La filière Silicium Cristallin Faculté des Sciences et techniques de Marseille –St.Jérôme.
- [18] Christian VERIE Laboratoire de physique du solide et énergie solaire (LPSES) Sophia Antipolis, 06560 Valbonne. Extrait de la revue < l'Onde Electrique> Vol.72, No : 6.
- [19] <http://www.devis-panneaux-photovoltaïques.fr/photovoltaïque.html>
- [20] EL Ayam-2 / 16 Juillet 2011.
- [21] Université Paris-Sud Orsay – Master 2<sup>ème</sup> année – Energies Renouvelables – Energie Solaire Thermique, Vincent Bourdin 2014.
- [22] Rachid CHENNI, thèse de doctorat, « ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE DANS UN VILLAGE SOLAIRE », Université de Mentouri de Constantine, Constantine, 24/02/2015.
- [23] Lalia MILOUDI, mémoire de magister, « ETUDE ET SIMULATION DE LA POURSUITE DE LA TRAJECTOIRE DU SOLEIL PAR UN PANNEAU SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE », Université de M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2011.
- [24] <https://ec.europa.eu/jrc/>
- [25] Huld T., Müller R. and Gambardella A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. Solar Energy, 86, 1803-1815.
- [26] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa>
- [27] Georges Asch, Les capteurs en instrumentation industrielle 4<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris, 1991.
- [28] <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/an%C3%A9mom%C3%A8tre/3413>
- [29] V. *TOURCHINE* Programmation en mikroC. Application pour les microcontrôleurs de la famille PIC.