

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI de TIZI- OUZOU.

Faculté de Génie Electrique et Informatique
Département Electronique



Mémoire

De fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme Master Professionnel
Option :Electronique Industriel

Thème

Commande d'un panneau solaire a l'aide d'une carte arduino

Présenté par :
M^r GRIM Samir
M^r AICHE Mokrane

Soutenu publiquement le 27 septembre 2018, devant le jury :

Présidente : **M^{me} K. LAGHA**
Promotrice : **M^{me} O. BOUGHIAS**
Examineurs : **M^r R. ZIRMI**

M.C.A
M.A.A
M.C.B

UMMTO
UMMTO
UMMTO

Promotion 2017/2018

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier dieu le tout puissant miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En seconde lieu, nous tenons à remercier notre encadreuse Mme BOUGHIAS, pour ses conseils et son aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également à tous les enseignant de notre département, exceptionnellement aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions et leurs conseils.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce travail a mes chers parents,
pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur
tendresse, leur soutien et leurs prières tout au
long de mes études.*

*A mes chères sœurs pour leurs encouragements
permanents et leur soutien moral,*

*A mes chers frères pour leur appui et leur
encouragement,*

*A tout ma famille pour leur soutien tout au long
de mon parcours universitaire,*

Merci d'être toujours la pour moi.

Mokrane

Dédicaces

*Je dédie ce travail a mes chers parents,
pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur
tendresse, leur soutien et leurs prières tout au
long de mes études.*

*A mes chères sœurs pour leurs encouragements
permanents et leur soutien moral,*

*A tout ma famille pour leur soutien tout au long
de mon parcours universitaire,*

Merci d'être toujours là pour moi.

Samir

Sommaire

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Introduction générale	01
Chapitre 1 : généralités sur le système photovoltaïque	
1.1) Introduction	02
1.2) Photovoltaïque.....	02
1.3 Système photovoltaïque	02
1.3.1) Différentes parties d'un système photovoltaïque	03
1.3.2) Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque	04
1.4) Générateur photovoltaïque	04
1.4.1) Principe	04
1.4.2) Cellule photovoltaïque	04
1.4.2.1) Structure d'une cellule photovoltaïque	04
1.4.2.2) Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	04
1.4.2.3) Les différentes types d'une cellule	06
1.4.2.4) Modélisation d'une cellule photovoltaïque	07
1.4.3) Caractéristiques électrique de générateur photovoltaïque	09
1.5) Influence de la température et de rayonnement	12
1.5.1) Influence de la température	12
1.5.2) Influence du rayonnement sur les cellules	14
1.6) Module photovoltaïque	16
1.6.1) Composition d'un module solaire photovoltaïque	16

Sommaire

1.6.2) Caractéristiques d'un module solaire PV	17
1.6.3) Module et regroupement de cellule en série	17
1.6.4) Module et regroupement de cellule en parallèle	18
1.7) Champs photovoltaïque	19
1.8) Intérêt panneaux solaire photovoltaïques mobiles	19
1.9) Conclusion	20

Chapitre 2 : Gisement solaire et rayonnement solaire

2.1) Introduction	21
2.2) Gisement solaire	21
2.3) Le spectre solaire	21
2.4) Rayonnement solaire.....	23
2.4.1) Les composantes de rayonnement solaire	24
2.4.2) Dualité de la lumière	25
2.4.3) Constituants de rayonnement solaire	25
2.5) Sphère célestes	26
2.6) Coordonnées célestes	27
2.6.1) Coordonnées géographiques	27
• L'attitude φ	27
• Longitude λ	27
2.6.2) Les coordonnées horaires	27
• Déclinaison du soleil δ	27
• L'angle horaire du soleil ω	28
2.6.3) Les coordonnées horizontales	28
• Hauteur angulaire du soleil h	28
• Azimut a	28

Sommaire

2.6.4) Le temps	29
• Le temps solaire vrai(TSV)	29
• Le temps solaire moyen (TSM)	29
• Le temps universel (TU)	29
• Le temps légal ou local (TL)	30
• L'équation du temps (ET)	30
2.7) Diagramme stéréographique	31
2.7.1) Construction des chemins solaires	32
2.7.2) Construction des courbes horaires	33
2.8) Comment trouver la position du soleil dans le ciel	34
2.8.1) Présentation de site	34
2.8.2) Création d'un point d'observation	34
2.8.3) Les résultats donnés par le site web	35
2.9) Conclusion	39
Chapitre 3 : présentation des différents composant du système	
3.1) Introduction.....	40
3.2) Schéma synoptique.....	40
3.3) Etude des différents blocs	40
3.1) Le bloc commande	40
3.3.1.1) Partie matériel	41
3.3.1.1.a) Carte arduino UNO.....	41
• Description de la carte ARDUINO UNO.....	41
• Constituant d'une carte arduino	42
• Caractéristiques techniques	45
3.3.1.1.b) Shield SD	46
3.3.1.1.c) Le module RTC DS 1302	46

Sommaire

• Description	46
• Caractéristiques.....	46
• Spécifications.....	47
• Autre application.....	47
• Circuit de démarrage rapide.....	47
• Définitions des broches (interface à 4 fils)	48
3.3.1.2) Partie programme	48
3.3.1.2.a) L'environnement de la programmation.....	49
3.3.1.2.b) Structure générale du programme (IDE Arduino).....	49
3.3.1.2.c) Injection du programme.....	50
3.3.1.2.d) Les étapes de téléchargement du programme.....	50
3.3.2) Le Bloc puissance	51
3.3.2.1) servomoteur.....	51
• Définition	51
• Constitution d'un servomoteur.....	51
• Fonction d'usage.....	52
• Principe de fonctionnement	52
3.4) Conclusion.....	53
Chapitre 4 : réalisation du système	
4.1 Introduction	54
4.2 Partie programmation	54
4.2.1 L'organigramme	54
4.2.2 Programmation	55
4.3 Partie électrique	56
4.4 Partie mécanique	57
4.5 Description de la structure	57

Sommaire

4.6 Orientation de l'axe horizontal (élévation) et l'axe vertical (l'azimute)	58
4.7 Conclusion	58
Conclusion générale	59

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau (2.1) : information supplémentaires Un tableau d'information supplémentaires peut aussi être consulté.	37
Tableau (2.2) montre l'élévation et l'azimut en fonction de temps.	38
Tableau (3.1) définition des broches (interface a 4 fils)	48

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.2 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque.....	03
Figure 1.3 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	04
Figure 1.4 comportement des porteurs	05
Figure 1.5 les niveaux d'énergies	05
Figure 1.6 : Modèle de la cellule photovoltaïque idéal.....	07
Figure 1.7 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel.....	08
Figure 1.8 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	09
Figure (1.9) : caractéristique $I=f(v)$	12
Figure (1.10) : caractéristique $P=f(v)$	12
Figure 1.11: Effet de la température sur la caractéristique I-V.....	13
Figure 1.12: Effet de la température sur la caractéristique P-V.....	14
Figure 1.13 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V.....	15
Figure 1.14: Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V.....	15
Figure 1.15 : Module photovoltaïque.....	16
Figure 1.16 : Composition d'un module solaire photovoltaïque.....	16
Figure 1.17 :.....	17
Figure 1.18: Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.....	18
Figure 1.19 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle.....	19

Chapitre 2

Figure 2.1 : Eclairement solaire.....	21
Figure 2.2: Schéma indiquant le nombre d'air masse AM_x en fonction de la position géographique.....	23
Figure 2.3 : Rayonnement solaire transmis à la terre.....	23
Figure 2.4: composantes du rayonnement solaire.....	24
Figure 2.5 : spectre électromagnétique.....	26
Figure 2.6 : sphère Céleste.....	26
Figure 2.7 : coordonnées géographiques.....	27
Figure 2.8 angle horaire de soleil.....	28

Liste des figures

Figure 2.9 coordonnées horizontale.....	29
Fig.2.10 Variations annuelles de l'équation du temps.....	30
Figure 2.11 Lecture de l'azimut et de l'altitude angulaire, pour le 31 août à 14h, $\alpha = 222^\circ$, $\gamma = 42^\circ$	32
Figure 2.12 Construction des chemins solaires.	33
Figure 2.13 Construction des courbes horaires.....	34
Figure 2.14 image satellite montre la trajectoire de soleil.....	35
Figure 2.15 la trajectoire dans un cercle en degré.....	36
Figure 2.16 L'élévation du soleil pendant la journée.....	37
Chapitre 3	
Figure (3.1) : Schéma synoptique.	40
Figure (3.2) : carte arduino.....	41
Figure (3.3) : microcontrôleur ATmega 328.....	42
Figure (3.4) : constitution de la carte arduino.....	45
Figure (3.5) Connexion à un BASIC Stamp 2.....	47
Figure (3.6) Connexion à un microcontrôleur avec une interface SPI à 4 fils.....	48
Figure (3.7) : Interface IDE Arduino.....	49
Figure (3.8) injection de programme.....	50
Figure (3.9) : Les étapes de téléchargement du code.....	51
Figure (3.10) Servomoteur.....	52
Figure (3.11) : conversion d'énergie.....	52
Figure (3.12) illustration de signal de contrôle.....	53
Chapitre 4	
Figure (4.1) Organigramme principale.....	54
Figure (4.2) interface du logiciel Arduino.....	55
Figure (4.3) montage électrique.....	56
Figure (4.4) les servomoteurs.....	56
Figure (4.5) structure de suiveur solaire	57
Figure (4.6) le suiveur solaire.....	58

Nomenclature

Nomenclature

E_g : énergie de gap

N : électrons

P : trous

ZCE : zone de charge d'espace

R_c : résistance de charge

I_s : le courant de saturation

I_{ph} : le courant de court-circuit généré par la lumière

I_d(v) : courant d'obscurité de la diode

V_d : La différence de potentielle

I₀: Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d: la tension au borne de diode

V_t = $\frac{kT}{q}$ Potentielle thermique

RP : résistance parallèle

I : Le courant fourni par la cellule

I₀: Le courant de saturation de la diode.

k: constante de Boltzmann (1,381 .10⁻²³ joule/Kelvin).

q: charge d'électron =1,602 .10⁻¹⁹ C.

n: Le facteur de qualité de diode.

T: La température de cellule en kelvin.

GPV : le générateur photovoltaïque

M : le courant de court-circuit **I_{cc}**

A : la puissance maximale

S : la tension de circuit ouvert **V_{oc}**

Nomenclature

η : le rendement de conversion

P_m : la puissance maximale.

E : l'éclairement en **W/m²**

S : est la surface de ce module

I_m : courant maximal

V_m : tension maximal

P_p : La puissance du panneau constitué des cellules parallèles

I_{cc} : Le courant de court-circuit

V_{oc} : la tension du circuit ouvert

P_s : La puissance du panneau constitué des cellules série

P_{ps} : La puissance du panneau constitué des cellules série et parallèle

I_m : le courant maximum.

V_m : la tension maximale.

N_s : le nombre des cellules associé en série.

N_p : le nombre des cellules associé en parallèle

V_{coN_s} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccN_s} : courant de court circuit de N_s cellules en série.

I_{ccN_p} : la somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle

V_{coN_p} : tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

Chapitre 2

AM0 : Hors atmosphère (application spatiale). $P \approx 1.36 \text{KW.m}^{-2}$

AM1 : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).

AM1.5G : Spectre standard, le soleil est à 45° . $P \approx 1 \text{KW.m}^{-2}$

h : constante de planck (j.s^{-1})

Nomenclature

c : vitesse de la lumière dans le vide ($m.s^{-1}$)

ν : fréquence (s^{-1})

λ : longueur d'onde (m)

n : le numéro du jour de l'année

ω : l'angle horaire

φ : L'attitude

δ : Déclinaison du soleil

TSV : temps solaire vrai.

TSM : temps solaire moyen

TU : temps Universal

TL : temps local

C : le décalage entre TL et TU

ET : équation de temps

PWM : pulse width modulation

VCC : Supply Voltage

GND : Ground

MISO : Master In, Slave Out

MOSI : Master out, Slave In

SCK : Serial Clock

CS : Chip Select

DSH : direction sens horaire

DSAH : direction sens anti horaire

INTRODUCTION GENERALE

Comme nous le savons, la plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Les études et les prévisions récentes, nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement total de ces réserves. En plus, tout le monde est convaincu du danger de ce processus sur l'environnement. [1]. [2]

Les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, éolienne et hydraulique, représentent une solution de remplacement par excellence et elles sont de plus en plus utilisées de nos jours. L'énergie alternative qui peut accomplir la demande mondiale jusqu'à maintenant c'est l'énergie solaire. Elle apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre dans un jour est dix fois plus grande que celle consommée.

Les premières applications des suiveurs solaires remontent vers les années 1750 où le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat. La rotation du miroir de l'héliostat est assurée par un mécanisme d'horlogerie dont la plus ancienne mention du système se trouve dans des publications datant de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacob 's Gravesande [5].

La quantité de l'énergie reçu par un photovoltaïque fixe est variable par rapport à la position de soleil.

Dans ce contexte, notre motivation dans ce travail développé en chapitres est de construire un instrument permet d'optimiser l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques dans le but de maximiser la quantité d'éclairement absorbé par les panneaux photovoltaïques en suivant le mouvement du soleil pendant la journée.

Afin d'aboutir au but, on a organisé notre mémoire de la manière suivante :

- Le premier chapitre dans lequel on va parler sur les généralités sur le photovoltaïque.
- Le second chapitre sur le gisement solaire et le rayonnement solaire.
- Le troisième chapitre nous avons parler sur le matériel utiliser pour la réalisation de notre système.
- Le dernier chapitre est consacré pour la réalisation de notre système.

1.1) Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière de soleil en électricité au sein d'un matériau semi-conducteur comme le Silicium, ce matériau photosensible a la propriété de libérer des électrons sous l'influence d'une énergie externe. Cette énergie apportée par les photons arrache les électrons en introduisant un courant électrique : c'est l'effet photovoltaïque. Dans ce chapitre nous allons commencer par un bref rappel sur l'énergie photovoltaïque, Nous présentons ensuite la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque en décrivons les modèles mathématiques utilisés. Aussi, nous allons voir l'influence de la température et de l'éclairement sur le rendement photovoltaïque.

1.2) L'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons par un semi-conducteur qui génère des paires électrons-trou (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique.

1.3) Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué de trois principales parties. La première partie est consacré à la production d'une énergie électrique, la seconde partie c'est le contrôle d'énergie et oriente cette énergie selon le besoin et la troisième partie c'est l'alimentation des différents récepteurs.

- **Production d'énergie :** la partie production d'énergie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules, qui réalisent la conversion d'énergie solaire en électricité. Un panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W) avec une tension continue de moins de 1V. Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou un panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque.
- **Contrôle d'énergie :** la partie contrôle d'énergie est composée d'un système de stockage avec ou sans régulation, plus les câbles de connexions.

- **La partie utilisation :** La partie utilisation se compose de plusieurs récepteur (exemple : éclairage, pompage...etc.)

1.3.1) Différents blocs d'un système photovoltaïque :

Un module photovoltaïque ne peut pas alimenter seul régulièrement une application. Ceci revient à plusieurs conditions :

- Variation de la quantité de l'éclairement reçue par le module.
- L'énergie électrique fournit par le module photovoltaïque est continue alors qu'il y'a des applications qui nécessitent une énergie alternative.
- Stockage et transformation de cette énergie en alternative pour alimenter certaines applications à l'aide d'un onduleur et d'une batterie.

On appelle un "système photovoltaïque" l'ensemble des composants nécessaire pour alimenter une application en toute fiabilité. La figure 1.2 présente un schéma simplifié des différents blocs qui constitue un système photovoltaïque [6].

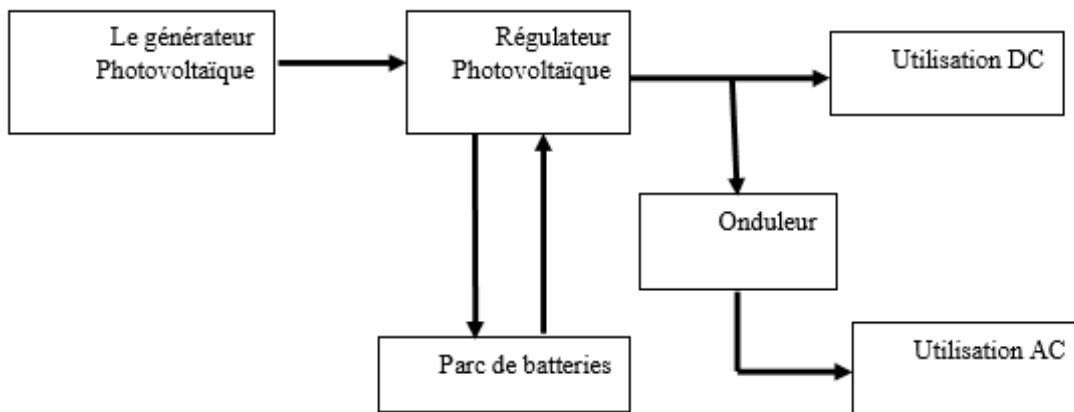


Figure 1.2 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué d'un :

- **Panneau photovoltaïque :** un panneau PV est formé de plusieurs cellules photovoltaïques qui convertissent l'énergie solaire en une énergie électrique (DC).
- **Régulateur photovoltaïque :** le régulateur de la charge protège le système et diminue les couts du cycle de vie de batterie. Il régularise l'énergie provenant du panneau jusqu'elle et

totalemment chargé et coupe l'énergie de la batterie lorsqu'elle est en dessus du niveau de sécurité.

- **Onduleur** : l'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue en tension alternative qui est contrôlée de façon très précise. La source de tension continue peut être soit un aérogénérateur ou bien des panneaux solaires.
- **Batterie** : la batterie PV, emmagasine l'énergie générée par les panneaux. C'est la composante la plus problématique du système PV localisé hors réseau.

1.3.2) Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque : l'énergie électrique produite dans le panneau solaire sera transféré vers le régulateur qui optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et qui assure sa protection. L'énergie arrivé à l'onduleur est transformée du continue vers alternative pour alimenter les récepteurs AC.

1.4) Générateur photovoltaïque

1.4.1) Principe : le générateur photovoltaïque GPV est composé d'un ou de plusieurs modules photovoltaïques. Ces modules sont formés d'un assemblage série/parallèle de cellules photovoltaïques [7].

1.4.2) Cellule photovoltaïque :

1.4.2.1) Structure d'une cellule photovoltaïque : la cellule photovoltaïque est une photodiode optimisée pour produire un flux de courant d'électrons en réponse à une irradiation par une lumière utilisant l'effet photovoltaïque. La jonction par laquelle la lumière pénètre dans le semi-conducteur doit être suffisamment mince pour passer la plupart de la lumière sur la région active (région d'appauvrissement) où la lumière est convertie en paires électrons/ trous [7]. La figure 1.3 montre un schéma électrique d'une cellule solaire.

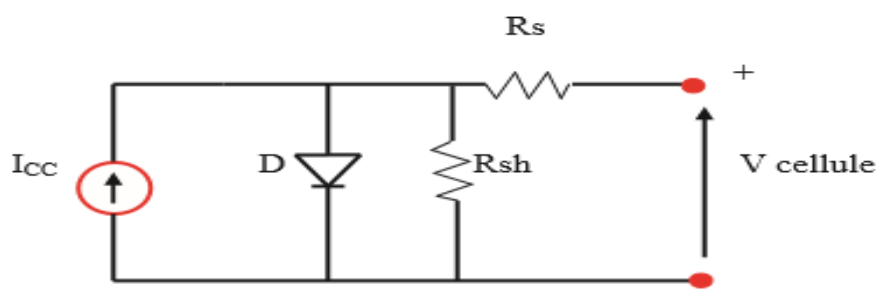


Figure 1.3 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

1.4.2.2) Principe de fonctionnement d'une cellule solaire : trois phénomènes physiques de base traduisent le fonctionnement d'une cellule solaire :

a. L'Absorption des photons : les photons dont l'énergie est supérieure ou égale au gap ($h\nu \geq E_g$) sont absorbés par le semiconducteur.

b. La Création de paires électrons/trous : les photons incidents créent des paires électrons-trous dans chacune des régions N, P et ZCE. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création (Figure 1.4) :

- **Dans les régions neutres P et N** : Les photo-porteurs minoritaires coté P passent vers le coté N à l'aide d'un champ électrique crée à l'intérieure de la ZCE et deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent une photo-courant de diffusion.

- **Dans la zone de charge d'espace ZCE** : Les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique ; l'électron est propulsé vers la région N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération.

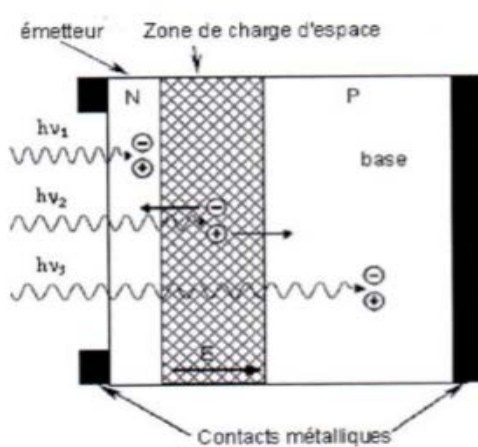


Figure 1.4 comportement des porteurs

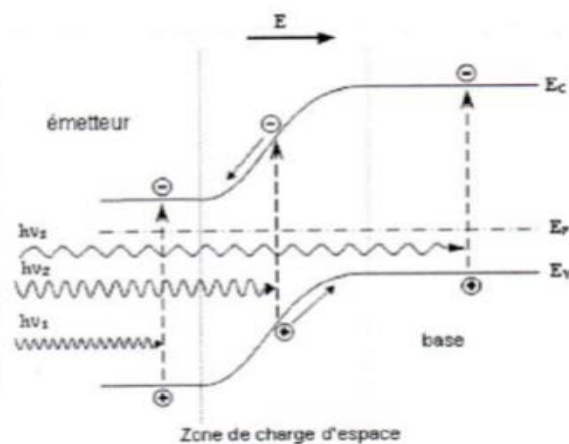


Figure 1.5 les niveaux d'énergies

c- La Collecte : sans perte des porteurs créés et séparés par le champ électrique interne du dispositif (cellule à homojonction ou à hétérojonction) sont récoltés par des électrodes dans un circuit électrique extérieur à travers une charge R_c . Un courant I la parcourt et une différence de potentiel apparaît :

$$I = I_{ph} - I_d(v) \quad (1.1)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qv}{kT}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

I_s : le courant de saturation

I_{ph} : le courant de court-circuit généré par la lumière

$I_d(v)$: courant d'obscurité de la diode

La différence de potentiel de contact constitue une barrière d'énergie donnée par :

$$V_d = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2} \quad (1.3)$$

En absence d'une polarisation externe, il existe un champ électrique interne qui s'oppose au mouvement des porteurs majoritaires et qui accélère les minoritaires. Il existe au niveau de la jonction une barrière de potentiel dont la hauteur est la différence entre les niveaux d'énergie des accepteurs et des donneurs (Figure 1.5).

1.4.2.3) Les différents types de panneaux :

a. Les panneaux PV avec des cellules monocristallines : les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont des photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (substrat de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction p-n dépôt de Couche anti reflet, pose des collecteurs), le wafer devient une cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.

b- Les panneaux PV avec des cellules poly-cristallines : les panneaux PV avec des cellules poly cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu

de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Poly-cristalline.

c- Les modules photovoltaïques amorphes : Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, Mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grande surface à bas coût en utilisant peu de matière première.

1.4.2.4) Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

a- Cellule photovoltaïque idéal : Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en Parallèle avec une diode figure (1.6) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

Après la loi de nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.4)$$

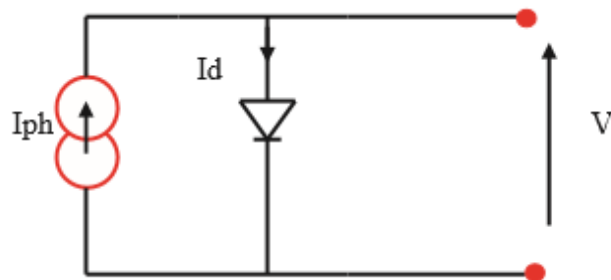


Figure 1.6 : Modèle de la cellule photovoltaïque idéal

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (1.5)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{v_d}{v_t}} - 1 \right) \quad (1.6)$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : la tension au borne de diode

$V_t = \frac{KT}{q}$ Potentielle thermique

Donc la relation (1.4) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{v_d}{v_t}} - 1 \right) \quad (1.7)$$

b- cellule photovoltaïque réel

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p .

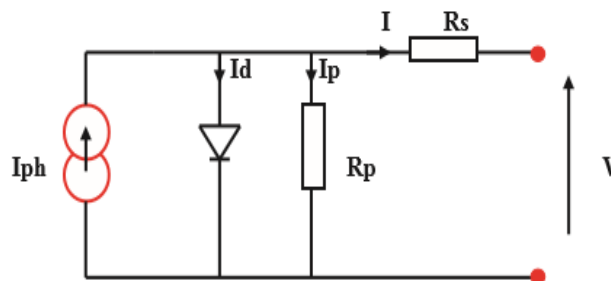


Figure 1.7 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel

Donc on a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.8)$$

$$I_p = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (1.9)$$

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V + R_s \cdot I}{v}} - 1 \right) \quad (1.10)$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule

$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{G}{1000}\right)$: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

k : constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ joule/Kelvin). $e^x = n k q T I$

q : charge d'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

n : Le facteur de qualité de diode.

T : La température de cellule en kelvin.

Donc (1.8) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+I.R_s}{V_t}} - 1 \right) - \left(\frac{V+R_s.I}{R_p} \right) \quad (1.11)$$

1.4.3) Caractéristiques électrique de générateur photovoltaïque :

a- Caractéristique courant – tension :

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure (1.8), décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions standard (niveau d'éclairement $1000W/m^2$ et température ambiante $25^\circ C$) [8].

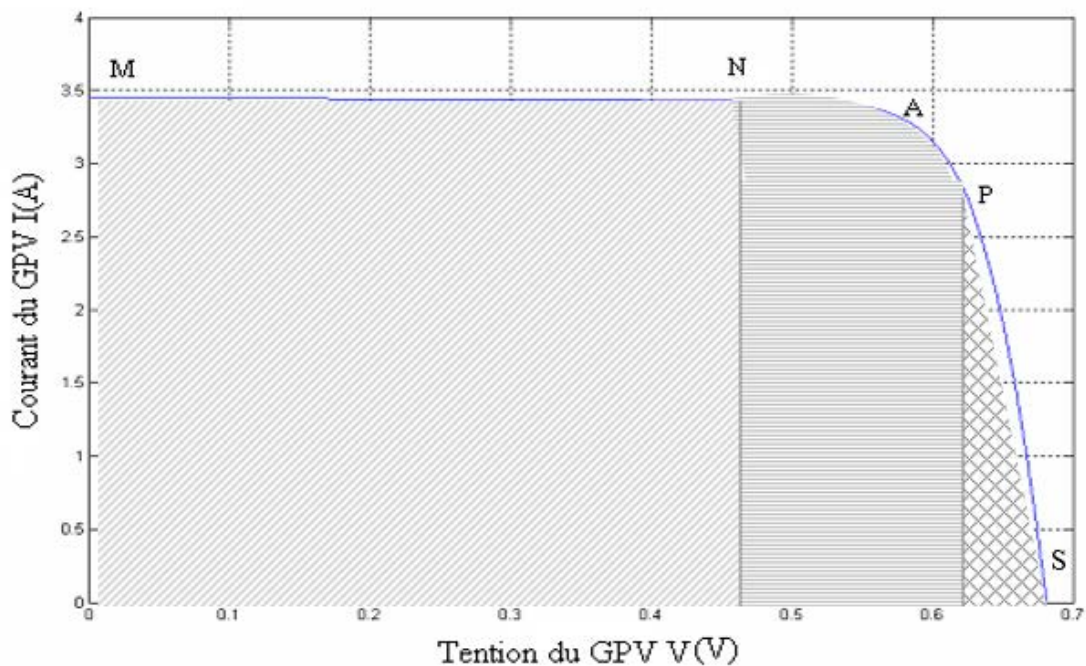


Figure 1.8 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

GPV : le générateur photovoltaïque

M : le courant de court-circuit **I_{cc}**

A : la puissance maximale

S : la tension de circuit ouvert **V_{oc}**

La courbe caractéristique d'une cellule PV (figure 1.8) représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit, point M (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert, point S, (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

La courbe de la cellule solaire **I=f(V)** passe par trois points essentiels qui sont (figure 1.8) :

Le courant de court-circuit **I_{cc}** en **M** ;

La tension de circuit ouvert **V_{oc}** en **S** ;

La puissance maximale en **A** ;

En effet, la caractéristique de la cellule solaire I(V), se divise en trois parties [9] :

- La zone (**MN**) se distingue par le courant qui reste constant, quelle que soit la tension. Dans cette zone, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (**PS**) se distingue par une variation du courant correspondant à une tension presque constante, et c'est dans cette région, que le générateur est assimilable à un générateur de tension.
- La zone (**NP**) correspond au coude de la caractéristique. C'est la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, et elle représente la région préférée pour le fonctionnement (le point optimal peut être déterminé).

Cette caractéristique **I = f (V)** se met sous la forme mathématique à partir des équations (1.8), (1.9) et (1.10) précédentes comme suit [10] :

$$\mathbf{I} = I_{ph} - I_s \left[\left(e^{q \frac{V+R_s \cdot I}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V+R_s \cdot I}{R_p} \right] \quad (1.12)$$

Le courant de court-circuit I_{cc} de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ($V=0$) :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\left(e^{q \frac{R_s I}{A * K * T}} \right) - 1 \right] - \frac{R_s I}{R_p} \quad (1.13)$$

A un niveau d'éclairement standard (1 kW/m^2), l'effet de la résistance série est négligeable (point M de la figure (1.8)). Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant I_{ph} , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement .

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (1.14)$$

Tension de circuit ouvert

Dans le cas du circuit ouvert (point S de la figure (1.6)), la tension du circuit ouvert peut être exprimée analytiquement selon la formule suivante :

$$V_{oc} = \frac{A * K * T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_s}{I_s} \right) \quad (1.15)$$

b- Le rendement de conversion :

η définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et la puissance incidente [10] :

$$\eta = \frac{P_m}{E.S}$$

Avec :

$P_m = I_m.V_m$, est la puissance maximale.

E : l'éclairement en W/m^2

S : est la surface de ce module

I_m : courant maximal

V_m : tension maximal

c- La puissance délivrée par une cellule photovoltaïque:

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur c'est celle qui génère de l'énergie, donc ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court-circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension, donc la puissance maximale génère par la cellule [11].

$$P_m = I_m \times V_m$$

- La puissance du panneau constitué des cellules parallèles :

$$P_p = N_p \times I \times V$$

- La puissance du panneau constitué des cellules série :

$$P_s = N_s \times I \times V$$

- La puissance du panneau constitué des cellules série et parallèle :

$$P_{ps} = N_p \times I \times V \times N_s$$

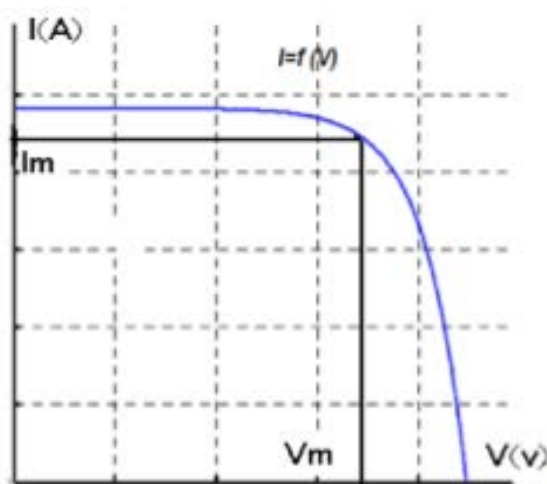


Figure (1.9) : caractéristique I=f(v).

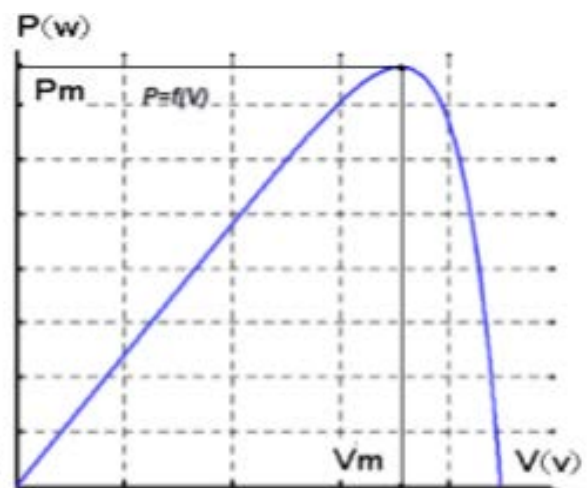


Figure (1.10) : caractéristique P=f(v)

Avec :

P_m : la puissance maximale.

I_m : le courant maximum.

V_m : la tension maximale.

N_s : le nombre des cellules associé en série.

N_p : le nombre des cellules associé en parallèle

1.5) Influence de la température et de rayonnement :

1.5.1) Influence de la température : comme nous l'avons expliqué précédemment, la base des cellules photovoltaïques est une jonction PN. Ceci nous laisse envisager que son rendement variera selon la température de la jonction. En effet, l'équation de Boltzmann donne :

$$I_{sc} = I_0 \cdot \exp - \left(\frac{e V_{oc}}{KT} \right)$$

La figure (1.11) ci-dessous montre que la tension à vide d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. L'ordre de grandeur des pertes est de 2.3 mV / par degré Celsius / par cellule. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule (environ 0.05 % par degré Celsius). La figure ci-dessous montre clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule.

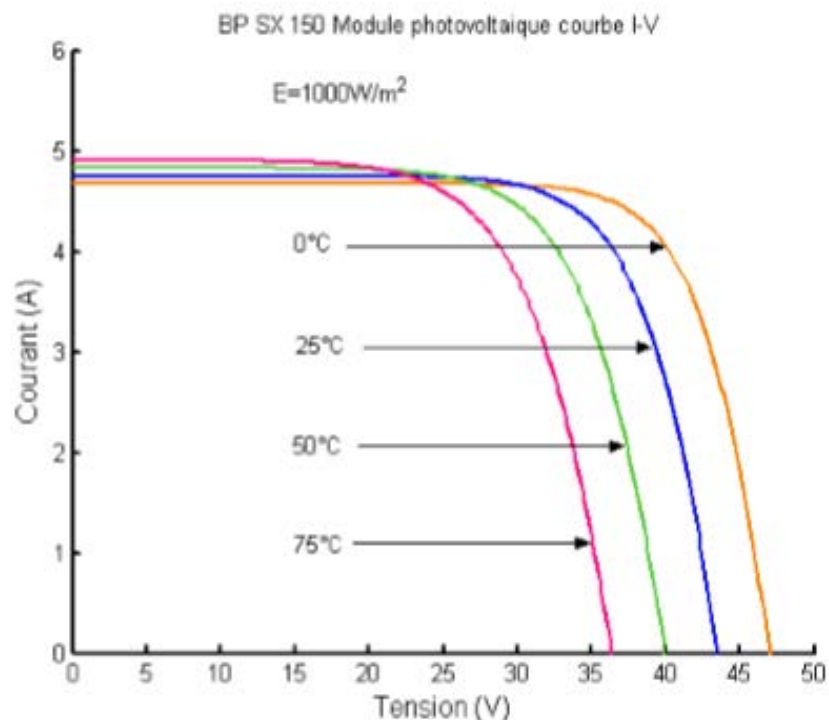


Figure 1.11: Effet de la température sur la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque

On peut remarquer sur la figure (1.12) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible (de l'ordre de $(5 \cdot 10^{-5} \text{ w/K})$ par cm^2 de la cellule).

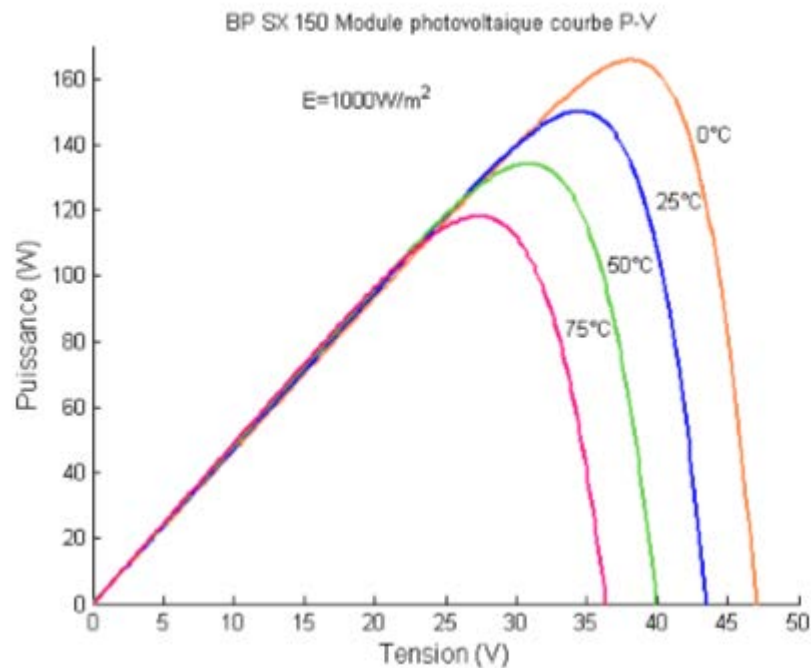


Figure 1.12: Effet de la température sur la caractéristique P-V d'un module photovoltaïque

1.5.2) Influence du rayonnement sur les cellules :

De la même manière que la température, la jonction PN réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit d'énergie plus elle en restitue, mais toujours avec un coefficient de rendement très faible de l'ordre de 15%. La variation des caractéristiques est représentée sur les courbes de la figure 1.13. Pour différents niveaux d'irradiation, le changement du courant optimal est très important. Ceci confirme l'approximation faite classiquement sur le courant optimal délivré par un générateur PV qui est globalement proportionnel au niveau d'irradiation. Nous pouvons le voir aussi sur la figure 1.14. Selon les conditions météorologiques, nous obtenons différentes courbes avec différentes puissances maximales au cours d'une même journée. Nous remarquons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert à une chute du flux lumineux. En examinant les caractéristiques réelles obtenues, nous pouvons conclure que des fortes variations du niveau d'irradiation provoquent des variations relativement importantes du courant optimal. Alors que, les variations relatives de la tension optimale restent faibles.

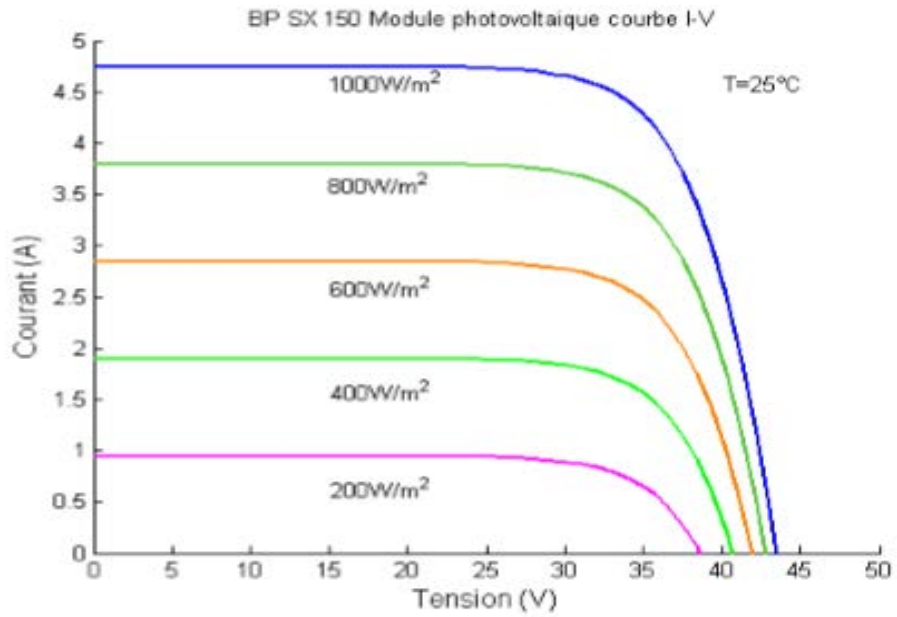


Figure 1.13 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque

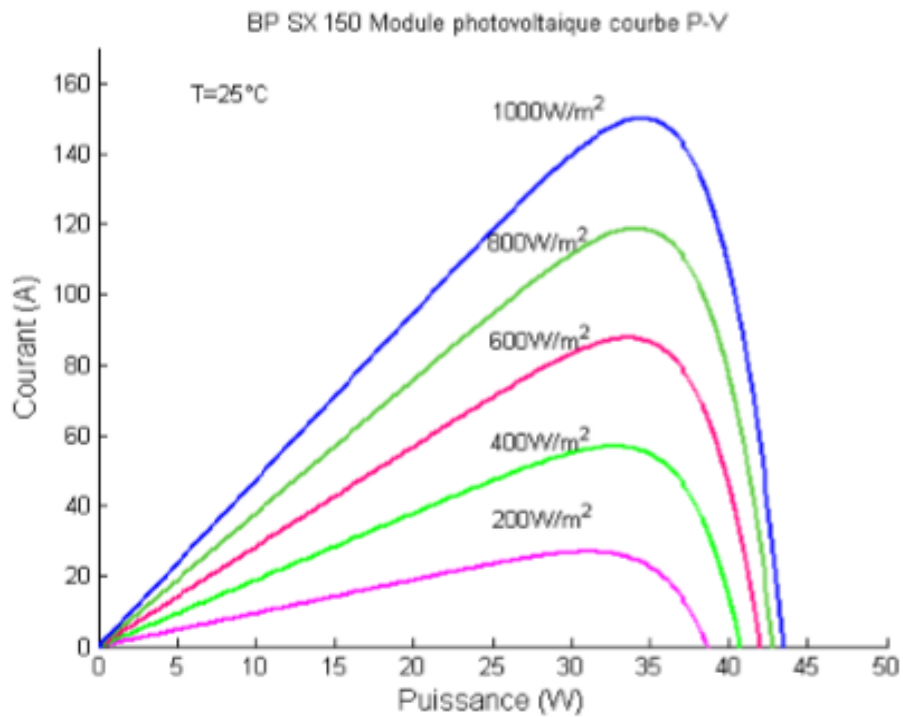


Figure 1.14: Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V d'un module photovoltaïque

1.6) Module photovoltaïque : le module PV est constitué par plusieurs cellule PV, sois en série, sois en parallèle pour délivré plus de puissance.

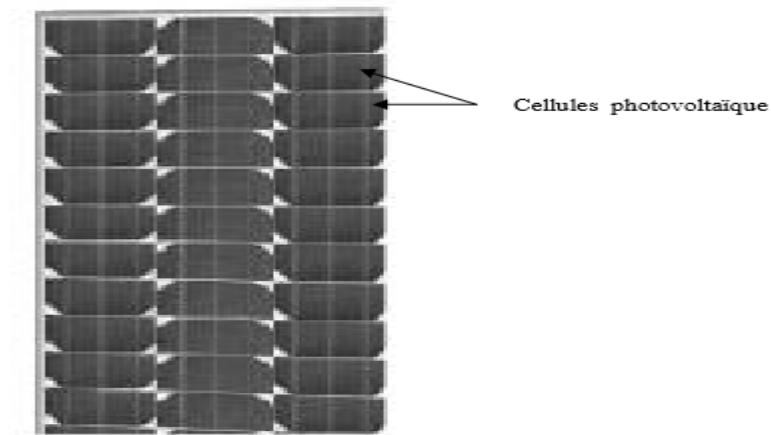


Figure 1.15 : Module photovoltaïque

1.6.1) Composition d'un module solaire photovoltaïque : un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments (figure 1.16)

- Cadre en aluminium.
- Joint pour fixer le module.
- Verre : pour la protection du module.
- Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité.
- Cellules photovoltaïque.
- Feuille de Tedlar blanc : pour plus de résistance mécanique des grands modules.

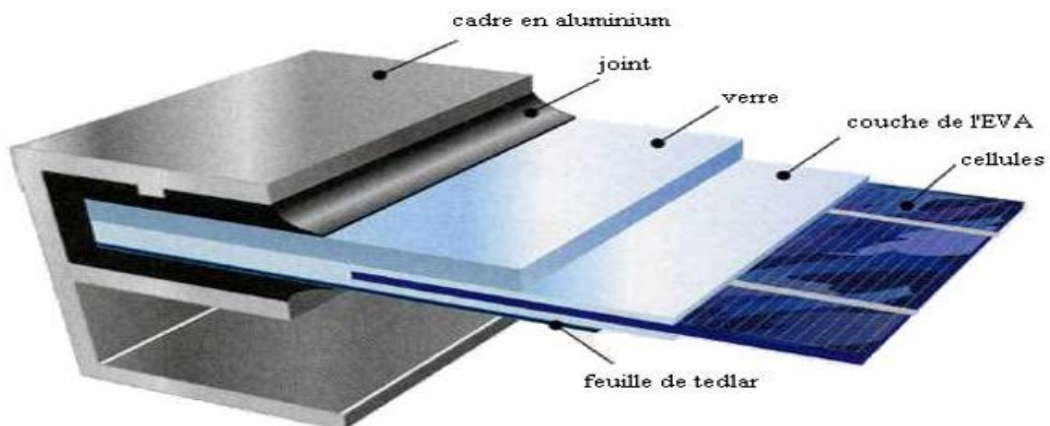


Figure 1.16 : Composition d'un module solaire photovoltaïque

1.6.2) Caractéristiques d'un module solaire PV :

- Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal : **MPP** (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

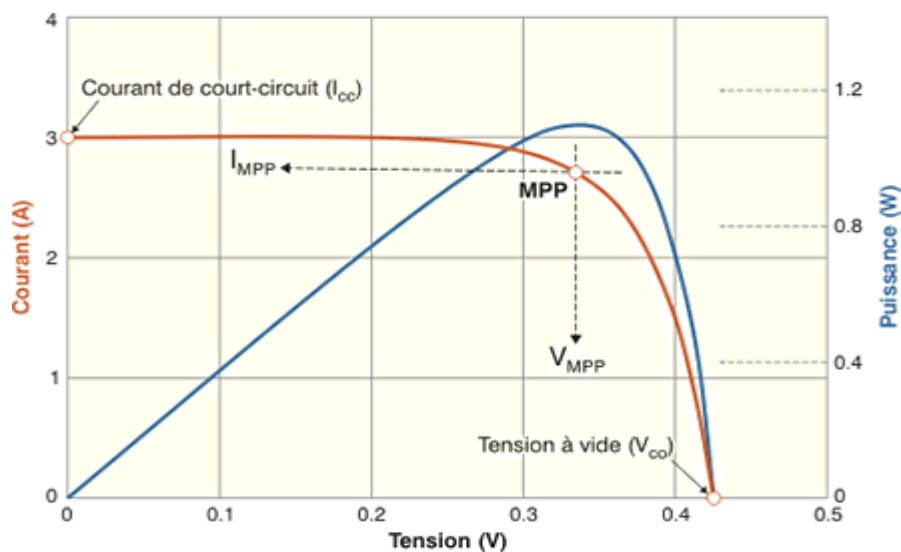


Figure 1.17 caractéristiques courant tension d'une cellule photovoltaïque I-V

Remarque : Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de $1\ 000\ \text{W/m}^2$, température de $25\ ^\circ\text{C}$, **conditions spectrales Air Mass 1.5** (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de $41,8^\circ$ par rapport à l'horizontale). Actuellement, les cellules présentent des valeurs de l'ordre de $0,5\ \text{V}$ - $3,5\ \text{A}$ - $2,1\ \text{Wc}$.

1.6.3) Module et regroupement de cellule en série :

Une association de (N_s) cellule en série figure (1.18) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant

du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (N_s) cellules.

$$V_{coN_s} = N_s \times V_{co}$$

$$I_{cc} = I_c$$

V_{coN_s} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccN_s} : courant de court-circuit de N_s cellules en série.

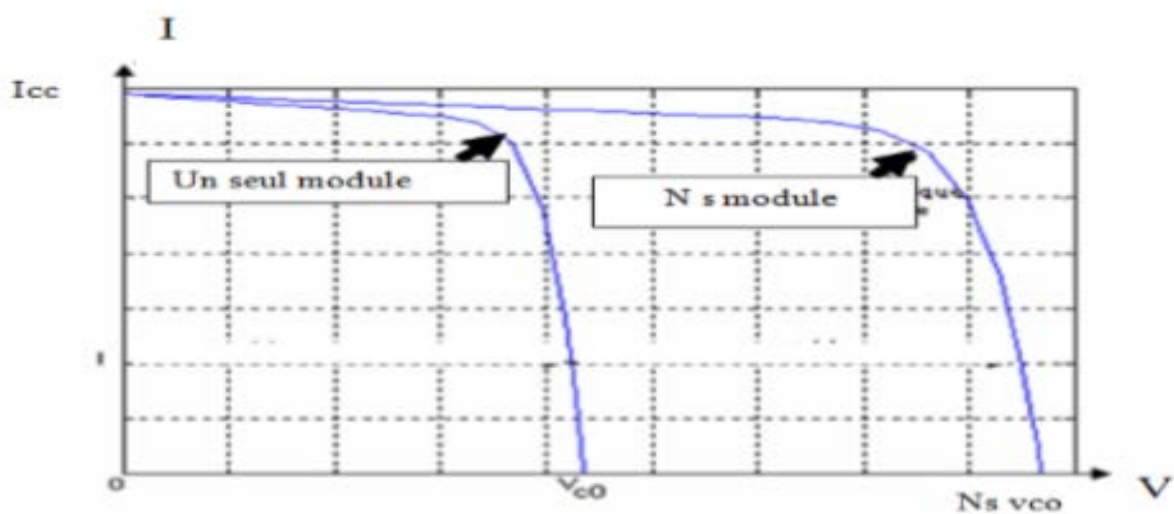


Figure 1.18: Caractéristique courant tension de N_s cellule en série

1.6.4) Module et regroupement de cellule en parallèle :

Une association parallèle de (N_p) cellule figure (1.19) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

Avec :

$$I_{ccN_p} = N_p \times I_{sc}$$

$$V_{co} = V_{co} N_p$$

$I_{cc}N_p$: la somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle

$V_{co}N_p$: tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

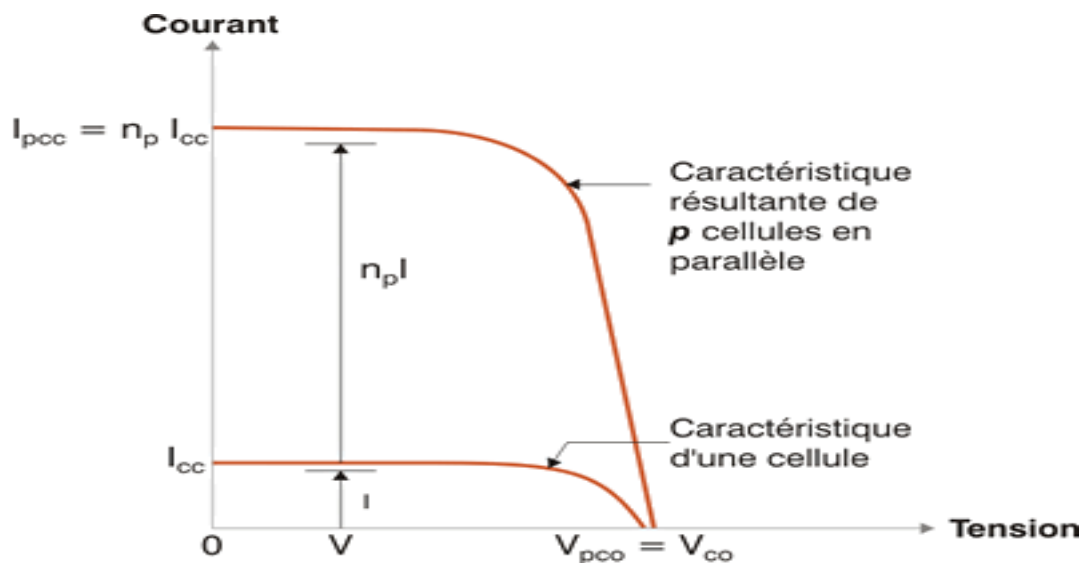


Figure 1.19 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle

1.7) Champs photovoltaïque :

Le champ photovoltaïque est constitué de l'ensemble des panneaux photovoltaïques, des liaisons électriques qui les régissent ainsi que des supports sur lesquels ils sont installés. Lorsque l'on parle de champ photovoltaïque on parle de l'installation complète des panneaux sur le toit ou au sol .

On utilise également parfois le terme « d'unité de production ».

Il existe de nombreux types de champs photovoltaïques. On trouve plusieurs manières de mettre en relation les panneaux, autrement dit les moyens de créer ces fameuses liaisons entre eux. Ces liaisons sont électriques elles sont donc classiquement comme dans toute installation en électricité, en parallèle, en série-t-on encore sous une configuration utilisant les deux. Les interactions entre les panneaux dépendent souvent du lieu et des contraintes du terrain où l'on souhaite installer le champ.

1.8) Intérêt panneaux solaire photovoltaïques mobiles :

- Orientation optimale en permanence sur plus de 240° d'Est en Ouest.
- le suiveur solaire suit la course du soleil.
- Les panneaux solaires sont très bien ventilés.

- Plus de production pour moins de surface de panneaux solaires ce qui fait des suiveur solaire une solution bien plus écologique...

1.9) Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons expliqué c'est quoi un système photovoltaïque et les éléments qu'il le constituent, et on a bien définie c'est quoi une cellule solaire et les différentes liaisons de ces cellule (en série parallèle).cette liaison construite un module photovoltaïque, et nous avons parlé des différents caractéristiques d'un générateur photovoltaïque, ainsi nous avons montré bien L'influence de la température et l'éclairement sur le rendement de la cellule, et on constate que la puissance ne dépende pas seulement de la température mais dépende aussi de l'éclairement.

2.1) Introduction :

On appelle gisement solaire l'ensemble des caractéristiques de la ressource locale en énergie solaire. Le gisement solaire est fluctuant et instantané, il est renouvelable, mais ce qui n'a pas été utilisé ne le sera plus. Pour dimensionner un système énergétique solaire il faut définir le profil des fluctuations du rayonnement solaire, en intensité et en quantité, à partir d'une étude statistique sur plusieurs années. Le volume des données solaires instantanées peut être ensuite réduit afin de rendre la simulation du fonctionnement du système compatible avec les moyens informatiques [13].

2.2) Gisement solaire :

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire pour l'étude des systèmes photovoltaïques.

2.3) Le spectre solaire :

Le spectre du rayonnement électromagnétique solaire comporte une très grande étendue, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X. On distingue en général le spectre continu, qui est sensiblement celui d'un corps noir à environ 6000°K et le spectre réel d'émission du soleil [14]. La figure 2.1 présente la courbe d'énergie du corps noir à 6000K, le rayonnement solaire hors de l'atmosphère et le rayonnement solaire au niveau de la mer en fonction de la longueur d'onde. Ces courbes montrent que 9,2% de l'énergie de ce spectre se trouve dans l'ultraviolet, 42,4% dans le visible et 48,4% dans l'infrarouge.

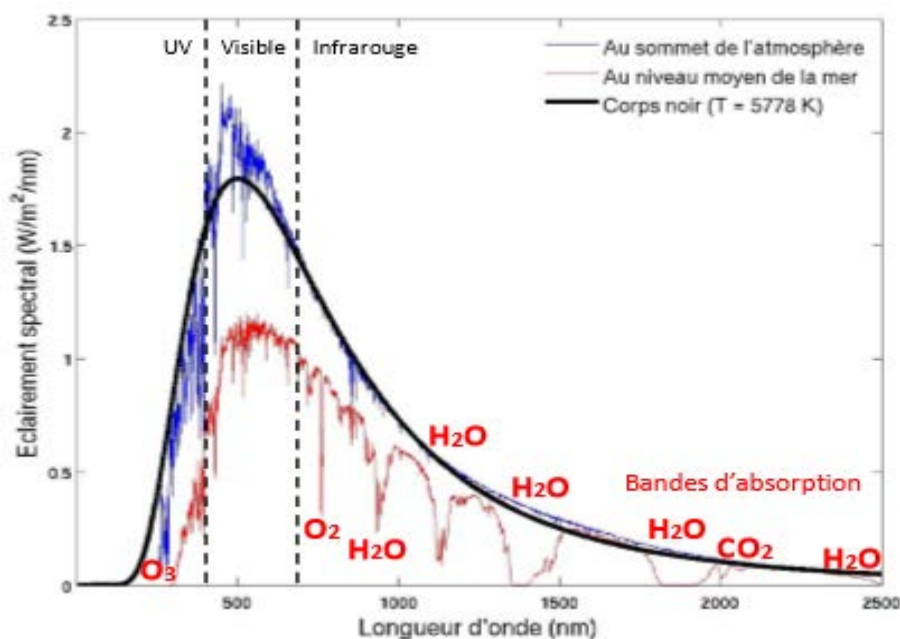


Figure 2.1 : Eclairage solaire

D'après la figure 2.1, nous constatons que le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé. Par ailleurs, les spectres des rayonnements réfléchi, diffusé, et absorbé sont différents. A la surface de la terre, le spectre solaire n'est pas le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O₃, CO₂, H₂O,). Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre. Pour tenir compte de ces différences, comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, on introduit un coefficient appelé masse d'air (AM_x) dont l'expression est :

$$x = \frac{1}{\sin\theta}$$

où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par définition, AM₀ correspond aux conditions hors atmosphère. Quand le soleil fait un angle de 48.19° par rapport au zénith, la lumière incidente est dite AM_{1.5}. Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (83.3 mW/cm² pour AM_{1.5} dont la surface est inclinée à 37° du soleil) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques. Les conditions standards de caractérisation sont définis par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnical Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM_{1.5} global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100mW/cm² et pour une température de cellule de 25°C [15].

Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global. La Figure 2.2 montre le spectre d'émission solaire sous AM_{1.5} global normalisé à 100 mW/cm² [16].

Sa valeur dépend de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiance sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en W.m⁻²) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes [16] :

- AM₀ : Hors atmosphère (application spatiale). P≈1.36KW.m⁻²
- AM₁ : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
- AM_{1.5G} : Spectre standard, le soleil est à 45°. P ≈1KW.m⁻²

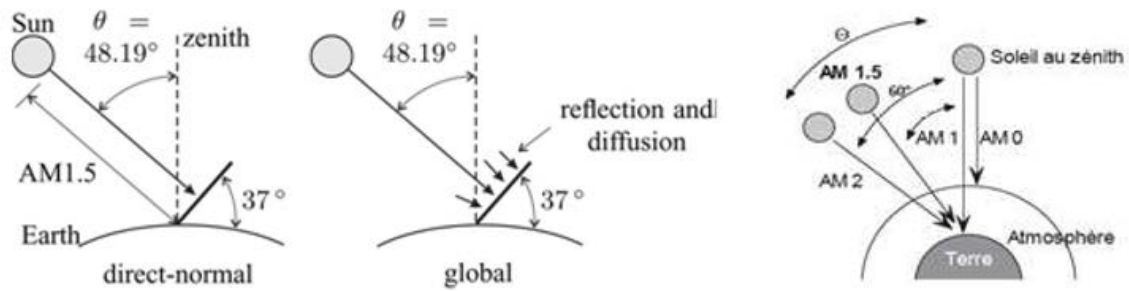


Figure 2-2 : Schéma indiquant le nombre d'air masse AMx en fonction de la position géographique.

2.4) Rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est constitué des ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 μm environ). L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de $340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Fig. 2.3). Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre + atmosphère, environ $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre [15].

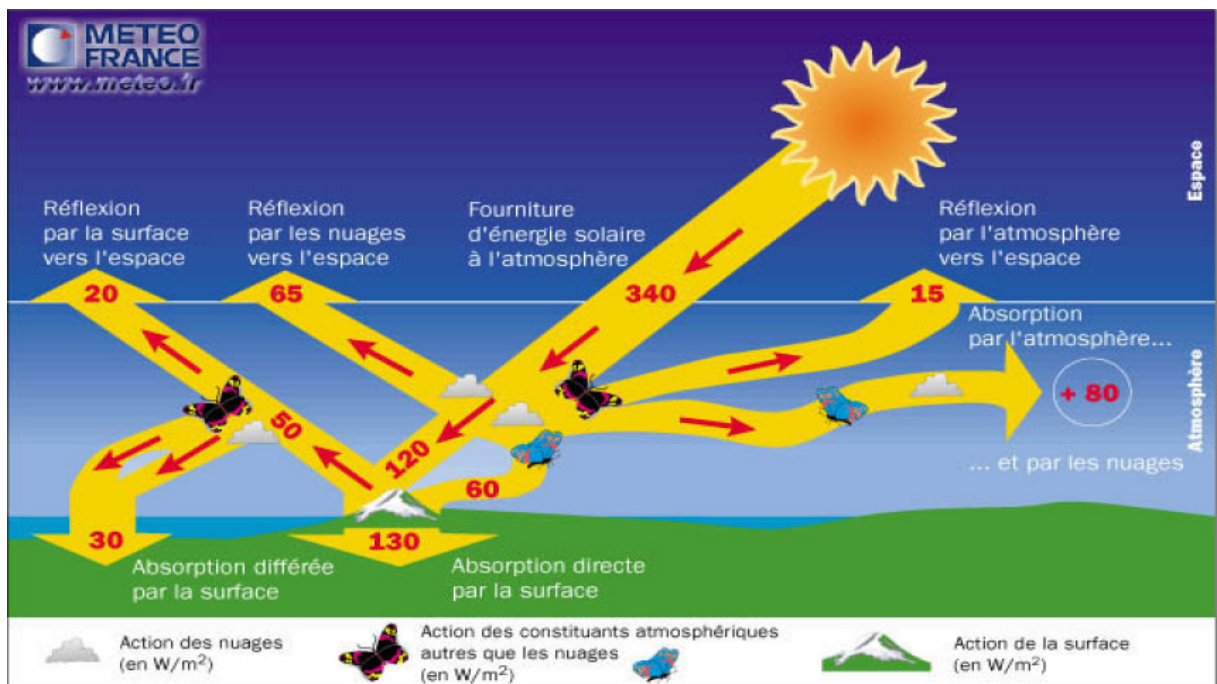


Figure 2.3 : Rayonnement solaire transmis à la terre

La figure 2.3, publiée par Météo France, montre que près du quart de cet éclairement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (65 W.m^{-2}), le reste (15 W.m^{-2}) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc 180 W.m^{-2} qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers (120 W.m^{-2}) se font directement, le reste (60 W.m^{-2}) s'effectuant par diffusion vers le bas.

Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et la réflexion. Sur les 180 W.m^{-2} incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ 50 W.m^{-2} . En fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard et s'ajoute partiellement aux $180 - 50 = 130 \text{ W.m}^{-2}$ de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Bien que l'absorption du rayonnement solaire soit un phénomène continu, on peut simplifier la compréhension du processus précédent en supposant que les 50 W.m^{-2} réfléchis par la surface du globe se répartissent entre 20 W.m^{-2} définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire et 30 W.m^{-2} qui reviennent à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Cette énergie s'ajoute aux 130 W.m^{-2} initialement non réfléchis pour constituer approximativement les 160 W.m^{-2} qu'absorbe la surface terrestre.

2.4.1) Les composantes du Rayonnement solaire :

a. Rayonnement direct : se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

b. Rayonnement diffus : le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit.

c. Rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol : c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc. ...)

d. Rayonnement global : C'est la somme des deux types de rayonnements direct et Diffus.

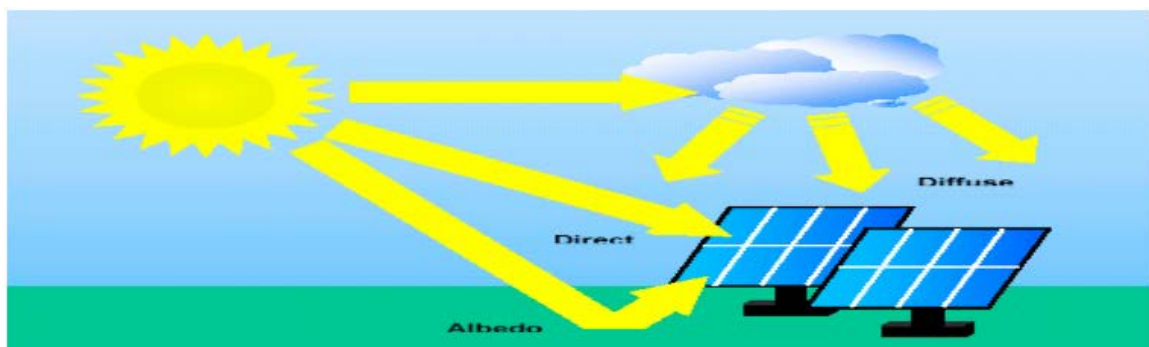


Figure 2.4: composantes du rayonnement solaire

2.4.2) Dualité de la lumière :

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie E liée à λ par la relation suivante [16] :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Avec :

h : constante de planck (j.s^{-1})

c : vitesse de la lumière dans le vide (m.s^{-1})

ν : fréquence (s^{-1})

λ : longueur d'onde (m)

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau.

2.4.3) Constituants de rayonnement solaire :

Le rayonnement électromagnétique se propage sous forme d'onde. Toutes les ondes électromagnétiques se propagent à la même vitesse dans le vide, soit $2,99793 \times 10^8$ m/s, et en une vitesse proche mais moins rapide dans l'air. La lumière visible avec les rayons gamma, rayons x, ultraviolet, infrarouge, micro-ondes, et radio forment le spectre électromagnétique. La longueur d'onde

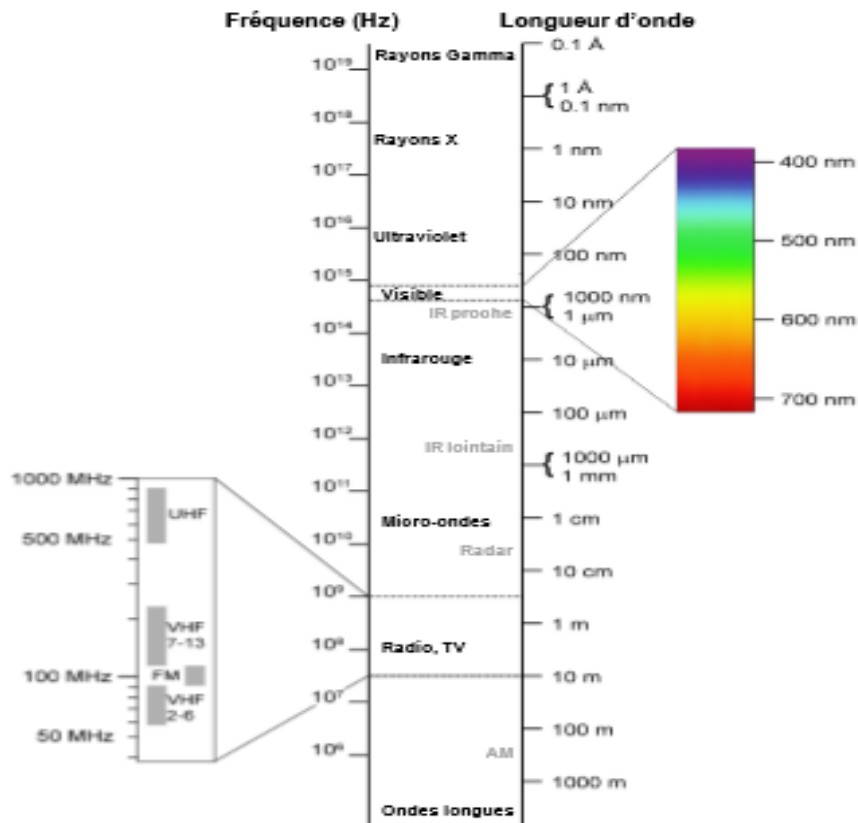


Figure 2.5 : spectre électromagnétique.

2.5) Sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire de rayon indéfini, établie dans les cieux et ayant comme centre l'œil d'un observateur terrestre. La sphère est la base du système de coordonnées employé pour déterminer les positions des astres. Elle est également utilisée pour désigner les intervalles de temps.

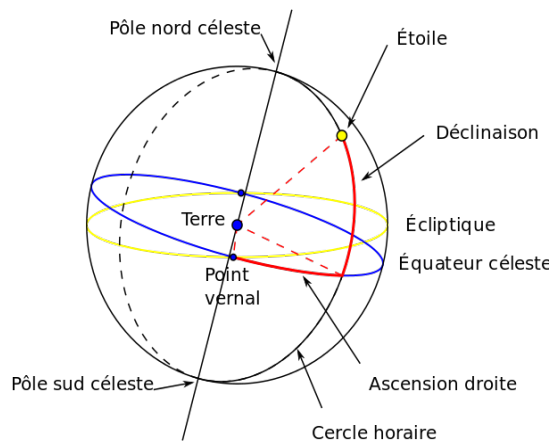


Figure 2.6 : sphère Céleste [18].

2.6) Coordonnées céleste :

2.6.1) Coordonnées géographique :

Ce sont des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

- **L'attitude φ :**

C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et la pole sud par la latitude -90°

- **Longitude λ :**

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. On a choisi pour méridien (origine 0°), le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.

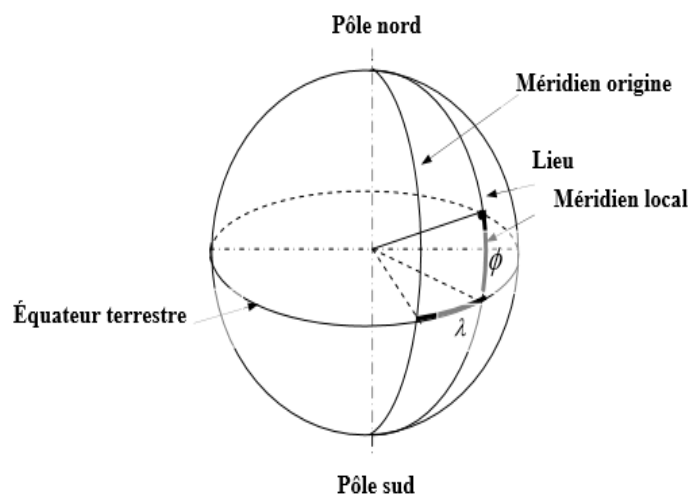


Figure 2.7 : coordonnées géographiques [18].

2.6.2) Coordonnées horaires :

- **Déclinaison du soleil δ :**

C'est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial, elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $23,45^\circ$, elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximal au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation :

$$\delta = 23,45^\circ \sin[0.980(n + 284)]$$

n est le numéro du jour de l'année

- **L'angle horaire du soleil ω :**
- L'angle horaire ω , représente l'arc compris entre le rayonnement solaire incident et le plan méridien du lieu, la valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi et augmente de 15° par heure

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

Avec TSV : temps solaire vrai.

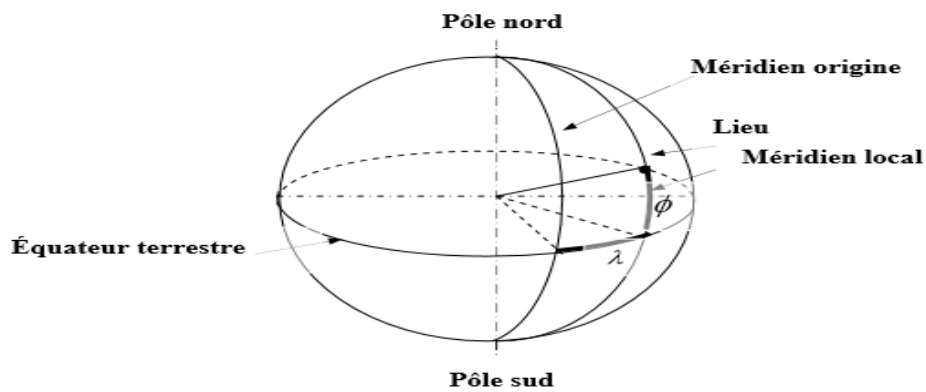


Figure 2.8 angle horaire de soleil.

2.6.3) Coordonnées horizontales :

- **Hauteur angulaire du soleil h :**

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal.

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega)$$

φ : Latitude du lieu.

h : varie entre -90° à $+90^\circ$

en prend : $h > 0$ le jour, $h < 0$ la nuit et $h = 0$ en coucher et lever de soleil

- **Azimet a :**

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil, on peut le compter positivement de 0° à $+180^\circ$ vers l'ouest et négativement de 0° à -180° vers l'est

$$\sin(a) = \frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\cos(h)}$$

Avec :

ω : angle horaire*

δ : Déclinaison du soleil

h : hauteur du soleil

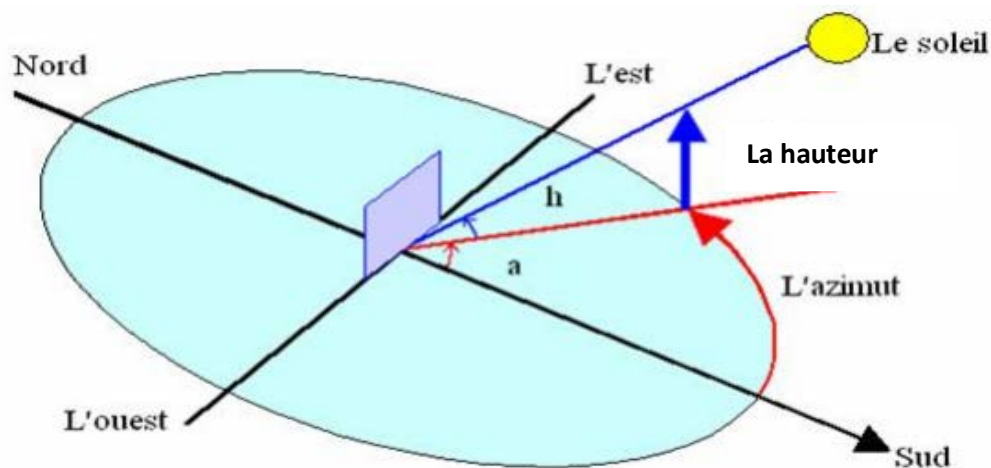


Figure 2.9 coordonnées horizontale [18].

2.6.4) Le temps :

- **Le temps solaire vrai(TSV) :**

On appelle Le temps solaire vrai en un lieu et un instant donné, l'angle horaire du soleil en ce lieu et à cet instant :

$$TSV = TSM + ET$$

- **Le temps solaire moyen (TSM) :**

C'est le temps qui correspond à une rotation uniforme de la terre autour du soleil. Il diffère peu du TSV (écart maximal $ET = 16$ minutes).

- **Le temps universel (TU) :**

C'est le temps solaire moyen de méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time).

- **Le temps légal ou local (TL) :**

Pour déduire le temps le temps légal(TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire.

$$TL = TU + C$$

C : est le décalage entre TL et TU, qui rend compte du décalage de fuseaux et du décalage administratif.

$$C = TL (\text{pour midi TU}) - 12$$

Par exemple en Algérie il est 13h à midi TU, donc $C = 1$

On dit que l'heure légale de l'Algérie est : $(TU+1)$

- **L'équation du temps (ET) :**

C'est l'écart entre le temps solaire moyen TSM et le temps solaire vrai TSV selon le jour de l'année considéré

$$ET = TSV - TSM$$

On peut aussi le calculer avec une autre manière :

$$ET = 0.258 \cos x - 7.416 \sin x - 3.648 \cos 2x - 9.288 \sin 2x$$

$$\text{Avec } : x = \frac{360(n-1)}{365.25}$$

Où l'angle x est défini en fonction du numéro du jour n . Le décompte commence à partir du 1er janvier où $n=1$.

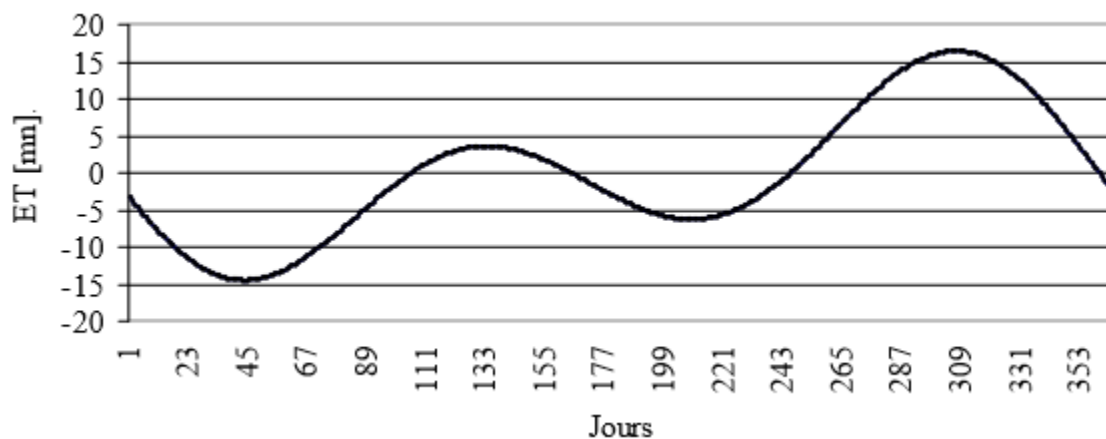


Fig.2.10 Variations annuelles de l'équation du temps

2.7) Diagramme stéréographique :

Le diagramme stéréographique d'une latitude donnée résulte de la superposition de deux séries de courbes.

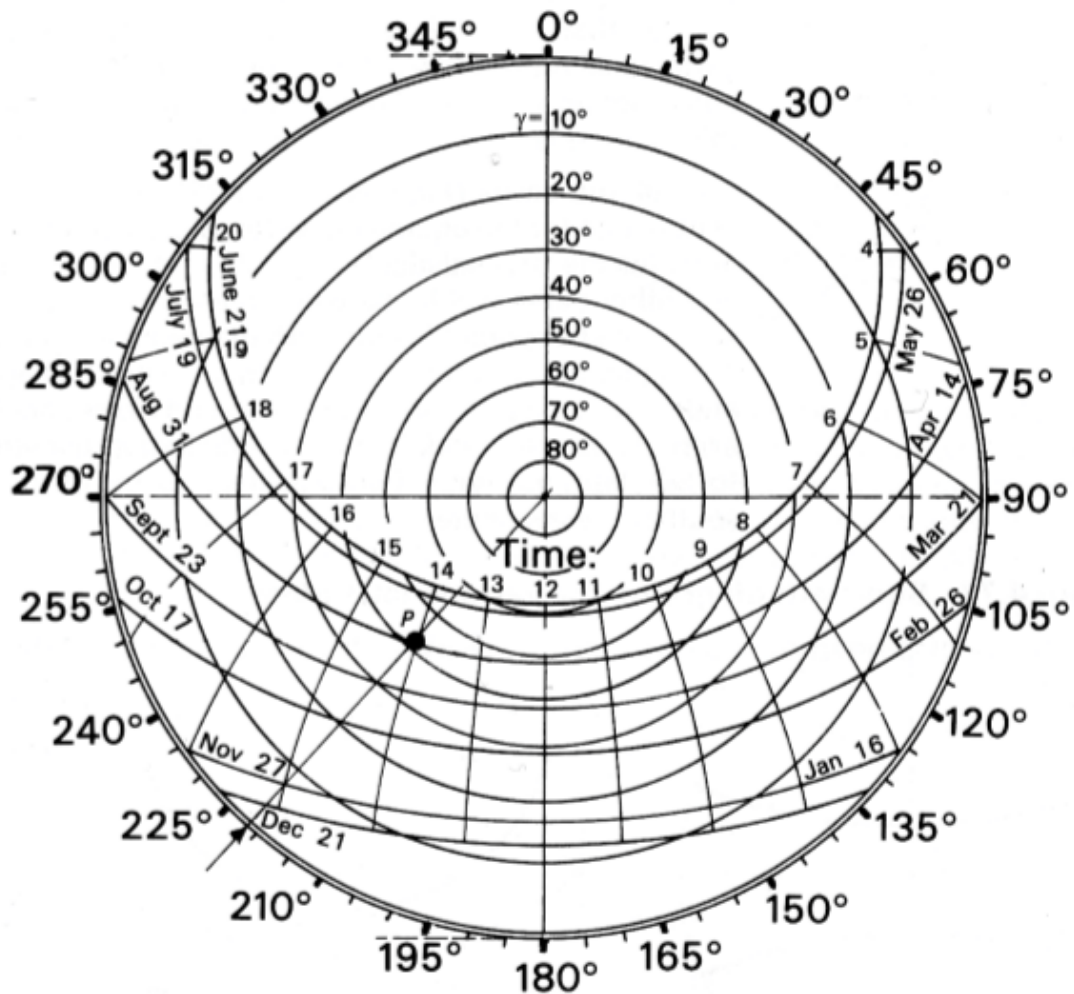
- ❖ Les courbes du parcours solaire pour l'équinoxe, les deux solstices et les autres mois de l'année. Il faut remarquer à ce propos que, dans la mesure où le parcours de la terre par rapport au soleil est symétrique, à chaque courbe correspondent deux dates de l'année, l'une située entre décembre et juin, l'autre située entre juin et décembre.
- ❖ Une série de cercles concentriques représente l'altitude angulaire en projection stéréographique. Il est important de souligner que ces courbes ne sont pas également espacées étant donné que la projection stéréographique n'est pas équidistante.

On trace également sur les chemins solaires des lignes horaires. Toutes ces heures sont en temps solaire vrai, c'est-à-dire correspondant au temps pour lequel le soleil est au sud vrai à midi (pour l'hémisphère nord).

On définira un ensemble dual pour l'autre hémisphère.

La position du soleil peut être obtenue directement à partir du diagramme pour un moment donné de l'année. Il suffit en effet

- de trouver le graphe correspondant à la latitude du lieu.
- de localiser la date et l'heure sur les chemins solaires, en interpolant si nécessaire entre les courbes.
- de lire les angles, horizontal et vertical, sur le graphe.



Figure

2.11 Lecture de l'azimut et de l'altitude angulaire, pour le 31 août à 14h, $\alpha = 222^\circ$, $\gamma = 42^\circ$

2.7.1) Construction des chemins solaires :

La procédure de construction est la suivante :

1. Dessiner un cercle de rayon (r) choisi, et tracer deux diamètres à angles droits pour marquer les quatre points cardinaux. Etendre le diamètre vertical en direction du Nord (pour l'hémisphère nord) pour obtenir le lieu des centres de tous les cercles solaires.

2. A chaque jour de l'année, on peut associer un chemin solaire qui est un arc de cercle dont il suffit de calculer le rayon et de situer le centre.

Appelons (r_s) le rayon de ce cercle et (d_s) la distance de son centre au centre du cercle d'horizon (voir figure 2.12).

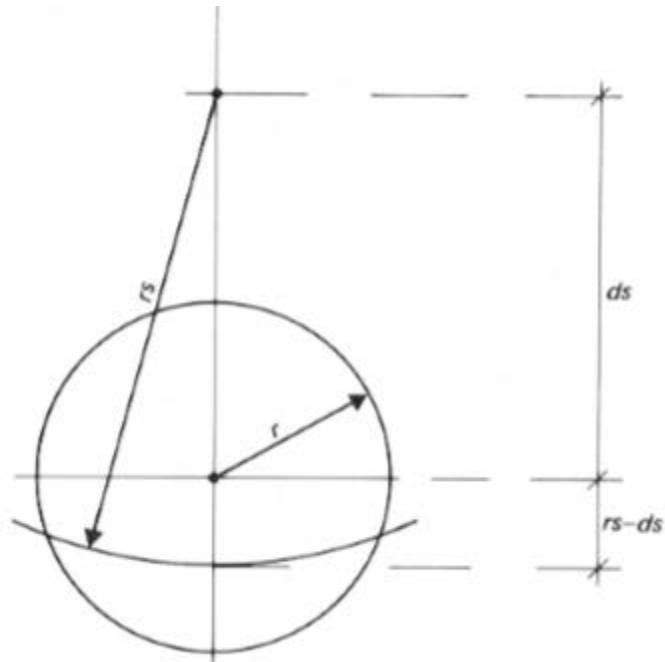


Figure 2.12 Construction des chemins solaires [21]

Les valeurs de (rs) et de (ds) sont données par les formules suivantes :

$$rs = \frac{r * \cos \delta}{\sin \varphi + \sin \delta}$$

$$ds = \frac{r * \cos \varphi}{\sin \varphi + \sin \delta}$$

en fonction de la latitude géographique φ et de la déclinaison δ de la date choisie.

2.7.2) Construction des courbes horaires :

On détermine tout d'abord la distance (dt) par la formule:

$$dt = r * \tan \delta$$

On trace une ligne parallèle à l'axe est-ouest, à la distance (dt) du centre du cercle vers le sud. Cette droite est le lieu des centres de toutes les courbes horaires. On notera que les courbes horaires sont des arcs de cercles de rayon (rh).

$$rh = \frac{r}{\cos \delta * \sin(15h)}$$

et dont le centre est déterminé par la distance (dh) par rapport à l'axe nord-sud sur la droite dt .

$$dh = \frac{r}{\cos \varphi * \tan(15h)}$$

h est le nombre d'heures séparant l'heure considérée de midi.

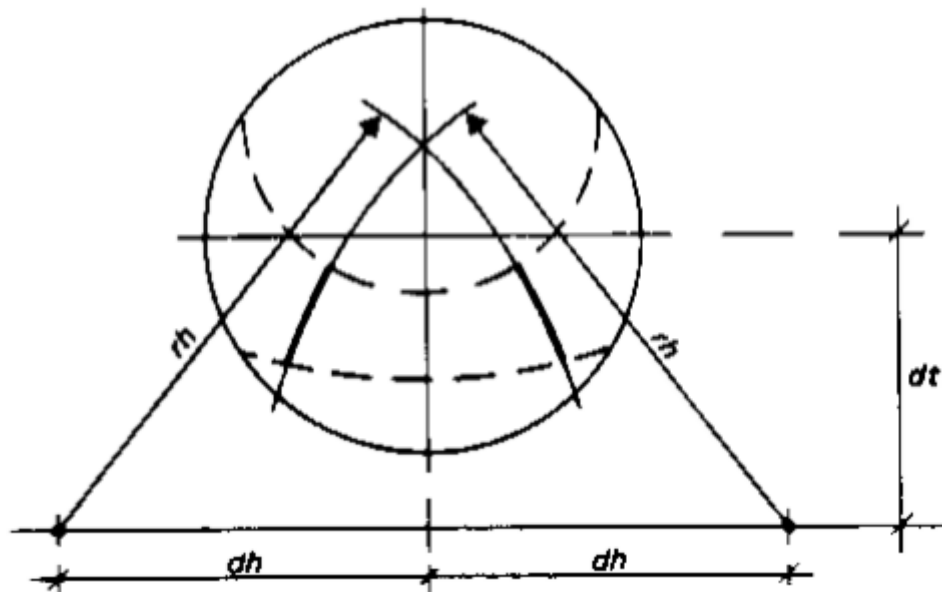


Figure 2.13 Construction des courbes horaires [21]

2.8) Comment trouver la position du soleil dans le ciel :

On peut utiliser les équations avec les coordonnées horizontales ou coordonnées horaires, ou bien tracer le diagramme stéréographique, mais il existe des sites internet qui permettent de donner ces coordonnées sans avoir à faire les calculs ou tracer les courbes.

Exemple :

www.sunearthtools.com

2.8.1) Présentation de site :

www.sunearthtools.com est un site de calcul que nous avons utilisé pour calculer la position de soleil dans le ciel et aussi pour avoir les courbes de trajectoires solaire pour tous les jours de l'année.

2.8.2) Création d'un point d'observation :

Pour créer un point d'observation on a besoin des coordonnées géographiques du lieu.

On a choisi l'université UMMTO avec les coordonnées <<36.6973708,4.0564174 >>

2.8.3) Les résultats donnés par le site web :

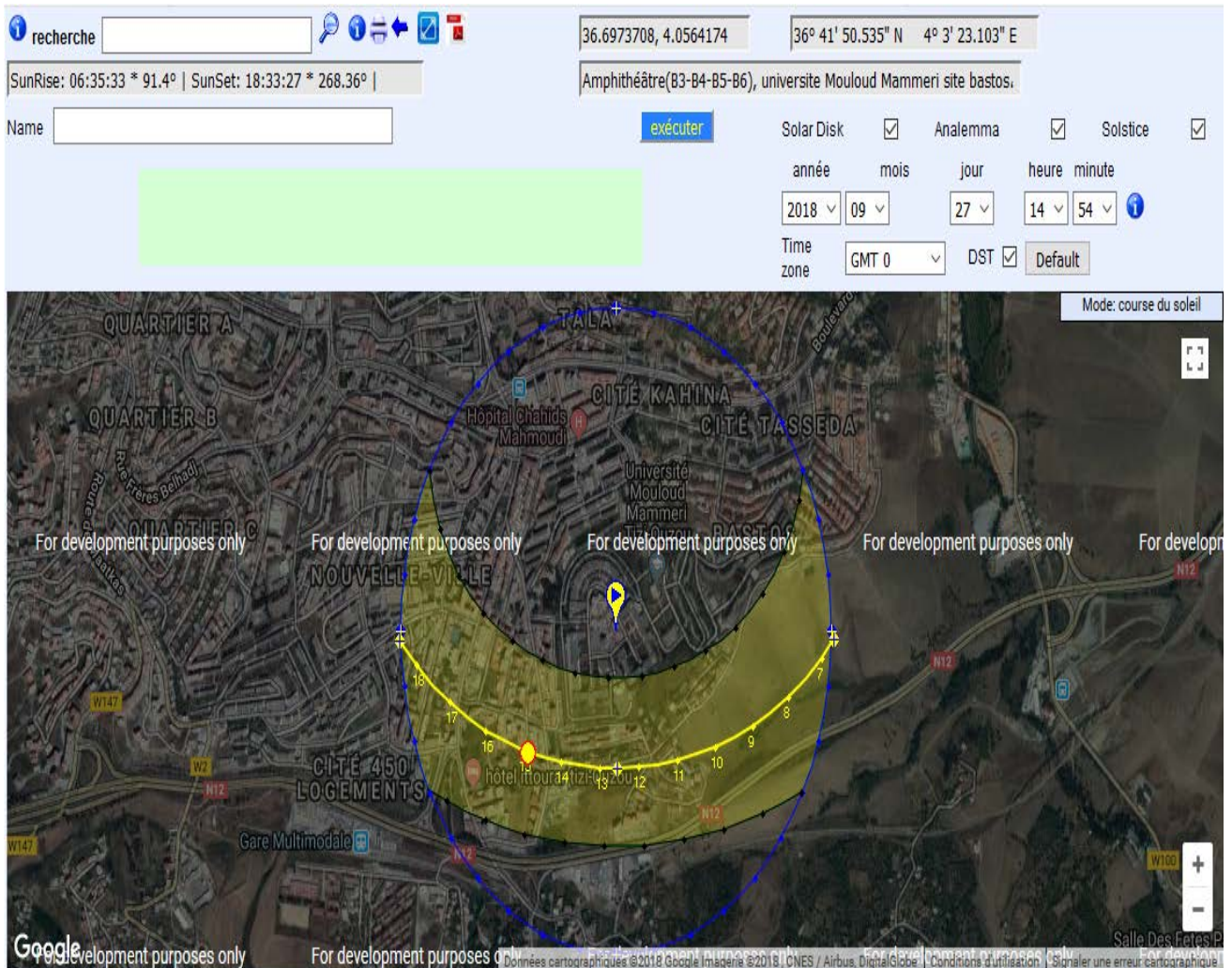


Figure 2.14 image satellite montre la trajectoire de soleil.

La figure est une carte de Google Maps qui montre la région de Tizi-Ouzou. Nous pouvons voir sur cette carte :

- La position du soleil et sa trajectoire prévue pour la journée (27/09/2018).
- La trajectoire minimale et maximale du soleil pendant l'année qu'on peut avoir à partir du point choisi.

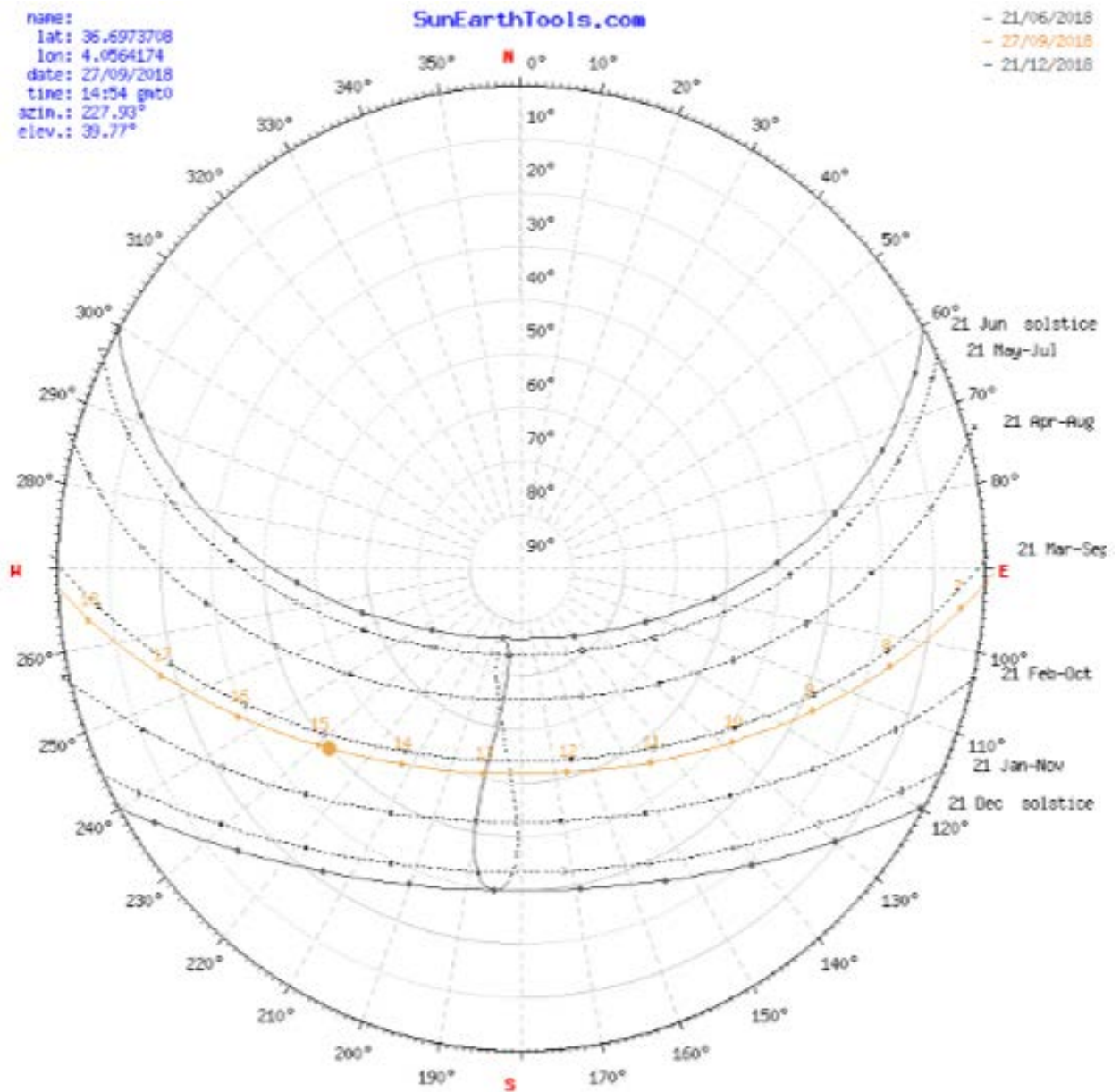


Figure 2.15 la trajectoire dans un cercle en degré

On peut aussi obtenir la trajectoire dans un cercle gradué en degrés comme il est montré à la figure (2.15) on peut alors lire comme exemple les données suivantes :

La date du 21/12/2019 donne la trajectoire minimale (de 120>241)

La date du 21/06/2019 donne la trajectoire maximale (de 60>300)

Les coordonnées du point 36.6973708,4.0564174 a l'heure de la capture des données.

L'élévation et l'azimut (39.77 ;227.93) a 14 :54 GMT (heure de capture des données).

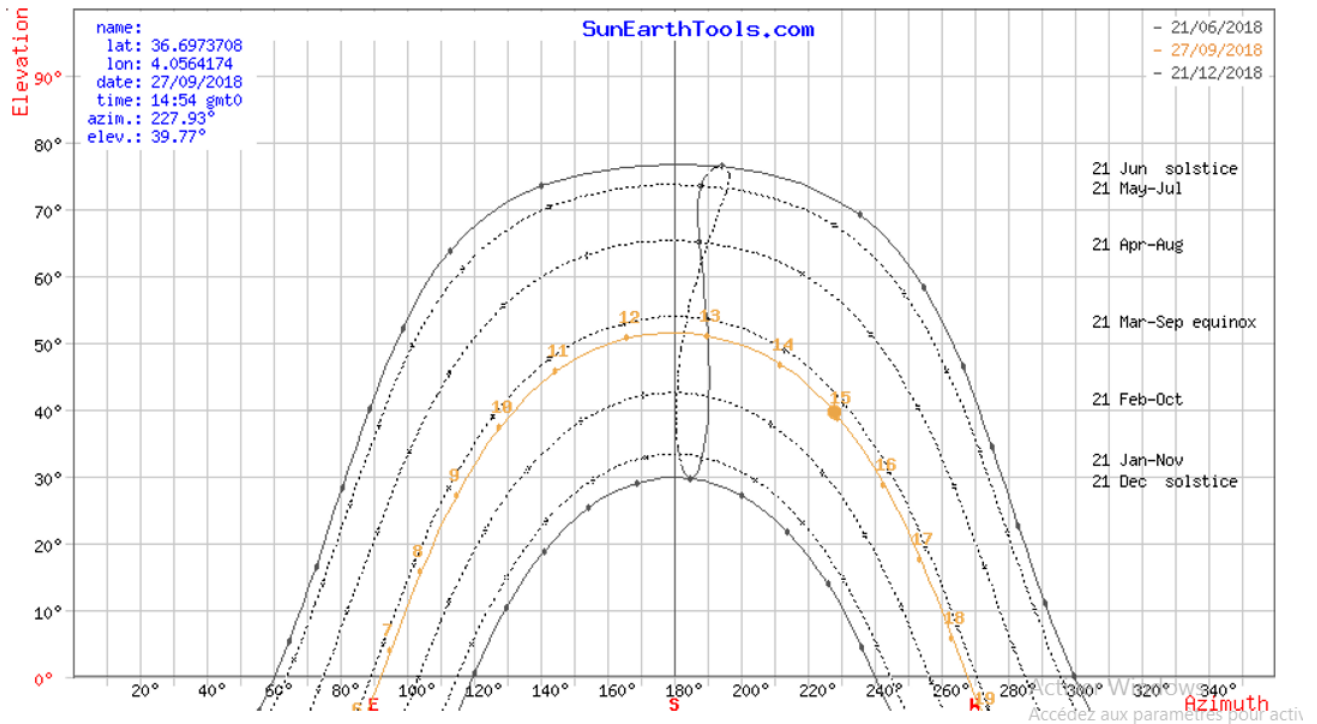


Figure 2.16 L'élévation du soleil pendant la journée

La figure 2.16 montre :

L'élévation du soleil pour la journée du 27/09/2018 à l'instant de la consultation de site et ses variations en fonction de l'azimut

L'élévation maximale et minimale que le soleil peut attendre pendant cette journée

position du soleil	Elevation	Azimut	latitudes	longitudes
27/09/2018 14:54 GMT0	39.77°	227.93°	36.6973708° N	4.0564174° E
crépuscule	Sunrise	Sunset	Azimut Sunrise	Azimut Sunset
crépuscule -0.833°	06:35:33	18:33:27	91.4°	268.36°
Le crépuscule civil -6°	06:09:44	18:59:11	87.53°	272.2°
Le crépuscule nautique -12°	05:39:40	19:29:11	82.95°	276.75°
crépuscule astronomique -18°	05:09:18	19:59:28	78.13°	281.54°
jour	hh:mm:ss	diff. dd+1	diff. dd-1	midi
27/09/2018	11:57:54	-00:02:18	00:02:20	12:34:30

Tableau 2.1

tableau (2.1) :information supplémentaires Un tableau d'information supplémentaires peut aussi être consulté.

Date:	27/09/2018 GMT0	
coordonnées:	36.6973708, 4.0564174	
localisation:	Amphithéâtre(B3-B4-B5-B6), université Mouloud Mammeri site bastos-Route de l'Université, Tizi Ouzou, Algérie	
heure	Elevation	Azimut
06:35:33	-0.833°	91.4°
7:00:00	4.05°	95.07°
8:00:00	15.89°	104.44°
9:00:00	27.19°	115.06°
10:00:00	37.44°	128.07°
11:00:00	45.74°	144.85°
12:00:00	50.75°	166.17°
13:00:00	51.13°	190.07°
14:00:00	46.76°	212.01°
15:00:00	38.86°	229.48°
16:00:00	28.84°	242.96°
17:00:00	17.65°	253.85°
18:00:00	5.86°	263.34°
18:33:27	-0.833°	268.36°

Tableau 2.2

Le tableau (2.2) montre l'élévation et l'azimut en fonction de temps.

La figure montre est un tableau des points définissent l'élévation et l'azimut du soleil en fonction du temps.

Le soleil se lève a 06 :35 GMT et il se couche a 18 :33

Le soleil se lève a l'azimut 91.04 et il se couche a 268.36

L'élévation maximal du soleil élévation max =51.13 a (13 :00 GMT,190.39).

L'élévation de (-0.833) au levé et au couché du soleil est due au diamètre de soleil.

Quand on voit le premier rayon solaire, le centre de soleil n'est pas encours arrive au point 0 alors l'élévation est donc négative.

La précision du temps est de dt=60 min

2.9) Conclusion :

L'étude de rayonnement solaire est très importante pour le choix du meilleur site pour l'installation d'un système de captation solaire. Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Le point d'observation que nous avons choisi est le toit de de l'amphi B4 de l'université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et incliné selon un angle pratiquement égal a la latitude de lieu 36.698197.

Pour que le rayonnement solaire soit perpendiculaire au panneau solaire il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite solaire.

3.1) Introduction

Dans ce chapitre, on présentera les différents composants eux qu'on nous avons besoin pour réaliser notre suiveur solaire. Notre suiveur est constitué d'une partie mécanique qui sert à maintenir le panneau et le diriger vers le rayonnement perpendiculaire du soleil en fonction de la trajectoire de soleil et également une partie électronique constituée d'une carte microcontrôleur « Arduino » et une horloge à temps réel aussi un shield carte mémoire.

3.2) Schéma synoptique

La figure (3.1) présente schéma synoptique général de notre réalisation. Le système suiveur du soleil que nous proposons pour améliorer le rendement du panneau photovoltaïque est illustré par un schéma synoptique. Ce système est basé sur les informations injectées à la carte Arduino, elles vont être converties dans cette dernière en valeur numérique puis on fait la comparaison et gère la commande des deux servomoteurs.

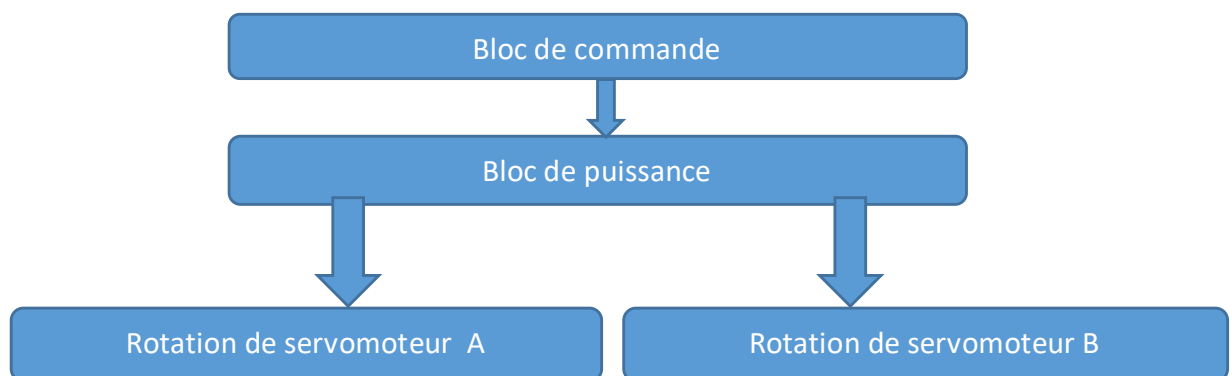


Figure (3.1) : Schéma synoptique.

3.3) Etude des différents blocs

3.3.1) Le bloc commande

Le bloc commande de notre système est basé complètement sur un circuit programmable dit « Arduino ». Et ce bloc est composée de deux choses principales : le matériel et le logiciel.

- **Le matériel** : il s'agit d'une carte électronique basée autour d'un microcontrôleur Atmega du fabricant Atmel dont le prix est relativement bas pour l'étendue possible des applications.
- **Le logiciel** : le logiciel permet de programmer la carte Arduino. Il offre une multitude de fonctionnalités.

3.3.1.1) Partie matériel

3.3.1.1.a) Carte ARDUINO UNO

❖ Description de la carte ARDUINO UNO

La carte Arduino uno est la première version stable de carte Arduino. Elle possède toutes les fonctionnalités d'un microcontrôleur classique en plus de sa simplicité d'utilisation. Elle utilise une puce ATmega328P cadencée à 16 Mhz. Elle possède 32ko de mémoire flash destinée à recevoir le programme, 2ko de SRAM (mémoire vive) et 1 ko d'EEPROM (mémoire morte destinée aux données).

Elle offre 14 pins (broches) d'entrée/sortie numérique (donnée acceptée 0 et 1) dont 6 pouvant générer des PWM. Elle permet aussi de mesurer des grandeurs analogiques grâce à ces 6 entrées analogiques. Chaque broche est capable de délivrer un courant de 40 mA pour une tension de 5V. Cette carte Arduino peut aussi s'alimenter et communiquer avec un ordinateur grâce à son port USB. On peut aussi l'alimenter avec une alimentation comprise en 7V et 12V grâce à son connecteur Power Jack [19].

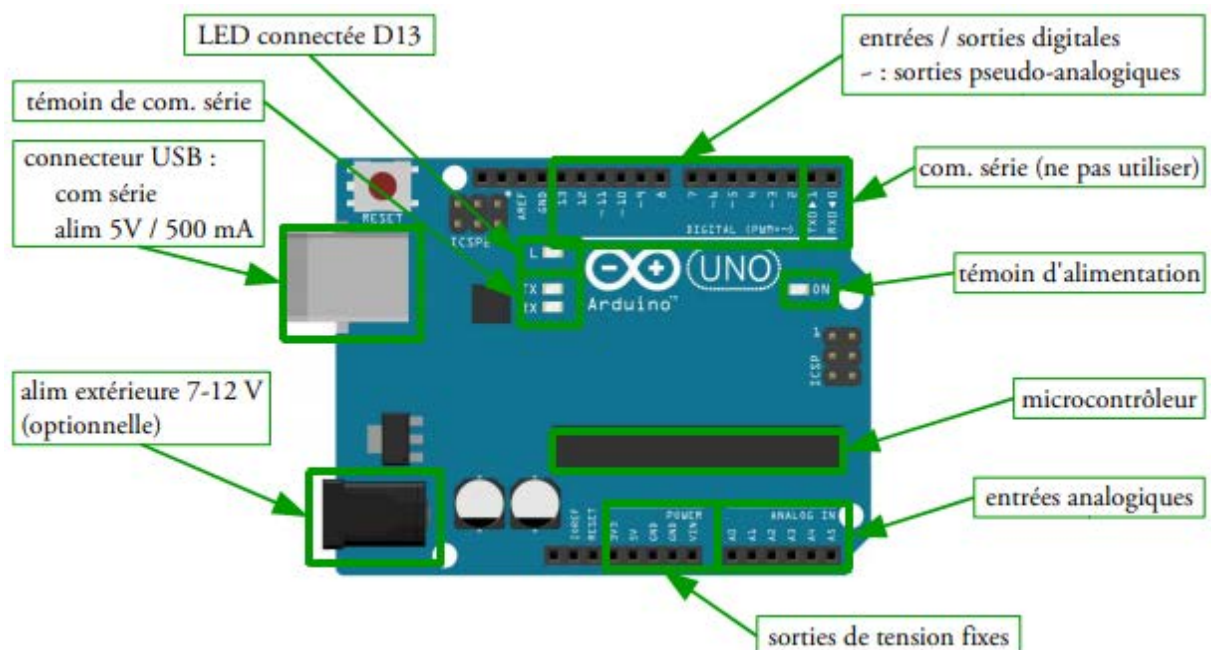


Figure (3.2) : carte arduino

❖ Constituant d'une carte arduino

• Le Microcontrôleur ATmega328

Un microcontrôleur ATmega328 est un circuit intégré qui rassemble sur une puce plusieurs éléments complexes dans un espace réduit au temps des pionniers de l'électronique. Aujourd'hui, en soudant un grand nombre de composants encombrants ; tels que les transistors ; les résistances et les condensateurs tout peut être logé dans un petit boîtier en plastique noir muni d'un certain nombre de broches dont la programmation peut être réalisée en langage C. la figure (3.3) montre un microcontrôleur ATmega 328, qu'on trouve sur la carte Arduino[20].



Figure (3.3) : microcontrôleur ATmega 328

Le microcontrôleur ATmega328 est constitué par un ensemble d'éléments qui ont chacun une fonction bien déterminée. Il est en fait constitué des mêmes éléments que sur la carte mère d'un ordinateur. Globalement, l'architecture interne de ce circuit programmable se compose essentiellement sur [19] :

- **La mémoire Flash** : C'est celle qui contiendra le programme à exécuter. Cette mémoire est effaçable et réinscriptible mémoire programme de 32Ko (dont bootloader de 0.5 ko).
- **RAM** : c'est la mémoire dite "vive", elle va contenir les variables du programme. Elle est dite "volatile" car elle s'efface si on coupe l'alimentation du microcontrôleur. Sa capacité est 2 ko
- **EEPROM** : C'est le disque dur du microcontrôleur. On y enregistre des infos qui ont besoin de survivre dans le temps, même si la carte doit être arrêtée. Cette mémoire ne s'efface pas lorsque l'on éteint le microcontrôleur ou lorsqu'on le reprogramme.

- **Les sources d’Alimentation de la carte :**

On peut distinguer deux genres de sources d'alimentation (Entrée Sortie) et cela comme suit :

- **VIN.** La tension d'entrée positive lorsque la carte Arduino est utilisée avec une source de tension externe (à distinguer du 5V de la connexion USB ou autre source 5V régulée). On peut alimenter la carte à l'aide de cette broche, ou, si l'alimentation est fournie par le jack d'alimentation, accéder à la tension d'alimentation sur cette broche.

- **5V.** La tension régulée utilisée pour faire fonctionner le microcontrôleur et les autres composants de la carte (pour info : les circuits électroniques numériques nécessitent une tension d'alimentation parfaitement stable dite "tension régulée" obtenue à l'aide d'un composant appelé un régulateur et qui est intégré à la carte Arduino). Le 5V régulé fourni par cette broche peut donc provenir soit de la tension d'alimentation VIN via le régulateur de la carte, ou bien de la connexion USB (qui fournit du 5V régulé) ou de tout autre source d'alimentation régulée.

- **3V3.** Une alimentation de 3.3V fournie par le circuit intégré FTDI (circuit intégré faisant l'adaptation du signal entre le port USB de votre ordinateur et le port série de l'ATmega) de la carte est disponible : ceci est intéressant pour certains circuits externes nécessitant cette tension au lieu du 5V. L'intensité maximale disponible sur cette broche est de 50mA.

- **Les entrées & sorties :**

Cette carte possède 14 broches numériques (numérotée de 0 à 13) peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, en utilisant les instructions `pinMode()`, `digital Write()` et `digital Read()` du langage Arduino. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir un maximum de 40mA d'intensité et dispose d'une résistance interne de "rappel au plus" (pull-up) (déconnectée par défaut) de 20-50 KOhms. Cette résistance interne s'active sur une broche en entrée à l'aide de l'instruction `digital Write (broche, HIGH)`.

En plus, certaines broches ont des fonctions spécialisées :

- **Interruptions Externes :** Broches 2 et 3. Ces broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, sur un front montant ou descendant, ou sur un changement de valeur.

- Impulsion PWM (largeur d'impulsion modulée): Broches 3, 5, 6, 9, 10, et 11. Fournissent une impulsion PWM 8-bits à l'aide de l'instruction `analog Write ()`.

- **SPI (Interface Série Périphérique):** Broches 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Ces broches supportent la communication SPI (Interface Série Périphérique) disponible avec la librairie pour

communication SPI. Les broches SPI sont également connectées sur le connecteur ICSP qui est mécaniquement compatible avec les cartes Mega

- **I2C** : Broches 4 (SDA) et 5 (SCL). Supportent les communications de protocole I2C (ou interface TWI (Two Wire Interface - Interface "2 fils"), disponible en utilisant la librairie Wire/I2C (ou TWI - Two-Wire interface - interface "2 fils").

- **LED** : Broche 13. Il y a une LED incluse dans la carte connectée à la broche 13. Lorsque la broche est au niveau HAUT, la LED est allumée, lorsque la broche est au niveau BAS, la LED est éteinte.

La carte Uno dispose 6 entrées analogiques (numérotées de 0 à 5), chacune pouvant fournir une mesure d'une résolution de 10 bits (càd sur 1024 niveaux soit de 0 à 1023) à l'aide de la très utile fonction `analogRead()` du langage Arduino. Par défaut, ces broches mesurent entre le 0V (valeur 0) et le 5V (valeur 1023), mais il est possible de modifier la référence supérieure de la plage de mesure en utilisant la broche AREF et l'instruction `analogReference()` du langage Arduino.

La carte Arduino Uno intègre un fusible qui protège le port USB de l'ordinateur contre les surcharges en intensité (le port USB est généralement limité à 500mA en intensité). Bien que la plupart des ordinateurs aient leur propre protection interne, le fusible de la carte fournit une couche supplémentaire de protection. Si plus de 500mA sont appliqués au port USB, le fusible de la carte coupera automatiquement la connexion jusqu'à ce que le court-circuit ou la surcharge soit stoppé.

Les ports de communications La carte Arduino UNO a de nombreuses possibilités de communications avec l'extérieur. L'Atmega328 possède une communication série UART TTL (5V), grâce aux broches numériques 0 (RX) et 1 (TX) [19].

On utilise (RX) pour recevoir et (TX) transmettre (les données séries de niveau TTL). Ces broches sont connectées aux broches correspondantes du circuit intégré ATmega328 programmé en convertisseur USB – vers – série de la carte, composant qui assure l'interface entre les niveaux TTL et le port USB de l'ordinateur. Comme un port de communication virtuel pour le logiciel sur l'ordinateur, La connexion série de l'Arduino est très pratique pour communiquer avec un PC, mais son inconvénient est le câble USB, pour éviter cela, il existe différentes méthodes pour utiliser ce dernier sans fil :

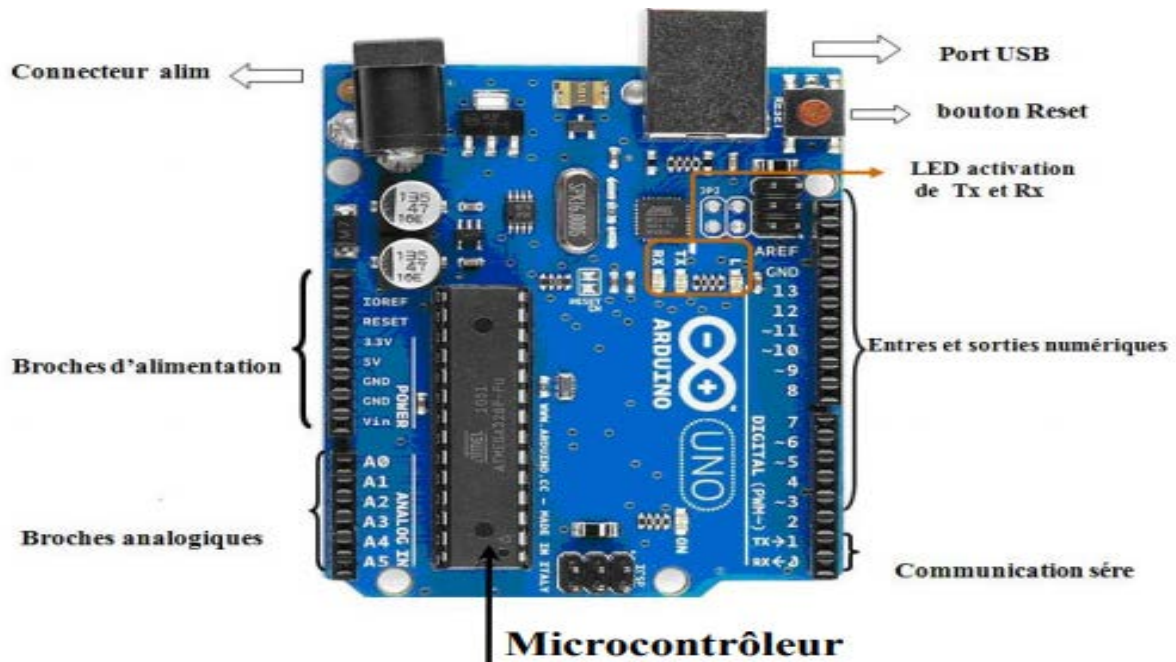


Figure (3.4) : constitution de la carte arduino

❖ **Caractéristiques techniques :**

Microcontrôleur ATmega328P

Tension de fonctionnement 5V

Tension d'entrée (recommandé) 7-12V

Tension d'entrée (limite) 6-20V

E / S numériques Pins 14 (dont 6 fournissent la sortie PWM*)

PWM numérique E / S Pins 6 Pins d'entrée analogique 6

DC Courant par I O Pin / 20 mA

Courant DC pour 3.3V Pin 50 mA

Mémoire flash 32 KB (ATmega328P)

Dont 0,5 KB utilisé par bootloader**

SRAM 2 KB (ATmega328P)

EEPROM *** 1 KB (ATmega328P)

Vitesse de l'horloge 16 MHz

Longueur 68,6 mm

Largeur 53,4 mm Poids 25 g

3.3.1.1.b) Shield SD :

Il fournit un espace de stockage pour la carte Arduino. C'est possible de lire / écrire une carte SD via la bibliothèque SD intégrée d'Arduino. Il prend en charge les cartes SD, SDHC et Micro SD.

- **Carte SD :**

Une **carte SD** est une carte mémoire amovible de stockage de données numériques créée en janvier 2000 par une alliance formée entre les industriels Panasonic, SanDisk et Toshiba.

Les cartes SD sont utilisées pour le stockage de fichiers dans les appareils photo numériques, les caméscopes numériques, les systèmes de navigation GPS, les consoles de jeux vidéo, les téléphones mobiles dont les smartphones, ou encore les systèmes embarqués.

Depuis 2010, les cartes SD font office de standard de stockage, à la suite de l'abandon progressif des autres formats, notamment du Memory Stick de Sony. On parle de carte SDHC pour des capacités entre 4 et 32 Go¹, et de carte SDXC au-delà de 32 Go. En 2014, leur capacité s'échelonne jusqu'à 512 Go

3.3.1.1.c) Le module RTC DS 1302

- ❖ **Description :**

Le module d'horloge temps réel DS1302 fournit une horloge temps réel DS1302 avec un cristal 32kHz Batterie de secours, le tout dans un petit module SIP qui peut être facilement branché sur une maquette.

Ce module RTC est capable de gérer l'heure (heures, minutes, secondes) et la date (jours, mois, année) tout en s'occupant des mois de 30 ou 31 jours, des années bissextiles, etc. Le calendrier intégré dans le module DS1302 est valable de l'an 2000 à l'an 2100.

- ❖ **Caractéristiques**

- Support de batterie CR1220 intégré
- L'interface SPI prend en charge la synchronisation 3 fils ou 4 fils connexion série
- La tension de fonctionnement large supporte 3.3V et 5V microcontrôleurs
- Header Un en-tête SIP pratique facilite la navigation

❖ Spécifications

- Exigences de puissance : 3.3-5 VDC
- Exigences actuelles : 3.2mA @ 5 VDC
- Interface de communication : SPI @ Vdd (3 ou 4 fils)
- Température de fonctionnement : +32 à +158 ° F (0 à +70 ° C)
- Dimensions : (1,22 x 0,6) 31,2 x 15,5 mm

❖ Autre application

- Horloge électronique
- Enregistreur de données avec date / heure
- Minuterie de contrôle des gicleurs

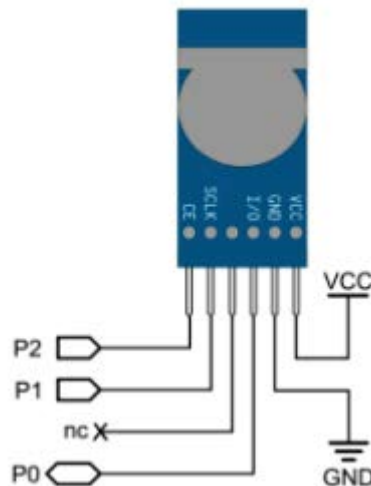
❖ Circuit de démarrage rapide

Figure (3.5) Connexion à un BASIC Stamp 2

Le schéma de connexion ci-dessus est typique pour un microcontrôleur BASIC Stamp 2 ou Propeller, cependant si on essaient de se connecter à un microcontrôleur qui utilise une interface SPI à 4 fils, alors il faut suivre le schéma de connexion ci-dessous.

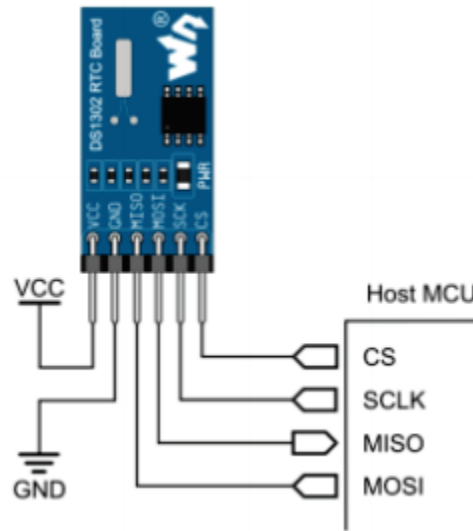


Figure (3.6) Connexion à un microcontrôleur avec une interface SPI à 4 fils

❖ Définitions des broches (interface à 4 fils)

Pin	Nom	Type	Fonction
1	VCC	P	Supply Voltage (3.3-5 VDC)
2	GND	G	Ground
3	MISO	O	Master In, Slave Out
4	MOSI	I	Master Out, Slave In
5	SCK	I	Serial Clock
6	CS	I	Chip Select

Tableau (3.1) définition des broches (interface a 4 fils)

3.3.1.2) Partie programme :

Une telle carte d’acquisition qui se base sur sa construction sur un microcontrôleur doit être dotée d’une interface de programmation comme est le cas de notre carte.

3.3.1.2.a) L'environnement de la programmation

Le logiciel de programmation de la carte Arduino sert d'éditeur de code (langage proche du C). Une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte au travers de la liaison USB. Le câble USB alimente à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information CE programme appelé IDE Arduino.[19].[20].

3.3.1.2.b) Structure générale du programme (IDE Arduino)

Comme n'importe quel langage de programmation, une interface souple et simple est exécutable sur n'importe quel système d'exploitation Arduino basé sur la programmation en C.

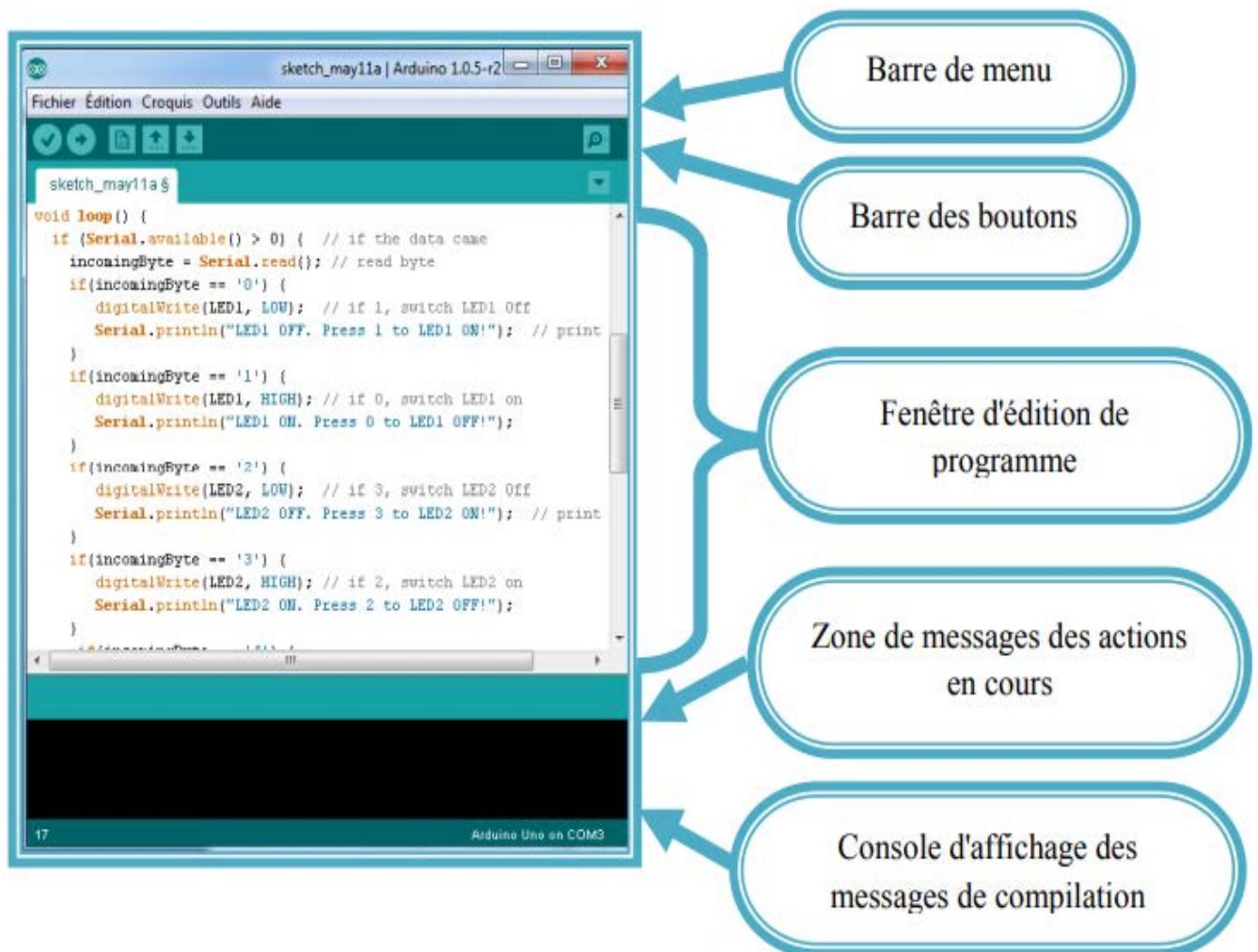


Figure (3.7) : Interface IDE Arduino

3.3.1.2.c) Injection du programme

Avant d'envoyer un programme dans la carte, il est nécessaire de sélectionner le type de la carte (Arduino Uno) et le numéro de port USB (COM) comme à titre d'exemple cette figure.

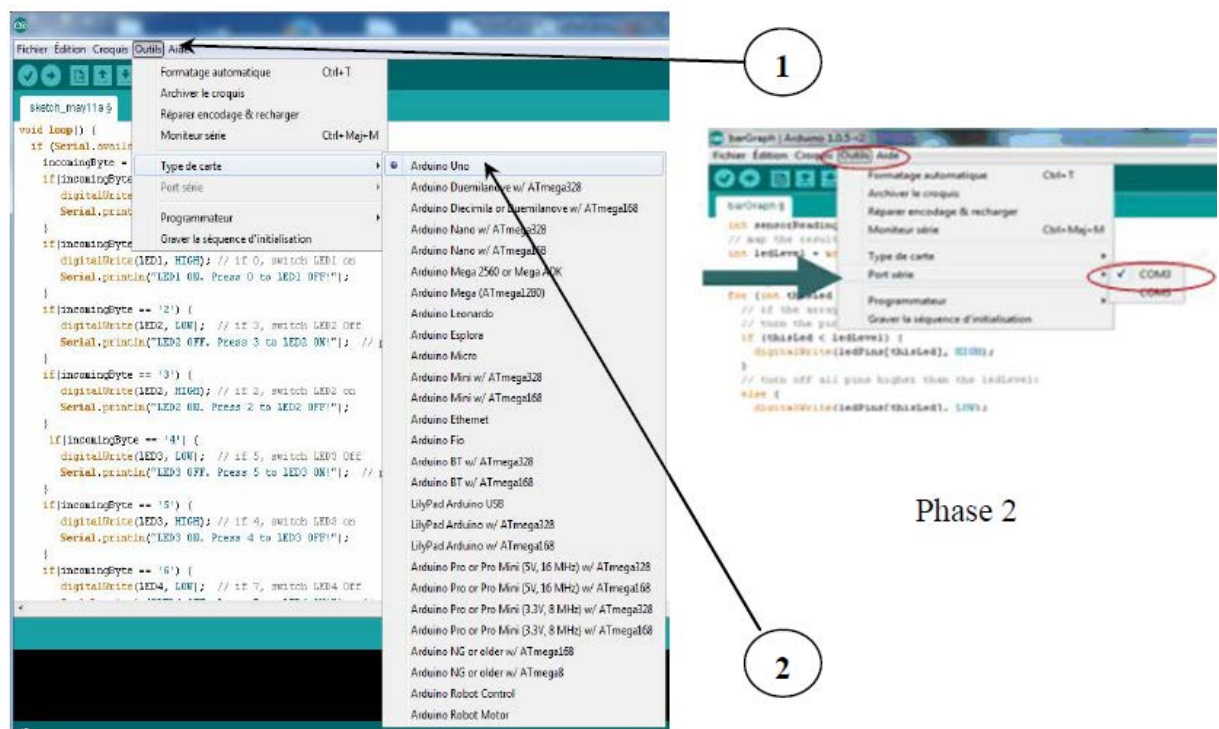


Figure (3.8) injection de programme

3.3.1.2.d) Les étapes de téléchargement du programme

Une simple manipulation enchaînée doit être suivie afin d'injecter un code vers la carte Arduino via le port USB.

1. On conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel IDE Arduino.
2. On vérifie ce programme avec le logiciel Arduino (compilation).
3. Si des erreurs sont signalées, on modifie le programme.
4. On charge le programme sur la carte.
5. On câble le montage électronique.
6. L'exécution du programme est automatique après quelques secondes.
7. On alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation autonome (pile 9 volts par exemple).

8. On vérifie que notre montage fonctionne.



Figure (3.9) : Les étapes de téléchargement du code

3.3.2) Le Bloc puissance :

3.3.2.1) servomoteur :

❖ Définition :

est un servomoteur capable de maintenir une opposition à un effort statique et dont la position est vérifiée en continu et corrigée en fonction de la mesure. C'est donc un système asservi. Le servomoteur intègre dans un même boîtier, la mécanique (moteur et engrenage), et l'électronique, pour la commande et l'asservissement du moteur. La position est définie avec une limite de débattement d'angle de 180 degrés, mais également disponible en rotation continue(8)

❖ Constitution d'un servomoteur

Un servomoteur est constitué essentiellement de :

- Moteur à courant continu de très petite taille ;
- Réducteur en sortie de ce moteur diminuant la vitesse mais augmentant le couple ;

- Potentiomètre (faisant fonction de diviseur résistif) qui génère une tension variable, proportionnelle à l'angle de l'axe de sortie ;
- Dispositif électronique d'asservissement ;
- Axe dépassant hors du boîtier avec différents bras ou roues de fixation.

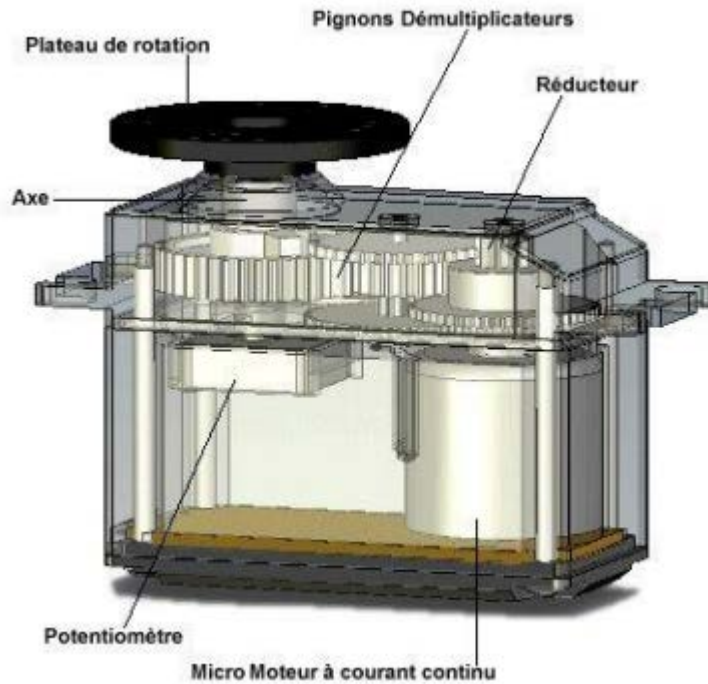


Figure (3.10) Servomoteur

❖ **Fonction d'usage :**

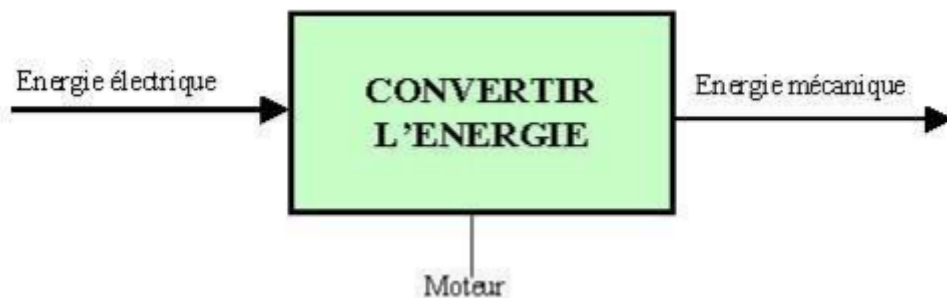


Figure (3.11) : conversion d'énergie

❖ **Principe de fonctionnement :**

Les servomoteurs sont commandés par l'intermédiaire d'un câble électrique à trois fils qui permet d'alimenter le moteur et de lui transmettre des consignes de position sous forme d'un signal *codé en largeur d'impulsion* plus communément appelé PWM. Cela signifie que c'est la durée des impulsions

qui détermine l'angle absolu de l'axe de sortie et donc la position du bras de commande du servomoteur. Le signal est répété périodiquement, en général toutes les 20 millisecondes, ce qui permet à l'électronique de contrôler et de corriger continuellement la position angulaire de l'axe de sortie, cette dernière étant mesurée par le potentiomètre.

Lorsque le moteur tourne, l'axe du servomoteur change de position, ce qui modifie la résistance du potentiomètre. Le rôle de l'électronique est de commander le moteur pour que la position de l'axe de sortie soit conforme à la consigne reçue : c'est un asservissement.

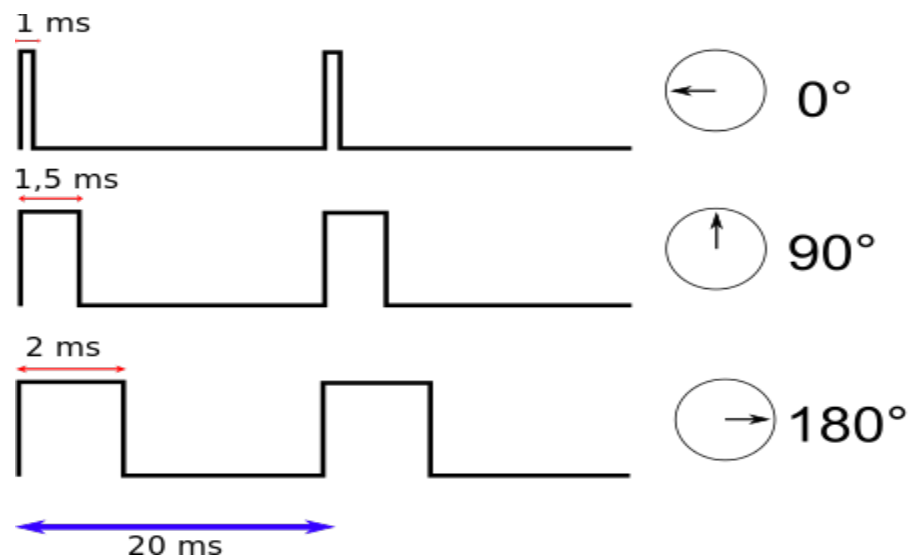


Figure (3.12) illustration de signal de contrôle

3.4) Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents éléments constitutifs du dispositif que nous sommes amenés à réaliser qui permet d'optimiser les performances d'un panneau PV classique et d'assurer le bon fonctionnement de celui mobile, en faisant en sorte que les rayons solaires y soient perpendiculaires.

4.1) Introduction :

Après avoir décrit la partie matérielle de notre système, nous sommes arrivés à la partie la plus importante de notre mémoire qui est la conception et la réalisation du système de poursuite. Notre réalisation se décompose en trois parties principales :

- Partie programmation ;
- Partie électrique ;
- Partie mécanique ;

Donc, le bon fonctionnement de notre système se base essentiellement sur l'ensemble de ces parties.

4.2) Partie programmation :

4.2.1) L'organigramme :

Avant de passer à la programmation, nous devons réaliser un organigramme qui explique le déroulement des différentes séquences, tant intérieures qu'extérieures (Figure (4.1)), il comportera plusieurs boucles dont la fin d'exécution succède toujours à son commencement.

Organigramme principale :

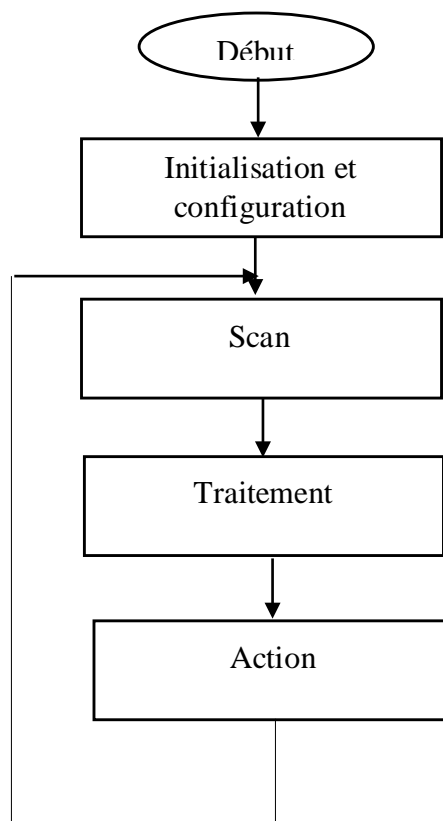


Figure (4.1) Organigramme principale

4.2.2) Programmation :

La carte Arduino uno est une carte programmable, elle peut être programmée avec le logiciel Arduino représenté dans la figure (4.2).

Nous avons préféré de photographier l'interface du logiciel Arduino dans laquelle nous avons simulé notre programme.



```
PROJECT1
#include <Wire.h>
#include <SD.h>
#define SD_CS 4

// Creation of the Real Time Clock Object
// 4 ==> DS1307 // 7 ==> DS1308 // 8 ==> DS1309 //
Wire.begin(4);

// File myFile;
// =====

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(4, OUTPUT);

  Serial.print("Initializing SD card...");

  if (!SD.begin(4)) {
    Serial.println("initialization failed!");
    return;
  }
  Serial.println("initialization done.");
}
```

Figure (4.2) interface du logiciel Arduino

4.3) Partie électrique :

Nous avons réalisé notre montage électrique par étapes.

Etape 1 :

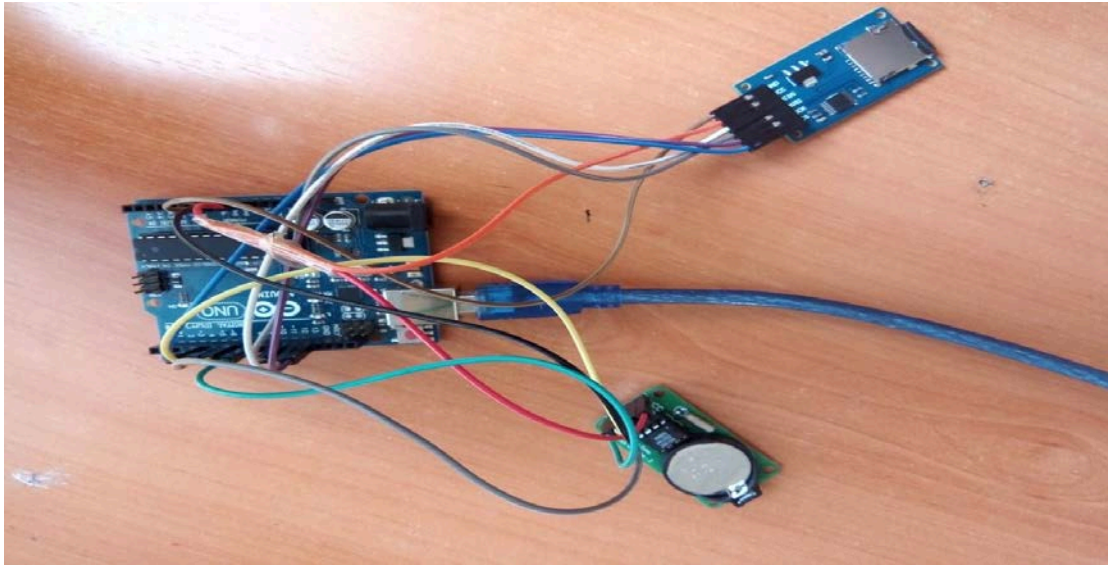


Figure (4.3) montage électrique

Nous avons réaliser cette essai en premier lieu pour tester le bon fonctionnement de la RTC et le Shield SD et vérifier leurs connexions avec la carte arduino en utilisant un programme arduino qui nous permet de régler la date et l'heure sur la RTC et écrire des instructions sur la carte SD.

- **Etape 2**

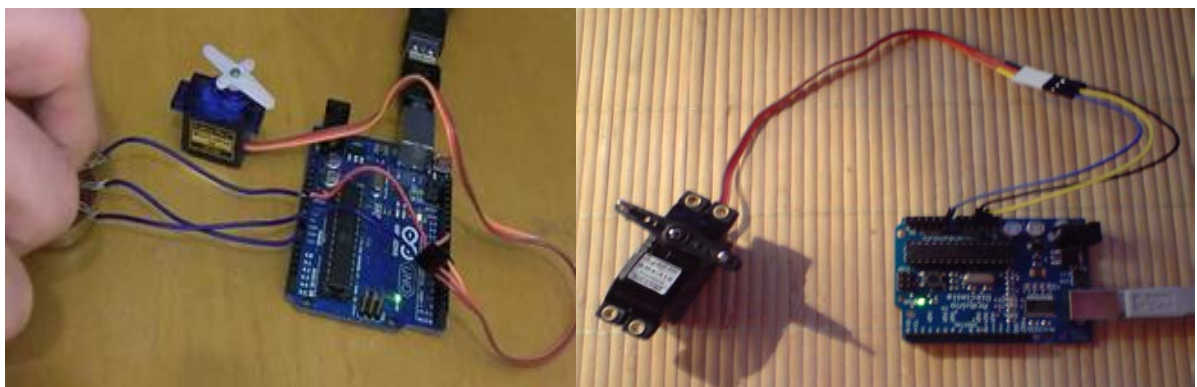


Figure (4.4) les servomoteurs

Dans cette étape, nous avons réalisé cette essai pour tester le bon fonctionnement des servomoteurs et vérifier leurs sens de rotation.

- **Etape 3**

Pour le fonctionnement de notre model, nous avons placé un servomoteur sur l'axe horizontal pour la variation de l'élévation et un autre servomoteur sur l'axe vertical pour la variation de l'azimut puis nous avons connecter les deux servomoteur vers notre circuit électronique afin de les commander

4.4) Partie mécanique :

Pour que la production photovoltaïque soit maximale, les rayons provenant directement du soleil doivent avoir un angle d'incidence égal à 90° . Le pointage du panneau est donc optimal lorsque la normale au plan du panneau, en son centre, est dirigée vers le soleil.

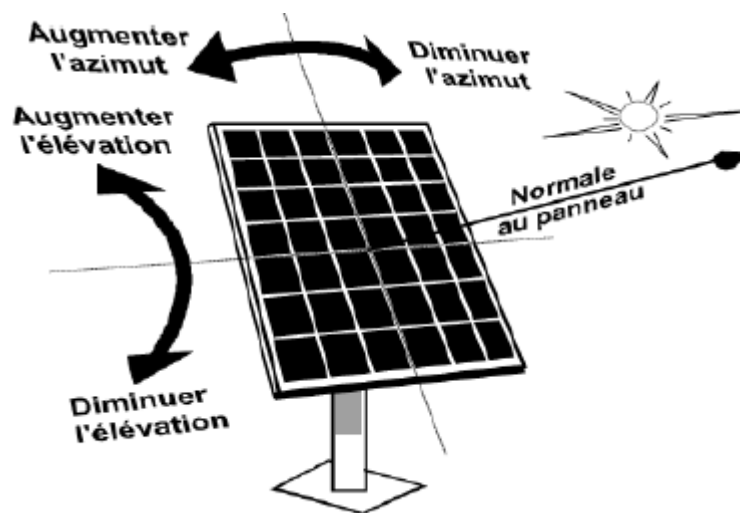


Figure (4.5) structure de suiveur solaire

4.5) Description de la structure :

Notre structure mécanique est constituée de deux parties mobiles. Une partie sur l'axe d'horizon pour la variation d'élévation du panneau par rapport au soleil et l'autre partie sur l'axe vertical pour la variation d'azimut du panneau.

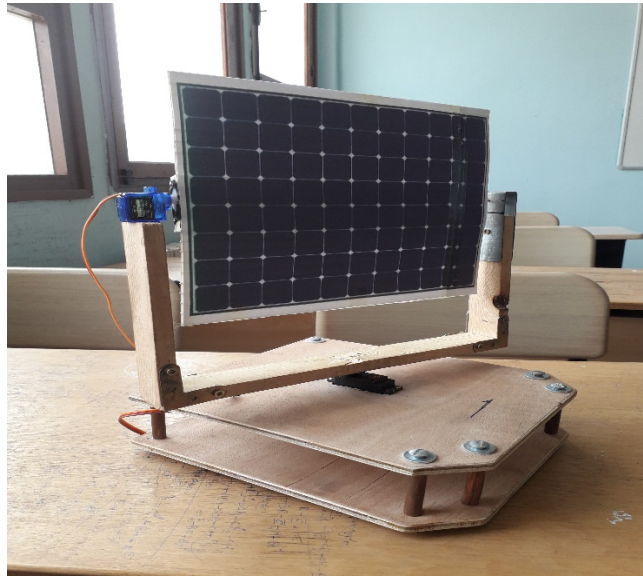


Figure (4.6) le suiveur solaire

4.6) Orientation de l'axe horizontal (élévation) et l'axe vertical (l'azimute) :

Les deux servomoteurs utilisés sont bidirectionnels, l'un nous servira pour le déplacement azimutal et l'autre pour l'élévation. Les servomoteurs sont réglables ce qui signifie qu'ils sont contrôlés par le programme d'Arduino après avoir extrait la position horizontale et verticale depuis la carte SD. Ce dernier leur ordonnera le sens, la direction du déplacement à effectuer pour trouver la position du rayonnement maximal et assurera la poursuite du point maximum. Une fois ce point est atteint les servomoteurs seront arrêtés.

4.7) Conclusion :

La réalisation du suiveur de soleil nécessite un bon choix du composant électronique utiliser pour ne pas compliquer le principe de commande et pour réduire la consommation de l'énergie consommé par le suiveur.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce rapport porte sur « Commande de la position d'un panneau solaire à l'aide d'une carte arduino ».

Le but de ce travail c'est la mise en œuvre d'une solution technique permettant de transformer un panneau photovoltaïque fixe en un panneau mobile afin d'améliorer son rendement.

L'utilisation de ce mécanisme de poursuite solaire permet de récupérer une partie d'énergie supplémentaire par rapport aux systèmes fixes, incliné ou horizontal.

Ce projet de fin d'études était pour nous l'occasions précieuse de faire un travail multi disciplinaire en associant l'instrumentation, l'électronique, l'automatique, la mécanique, la programmation et les énergies renouvelables et même le travail en collaboration avec des étudiants d'autre département sous la direction de notre promotrice. En perspective, on souhaite d'améliorer notre instrument on utilisent des matériaux solide pour la construction de la partie mécanique et des moteur pas à pas et aussi en ajoutant un système de protection contre le changement brusque du climat et qu'il soit autonome.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. LAKDER LOUAZENE, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla » ", Mémoire de magister en électrotechnique, Université El Hadj Lakhdar – Batna, 2008.
- [2] Sahra Mouhamed et Djediai Lazhari Mémoire de fin d'étude « Optimisation d'un Système poursuit solaire appliquée au champ photovoltaïque » Université de Ouargla, 2011
- [5] : A. Tsamda, K. Mahmoud « Développement d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïques », Mémoire d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique, Département de Génie Electrique, Promotion Juin 2007, Ecole Nationale Polytechnique Alger.
- [6] A. Labouret, M. Viloz « Energie Solaire Photovoltaïque ». 2eme édition, Dunod, Paris 2003/2005.
- [9] [Soufi Adel, Mémoire de fin d'étude « Modélisation et Control System photovoltaïque par l'espace d'ETA », Université de Ouargla, 2012
- [12] <http://www.egcf-rousseau.com> Antony, C, Durschner-karl, H, Remmers le photovoltaïque pour tous 2006.
- [13] Sekhri Toufik, Mémoire de fin d'étude, « Etude comparatif entre deux concentrateur solaire»Université de Ouargla, 2012
- [14] Roshanak Radbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008
- [15] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ». Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008., Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays ». IEEE Transaction on power electronics, Vol.24, No 5, 1198-1208, May 2009
- [16] Thibaut Desrues « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de

Lyon, 2009., Rémi Bettignies « Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués ». Thèse de doctorat, Ecole Doctorale d'Angers ,2003

[17] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ». Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008., Akassewa Tchapo Singo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010

[18] : chiba younes,mémoire de magister, «étude de l'utilisation d'un bassin d'eau comme capteur solaire» universite mentouri constantine 2005

[19] Jean- Noël, « livret Arduino en français », centre de ressources art sensitif.

[20] krama-Gougui « Etude et réalisation d'une carte de contrôle par Arduino via le système Androïde »

[21] Confort Thermique – Jacques Teller, Université de Liège

Résumé :

L'objectif de notre travail est la réalisation d'un suiveur solaire commandé par une carte arduino pour améliorer le rendement du panneau photovoltaïque en poursuivant la trajectoire de soleil.

Notre travail est constitué de deux principales parties

- Partie commande : carte arduino , horloge à temps réel (RTC), support carte mémoire (shield sd).

- Partie mécanique : deux servomoteurs et deux supports qui portent les deux servomoteurs.

Mots clés :

Suiveur solaire, carte arduino , cellule photovoltaïque, panneau photovoltaïque, générateur photovoltaïque, panneau solaire.