

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE Technologie
DEPARTEMENT Electronique

N° :



FILIERE: Electronique
OPTION: Instrumentation

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master

Par :

Boukharouba Nadhir / Halmouche Abdelkarim

THÈME

Etude et simulation d'un système de
poursuite solaire

Soutenu devant le jury composé de :

Pr .Guermat Noubel	Université M^{ed} Boudiaf –M'sila	Président
Dr .Kebaili Farida	Université M^{ed} Boudiaf –M'sila	Rapporteur
Dr.Kahlouche Ahmed.	Université M^{ed} Boudiaf –M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

Résumé

Les panneaux photovoltaïques sont largement utilisés en tant qu'une énergie renouvelable propre en préservant l'environnement, et efficace en termes de productivité et de durée de vie. Cependant, l'exploitation maximale de ces panneaux ne peut être atteinte sans avoir appel à des systèmes électromécaniques. Dans ce contexte, l'emploi des suiveurs solaires améliore d'une façon considérable le rendement énergétique de ces panneaux photovoltaïques.

Le but de ce travail est d'étudier un traqueur solaire à deux axes qui nous permettra de suivre le mouvement du Soleil pendant la journée et en toutes saisons. Ces mouvements permettent au panneau solaire de rester constamment face au soleil, donc un maximum de rayons solaires a été récupéré à la surface de ce suiveur pour générer un maximum d'énergie électrique.

Cette optimisation du panneau solaire en suivant le soleil est l'avantage du tracker par rapport au panneau fixe.

On a ajouté le Contrôleur de charge MPPT pour assurer le fonctionnement de notre système et optimiser la durée de vie de la batterie.

La simulation du circuit du suiveur solaire nous a montré une bonne concordance avec d'autres résultats de simulation tirés de la littérature. Ceci nous confirme le bon fonctionnement de notre suiveur solaire.

Mots clés : Suiveur solaire, un traqueur solaire à deux axes, Contrôleur de charge MPPT, Panneaux photovoltaïques, énergie solaire.

Abstract

Photovoltaic panels are widely used as clean renewable energy, preserving the environment, and efficient in terms of productivity and lifespan. However, the maximum exploitation of these panels cannot be achieved without using electromechanical systems. In this context, the use of solar trackers considerably improves the energy efficiency of these photovoltaic panels.

The purpose of this work is to study a two-axis solar tracker that will allow us to follow the movement of the Sun during the day and in all seasons. These movements

allow the solar panel to remain constantly facing the sun, so a maximum of solar rays has been collected on the surface of this tracker to generate a maximum of electrical energy.

This optimization of the solar panel by following the sun is the advantage of the tracker compared to the fixed panel.

We added the MPPT Charge Controller to keep our system running and optimize battery life.

The simulation of the solar tracker circuit showed us a good agreement with other simulation results drawn from the literature. This confirms the proper functioning of our solar tracker.

Key words: Solar tracker, Two-axis tracker, MPPT Charge Controller, Photovoltaic panels, Solar energy.

ملخص

تستخدم الألواح الكهروضوئية على نطاق واسع كطاقة متجددة نظيفة ، وتحافظ على البيئة ، وتتسم بالكفاءة من حيث الإنتاجية والعمر الافتراضي. ومع ذلك ، لا يمكن تحقيق أقصى استفادة من هذه الألواح دون استخدام الأنظمة الكهروميكانيكية. في هذا السياق ، يؤدي استخدام أجهزة التعقب الشمسية إلى تحسين كفاءة الطاقة لهذه الألواح الكهروضوئية بشكل كبير.

الغرض من هذا العمل هو دراسة متعقب شمسي ثنائي المحاور يسمح لنا بمتابعة حركة الشمس خلال النهار وفي جميع الفصول. تسمح هذه الحركات للوحة الشمسية بالبقاء في مواجهة الشمس باستمرار ، لذلك تم جمع الحد الأقصى من الأشعة الشمسية على سطح جهاز التعقب هذا لتوليد أقصى قدر من الطاقة الكهربائية.

يعد هذا التحسين للوحة الشمسية باتباع الشمس ميزة المتتبع مقارنة باللوحة الثابتة.

أضفنا متحكم الشحن MPPT للحفاظ على تشغيل نظامنا وتحسين عمر البطارية.

أظهرت لنا محاكاة دائرة التعقب الشمسي اتفاقاً جيداً مع نتائج المحاكاة الأخرى المستمدة من الدراسات. هذا يؤكد الأداء السليم لجهاز تعقب الطاقة الشمسية الخاص بنا.

الكلمات المفتاحية : متعقب الطاقة الشمسية, متعقب شمسي ثنائي المحاور, متحكم الشحن MPPT, الألواح الكهروضوئية, الطاقة الشمسية

Remerciements

Tout d'abord, Nous remercions ALLAH miséricorde de nous avoir donné la volonté, le courage et la patience qui nous ont permis de réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Dr. Kebaili Farida d'avoir proposé ce sujet, et dirigé notre travail durant la période d'élaboration de ce mémoire. Nous exprimons notre profonde gratitude pour nous avoir fait profiter de ces connaissances, mais aussi de sa méthode de travail, et surtout de sa rigueur scientifique.

Nos remerciements s'adressent également à tous les membres de Jury, qui ont accepté de juger notre travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électronique.

Enfin, nos remerciements A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Dédicaces

On voudrait dédier ce modeste travail à tous ceux qui sont chers à nos cœurs, qui ont pris soin de nous et qui ont tout sacrifié pour nous, nos chères mamans.

A nos papas qui nous ont soutenus tout le long de nos cursus scolaire et universitaire et qui ont su donner tant d'efforts pour notre bien et réussite.

A nos frères et sœurs qui sont chers à nos cœurs.

À toute la famille Boukharouba et Halmouche

À tous nos amis qui nous ont accompagnés Le long de nos cursus.

À tous nos professeurs de l'école primaire à l'université.

À tous ceux qui sont chers à nos cœurs.

Table des matières

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Energie et environnement

I.1. Introduction.....	3
I.2. Energie et environnement	3
I.2.1. Définition de L'énergie.....	3
I.2.2. Source de l'énergie	3
a) Énergie Fossile	3
b) Énergie Renouvelables.....	4
I.3. Les énergies renouvelables	5
I.3.1. Définition	5
I.3.2. Les cinq Familles de l'énergie renouvelable.....	5
a) Énergie solaire.....	5
b) Énergie éolienne.....	6
c)Énergie hydraulique	6
d) Biomasse	6
I.4. Energie solaire	6
I.4.1. L'énergie solaire Thermodynamique	6
I.4.2. L'énergie solaire photovoltaïque	7
I.5. Le rayonnement solaire	7
I.6. Le rayonnement solaire en Algérie	10
I.7. Le mouvement Terre-Soleil	12
I.8. Le mouvement apparent du Soleil	14
I.9. Conclusion	15

Chapitre II : Le Panneau photovoltaïque et le Suiveur solaire

II.1. Introduction	16
II.2. Les Cellules photovoltaïque	16
II.2.1. L'effet photovoltaïque	17
II.2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	18
II.2.3. Modélisation de la cellule photovoltaïque	19
II.2.4. Les différentes Caractéristiques d'une cellule solaire	20
II.3. Les différents types des cellules photovoltaïques	22
II.3.1. Les cellules photovoltaïques monocristallins	22
II.3.2. Les cellules photovoltaïques polycristallins	22
II.3.3. Les cellules solaires amorphes	22

II.4. Regroupement de cellules photovoltaïques	22
II.4.1. Regroupement en série des cellules	22
II.4.2. Regroupement de cellules en parallèle	23
II.4.3. Regroupement mixte	24
II.5. Modules et panneaux photovoltaïques	25
II.6. Les Suiveurs Solaire	26
II.6.1. Définitions	26
II.6.2. Le principe de fonctionnement du suiveur solaire	27
II.6.3. L'intérêt des suiveurs solaires	27
II.6.4. Les types des suiveurs solaires	28
II.6.4.1. Suiveur passif	29
II.6.4.2. Suiveur actif	29
II.6.5. Classification des suiveurs actifs	30
II.6.5.1. Selon le nombre des axes de rotation	30
a) Suiveur solaire mono-axe	30
b) Suiveur solaire double axe	31
II.6.5.2. Selon le principe de suivi	31
a) Suiveur à boucle ouvert	31
b) Suiveur à boucle fermée	32
c) Suiveur hybride	32
II.7. Constitution du suiveur solaire	32
II.7.1. Partie électronique	32
II.7.1.1. Capteur LDR	32
a) Emplacement des LDR sur les PV	33
II.7.2. Carte de commande	34
II.7.2.1. Définition de la carte Arduino	34
II.7.2.2. Types de cartes Arduino	34
II.7.2.3. Arduino Uno	35
II.7.2.4. Câble USB	36
II.7.2.5. Fils de pin d'Arduino	37
II.7.3. Partie Programmation	37
II.7.4. Partie mécanique	38
II.7.4.1. Servomoteur	38
a) Description	38

b) Principe de fonctionnement d'un servomoteur	39
II.7.5. Régulateur de charge	40
II.7.5.1. Définition	40
II.7.5.2. Fonctionnement du Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking)	40
II.8. Conclusion	41
Chapitre III : Résultats et interprétation	
III.1. Introduction	42
III.2. Conception du suiveur	42
III.3. Les logiciels utilisés	42
III.3.1. Le logiciel Arduino IDE	42
a) L'interface	43
b) Les boutons du logiciel	43
III.3.2. Le Logiciel Proteus	43
III.3.2.1 Lancement du module Proteus	44
III.3.2.2 Rôle du logiciel Proteus	44
III.3.2.3 Composantes de l'interface du logiciel Proteus	45
III.3.2.4. Organisation de la boîte à outils	46
a) Menu commande	48
b) Mode principal Mode gadgets ou accessoires.....	49
c) Mode graphique Orientation des objets.....	50
III.3.2.5. Définir les caractéristiques du projet et des schémas	50
III.3.2.6. Bibliothèques de composants	51
III.3.2.7. Sélection des composants	52
III.4. Simulation du suiveur en Proteus	52
III.4.1. Processus de suivi	53
III.5. Simulation du contrôleur de charge MPPT en Proteus	57
III.5.1. La conception du contrôleur de charge	58
III.5.1.1. Principe de fonctionnement de Buck Converter	59
a) Lorsque le MOSFET est activé	59
b) Lorsque le MOSFET est désactivé	60
III.5.1.2. L'organigramme du contrôleur de charge	61
III.5.2. Simulation de la performance du suiveur par le PVGIS	62
III.5.2.1. Résultat obtenu par la simulation	63
a) Entrées fournies	63

b) Résultats de la simulation du suiveur a doublé axe	64
c) Résultats de la simulation du système PV fixe	64
III.5.2.3. Calcul d'ensoleillement reçu sur chaque type	67
III. 6. Conclusion	68
Conclusion Générale	69
Références	

Liste des tableaux et des figures

Liste des tableaux :

Tableau (I.1) : Potentiel solaire en Algérie.	11
Tableau (III.1) : Entrées fournies	63
Tableau (III.2) : Résultats de la simulation du suiveur a doublé axe.	64
Tableau (III.3) : cause de changements de la production du suiveur a doublé axe.	64
Tableau (III.4) : Résultats de la simulation du système PV fixe.	64
Tableau (III.5) : cause de changements de la production du système PV fixe.	65
Tableau (III.6) : Énergie PV et irradiation solaire mensuelle.....	65
Tableau (III.7) : les mesures d'Irradiation reçu sur chaque type.....	68

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure (I.1) : Mine d'uranium	4
Figure (I.2) : Torches de brûlage de puits de Pétrole	4
Figure (I.3) : Panneaux solaires et Eolienne.....	4
Figure (I.4) : Trajectoire de rayonnement sur la terre.	8
Figure (I.5) : une poignée de crayons tenus dans la main au-dessus d'une feuille de papier.	9
Figure (I.6) : pourcentage du rayonnement en fonction de l'angle	9
Figure (I.7) : Les types de rayonnement solaire.	10
Figure (I.8) : Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien au mois de Juillet.....	11
Figure (I.9) : La course de la Terre autour du Soleil.	12
Figure (I.10) : La course de la Terre autour du Soleil Aux équinoxes de printemps et d'automne.	12
Figure (I.11) : La course de la Terre autour du Soleil Au solstice d'été.	13
Figure (I.12) : La course de la Terre autour du Soleil Au solstice d'hiver.....	13
Figure (I.13) : La course de la Terre autour du Soleil au des variations saisonnières.....	14
Figure (I.14) : Azimut et hauteur de Soleil.....	15
Figure (I.15) : Hauteur et Azimut du soleil.	15
Chapitre II :	15
Figure (II.1) : Principe de L'effet photovoltaïque	18
Figure (II.2) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	19
Figure (II.3) : Circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque	20

Figure (II.4) : Intensité et puissance d'une cellule à l'ombre et éclairée En fonction de la tension.	21
Figure (II.5) : Schéma d'un module formé d'un regroupement de N_s cellules en série	23
Figure (II.6) : Caractéristique courant-tension $I(v)$ d'un regroupement de « N_s » cellules en série	23
Figure (II.7) : Schéma d'un module formé d'un regroupement de « N_p » cellules en Parallèle	23
Figure (II.8) : Caractéristique courant-tension d'un Groupement de « N_p » cellules en Parallèle.	24
Figure (II.9) : Association des cellules PV mixtes (série-parallèle).....	24
Figure (II.10) : Caractéristique d'un assemblage série/parallèle de n_s et n_p cellules PV identiques.....	25
Figure (II.11) : constitués d'un panneau solaire.....	26
Figure (II.12) : Panneaux avec suiveur solaire	27
Figure (II.13) : la production électrique.	28
Figure (II.14) : Les types des suiveurs solaires.	28
Figure (II.15) : Exemple et fonctionnement du suiveur passif.	29
Figure (II.16) : Exemple et fonctionnement du suiveur actif.	30
Figure (II.17) : Suiveur solaire mono-axe.	30
Figure (II.18) : Suiveur solaire double axe.....	31
Figure (II.19) : Commande en boucle ouverte.	31
Figure (II.20) : Commande en boucle fermée.	32
Figure (II.21) : Capteur LDR	33
Figure (II.22) : Caractéristique d'un LDR.	33
Figure (II.23) : Capteurs en quatre quadrants en forme (+).....	33
Figure (II.24) : Capteurs en quatre quadrants en forme (\times).....	33
Figure (II.25) : deux capteurs séparés.	34
Figure (II.26) : Arduino UNO	35
Figure (II.27) : Arduino Méga	35
Figure (II.28) : Arduino Nano	35
Figure (II.29) : Arduino Leonardo	35
Figure (II.30) : Red Board	35
Figure (II.31) : Arduino Lily Pad	35
Figure (II.32) : La carte Arduino uno.....	36
Figure (II. 33) : Cable USB type A/B (Arduino UNO).	36
Figure (II. 34) : Fils de pin d'Arduino.....	37

Figure (II.35) : Plaque d'essai	37
Figure (II.36) : description générale d'un servomoteur.....	39
Figure (II.37) : l'angle de l'axe du servomoteur en fonction de la largeur de l'impulsion.	39
Figure (II.38) : courbe de charge MPPT.	42
Chapitre III :	
Figure (III.1) : L'interface du logiciel Arduino.....	45
Figure (III.2) : Les boutons du logiciel Arduino.	46
Figure (III.3) : Les fenêtres composant l'interface du logiciel Proteus.	48
Figure (III.4) : Schéma électrique du système suiveur simulé en ISIS Proteus	53
Figure (III.5) : Condition pour LDR1 supérieure aux autres capteurs.	54
Figure (III.6) : Condition pour LDR2 supérieure aux autres capteurs.	54
Figure (III.7) : Condition pour LDR3 supérieure aux autres capteurs.	55
Figure (III.8) : Condition pour LDR4 supérieure aux autres capteurs.	56
Figure (III.9) : Condition lorsque tous les capteurs LDR ont reçu la même intensité Lumineuse	57
Figure (III.10) : Schéma électrique du contrôleur de charge MPPT simulé en ISIS Proteus. ...	57
Figure (III.11) : un convertisseur abaisseur (Buck Converter).....	59
Figure (III.12) : l'état du convertisseur lorsque le MOSFET est activé.....	59
Figure (III.13) : l'état du MPPT Lorsque le MOSFET est activé	60
Figure (III.14) : l'état du convertisseur lorsque le MOSFET est désactivé.	60
Figure (III.15) : l'état du MPPT lorsque le MOSFET est désactivé.	61
Figure (III.16) : Organigramme de commande du contrôleur de charge MPPT.	62
Figure (III.17) : Interface PVGIS lorsque vous accédez pour la première fois à l'application Web.	63
Figure (III.18) : Irradiation mensuelle du système PV.....	66
Figure (III.19) : Production électrique mensuelle du système PV.....	67
Figure (III.20) : Quantité d'énergie reçue et interceptée par dual axes suiveur et panneau fixe.	69

Liste de Abréviations :

Abréviations	Notations
H	Hauteur
N	La borne négative
P	La borne positive
I_{sat}	Le courant de saturation
V_t	Le potentiel thermo dyn
K	La constante de Boltzmann
T	La température effective de la Cellule en Kelvin,
e	La charge de l'électron
n	Le facteur de non idéalité de la jonction
I_{celle}	Le courant fourni par la cellule
V_{cell}	La tension à ses bornes
I_{cc}	Le courant de court-circuit de la cellule
R_p	La résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction
R_s	La résistance série
PV	Panneaux photovoltaïques
η	Le rendement
FF	Le facteur de forme
LDR	Light dépendant Résistor
PWM	Pulse Width Modulation
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPP	Maximum Power Point
DC	Courant continu
CAO	Conception Associé par Ordinateur
α	Angle d'inclinaison
β	Angle d'azimut

Introduction Générale

Introduction Générale :

La production de l'électricité par des énergies solaires est primordiale car elle permet d'alimenter en énergie renouvelable les consommateurs qui sont en plein croissance sur cette planète. C'est pour cela que les états et les gouvernements sont penchés sur le développement et l'exploitation de ce type d'énergie à cause de sa durabilité d'approvisionnement en respectant les normes écologiques [1].

Néanmoins, ce type d'énergie n'est pas disponible en même quantité durant toute la journée, pendant le long de l'année et dans les différentes zones ou lieux géographiques, Cependant il est nécessaire de l'analyser et de trouver des solutions pour son rendement limité afin de l'optimiser [2].

L'une de ces solutions est, le suiveur solaire qui permet de suivre le soleil comme un tournesol afin de produire l'énergie maximal.

Dans ce travail, nous présentons la simulation d'un suiveur automatique destiné pour les modules solaires photovoltaïques. L'objectif visé est l'amélioration du gain en énergie électrique des systèmes photovoltaïque par rapport au système utilisant un générateur photovoltaïque fixe. Notre dispositif d'instrument a été fixé sur une structure mécanique que nous avons réalisée à base de deux servomoteurs à courant continue avec leurs circuits de commande. Le système simulé est capable de suivre fidèlement la position du soleil toute au long de la journée, et il assure à chaque instant une adaptation entre la source et la charge par un contrôleur de charge au point de fonctionnement de la puissance maximale.

Une carte électronique à base d'un microcontrôleur a été également réalisée pour piloter le dispositif et permettre la poursuite solaire aveugle et sensible. Une chaîne d'acquisition de données a été montée pour collecter tous les paramètres issus du système afin de connaître le comportement du prototype avec la méthode de poursuite solaire adoptée.

Aussi, Les panneaux solaires sont une technologie intéressante pour réduire ses factures et adopter une attitude plus écologique. Mais pour avoir une production optimale, il faut entretenir nos panneaux solaires. Comme tous les objets d'extérieurs, nos panneaux prennent la poussière, la pollution, les feuilles mortes. Malheureusement ça on ne peut rien y faire. Mais ce dépôt accumulé sur les panneaux, les empêche de capter

correctement les rayons du soleil et diminue la production d'énergie. Nous devons donc assurer que nos panneaux sont toujours propres. C'est pour ça, comme perspective, pour les nettoyer on suggère de faire un système qui les nettoie avec un balai télescopique.

Afin d'aboutir n'aux objectifs fixés, nous avons organisé notre mémoire de la manière suivante :

- Le premier chapitre, dans lequel on va aborder l'énergie solaire, le rayonnement solaire, les généralités sur le photovoltaïque.
- Le second chapitre sera consacré à notre conception et l'étude des blocs constituant notre système.
- Dans le troisième chapitre, nous allons regrouper et discuter les résultats de simulation de notre système de suivi en Proteus.
- Enfin, on présente une conclusion générale qui résume l'ensemble des tâches réalisées.

Chapitre I

Energie et environnement

I.1. Introduction :

Nous sommes tous entourés d'énergie : dans notre corps, notre maison, notre environnement... Elle est là, dans notre quotidien, mais qu'est-ce que l'énergie ? Quelles sont les formes de l'énergie ? Ses sources ? Que signifient les expressions " énergies renouvelables", "énergies non-renouvelables, énergies fossiles".

Dans ce chapitre nous répondrons à toutes ces questions.

I.2. Energie et environnement :

I.2.1. Définition de L'énergie :

L'énergie se manifeste par la production de chaleur, de travail ou de rayonnement. Depuis qu'il a domestiqué le feu, l'homme utilise des matières premières (bois, puis charbon, pétrole, uranium, etc.) et des phénomènes naturels (vent, rayonnement solaire, marées, etc.) pour en tirer de l'énergie. Mise en jeu dans l'ensemble des activités humaines contemporaines, cette énergie extraite du milieu naturel pose actuellement deux problèmes fondamentaux : celui de l'épuisement de ses sources principales et celui de l'impact croissant de la consommation humaine sur l'environnement. [3].

I.2.2. Source de l'énergie :

Les sources d'énergie se répartissent en deux grands segments : les matières premières et les phénomènes naturels. De manière générale, les premières fournissent les énergies dites fossiles alors que les secondes fournissent les énergies dites renouvelables. [4].

a) Énergie Fossile :

Les énergies fossiles proviennent de la combustion de matières premières comme le charbon, le pétrole ou encore le gaz naturel. Ces combustibles sont le résultat d'un processus de fossilisation qui a pris plusieurs millions d'années, c'est pourquoi on les appelle « combustibles fossiles » produisant de « l'énergie fossile ». Les réserves en matières premières sont abondantes, mais malheureusement non renouvelables.

Les énergies fossiles sont donc polluantes et leurs réserves ne sont pas infinies. Le gaz naturel est aujourd'hui l'énergie fossile la moins polluante, du fait de ses émissions de CO₂ réduites. Ce type d'énergie est présenté aujourd'hui comme un bon complément

aux énergies renouvelables, dont la production est intermittente, du fait de sa flexibilité.
[4].



Figure (I.1) : Mine d'uranium



Figure (I.2) : Torches de brûlage de puits de
Pétrole

b) Énergie Renouvelables :

Les énergies renouvelables, comme leur nom l'indique, ne sont pas tarissables. Appelées aussi « énergies vertes » ou « énergies propres » car provenant des phénomènes naturels (vent, rayonnement solaire, force des courants marins), elles ne causent aucune pollution directe).[3]



Figure (I.3) : Panneaux solaires et Eolienne

C'est pour ça L'utilisation d'énergies renouvelables, à la place ou en complément des énergies fossiles, parait être une bonne solution pour diminuer les rejets de CO2, Dans la suite on va donner un aperçu général sur les énergies renouvelable et notamment l'énergie renouvelable produit par les panneaux photovoltaïques.

I.3. Les énergies renouvelables :

I.3.1. Définition :

Les énergies renouvelables (ou EnR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou re constituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées. On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine. [5].

Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres ».

I.3.2. Les cinq Familles de l'énergie renouvelable :

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes.

a) *Énergie solaire :*

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du solaire et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaire est captée est rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité.[6].

b) Énergie éolienne :

Dans le cas de l'énergie éolienne, l'énergie cinétique du vent entraîne un générateur qui produit de l'électricité. Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables éoliennes : les éoliennes terrestres, les éoliennes off-shore, les éoliennes flottantes... Mais le principe reste globalement le même pour tous ces types d'énergies renouvelables. [6].

c) Énergie hydraulique :

L'énergie cinétique de l'eau (fleuves et rivières, barrages, courants marins, marées) actionne des turbines génératrices d'électricité.

Les énergies marines font partie des énergies hydrauliques.[6].

d) Biomasse :

L'énergie est issue de la combustion de matériaux dont l'origine est biologique (ressources naturelles, cultures ou déchets organiques). On en distingue trois catégories principales :

- Le bois
- Le biogaz
- Les biocarburants

e) Géothermie:

L'énergie est issue de la chaleur émise par la Terre et stockée dans le sous-sol. Selon la ressource et la technologie mise en œuvre, les calories sont exploitées directement ou converties en électricité. [6]

Comme nous l'avons dit plus tôt, Les énergies renouvelables peuvent jouer un rôle plus important aujourd'hui, et nous étudierons un type d'énergie renouvelable, qui est l'énergie solaire.

I.4. Energie solaire :

Ce type d'énergie renouvelable est généré directement par le rayonnement solaire. L'énergie solaire est exploitée selon deux principaux modes de fonctionnement :

I.4.1. L'énergie solaire Thermodynamique :

L'énergie thermique du soleil permet aussi de produire de l'électricité par voie thermodynamique. Dans ce cas, la conversion de l'énergie solaire en électricité n'est pas directe mais passe par l'intermédiaire de centrales thermiques solaires de différents types.

Le principe de base utilisé, connu depuis l'antiquité, est l'obtention de température élevée par la concentration du rayonnement solaire en un seul foyer. Cela rend possible Le réchauffement de fluides caloporteurs à des températures allant de 250 à 1000°C ces fluides transportent la chaleur vers un réservoir d'eau, il y a alors production de vapeur d'eau qui entraînera un turboalternateur pour produire de l'électricité comme dans les centrales thermiques conventionnelles. [7]

I.4.2. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule).

L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers. [7]

Chaque fois que nous parlons d'énergie solaire, nous parlons du rayonnement solaire

Alors qu'est-ce que c'est un rayonnement solaire ?

I.5. Le rayonnement solaire :

Les théories actuelles présentent le rayonnement solaire comme une émission de particules. Ce flux de particules, appelées photons, atteint la terre avec différentes longueurs d'ondes à la quelle correspond une énergie spécifique décrite par la relation:

$$E [J] = h\nu = h \cdot c/\lambda \quad (I.1)$$

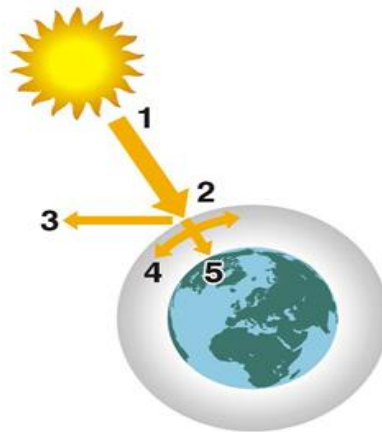


Figure (I.4) : Trajectoire de rayonnement sur la terre.

Avec,

λ : longueur d'onde [m].

ν : fréquence [Hz].

c : vitesse de la lumière [m/s].[6]

L'angle que font les rayons du Soleil avec une surface détermine la densité énergétique que reçoit cette surface. Puisque le rayonnement solaire arrive sur la Terre sous forme d'un faisceau parallèle, une surface perpendiculaire à ces rayons intercepte la densité maximale d'énergie. Et si l'on incline la surface à partir de cette position perpendiculaire, son éclaircissement diminue. Le meilleur moyen de représenter ce phénomène consiste peut-être à figurer les rayons parallèles du Soleil par une poignée de crayons tenus dans la main au-dessus d'une feuille de papier, pointes en bas. Les marques faites par les pointes représentent des grains d'énergie. Lorsque les crayons sont perpendiculaires à la feuille, les pointes sont serrées au maximum : la densité d'énergie par unité de surface est la plus grande. Lorsqu'on incline ensemble tous ces crayons parallèles, les pointes s'écartent et couvrent des surfaces de plus en plus allongées : la densité d'énergie diminue avec l'étalement des traces.[6]

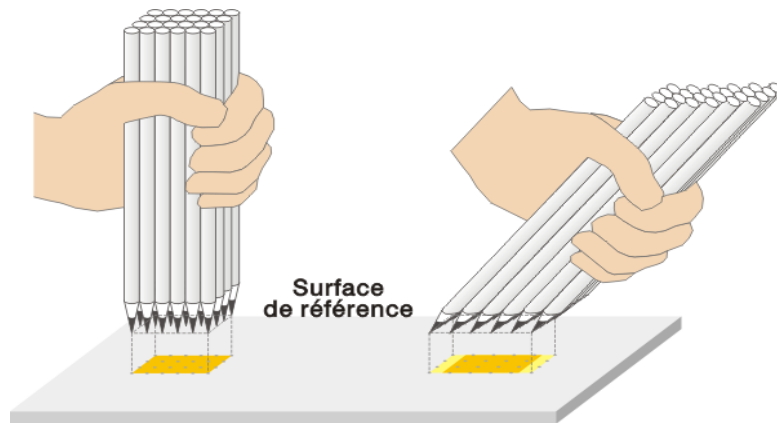


Figure (I.5) : une poignée de crayons tenus dans la main au-dessus d'une feuille de papier.

Cependant, une surface qui s'écarte de 25 % de cette position perpendiculaire au Soleil, intercepte encore plus de 90 % du rayonnement direct maximum. L'angle que font les rayons du Soleil avec la normale à la surface (angle d'incidence) déterminera le pourcentage de lumière directe interceptée par la surface. Le tableau ci-dessous donne les pourcentages de lumière interceptée par une surface pour différents angles d'incidence.

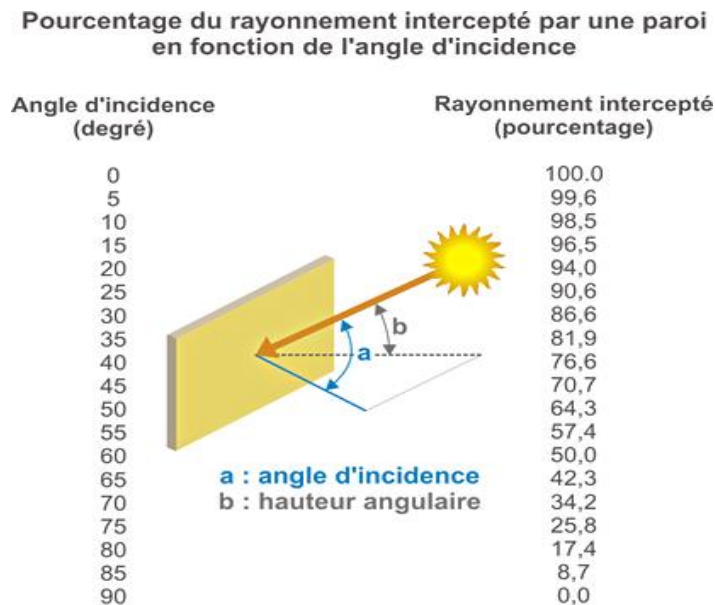


Figure (I.6) : pourcentage du rayonnement en fonction de l'angle

En réalité, le rayonnement total reçu sur une surface, appelé irradiation solaire incidente (ou encore éclairage énergétique global), est défini par la somme de trois composantes :

L'irradiation directe : provenant directement du Soleil. Cette composante s'annule si le Soleil est caché par des nuages ou par un obstacle.

L'irradiation diffuse : correspondant au rayonnement reçu de la voûte céleste, hors rayonnement direct. Cette énergie diffusée par l'atmosphère et dirigée vers la surface de la Terre, peut atteindre 50 % du rayonnement global reçu, lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, et 100 % pour un ciel entièrement couvert.

L'irradiation réfléchie : correspondant au rayonnement réfléchi par l'environnement extérieur, en particulier le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé "albedo".[6]

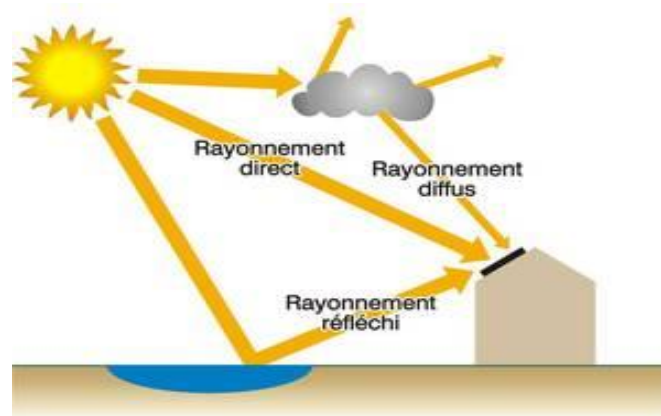


Figure (I.7) : Les types de rayonnement solaire.

I.6. Le rayonnement solaire en Algérie :

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m².an au Nord et 2650 kWh/m².an au sud du pays. Le tableau 1 résumé le potentiel solaire en Algérie. [8.9]

Hauts Plateaux	Sahara	Régions	Région côtière
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² .an)	1700	1900	2650

Tableau (I.1) : Potentiel solaire en Algérie.

Une évaluation par satellite, effectuée par l'agence spatiale allemande, a montrée que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen [7].

Il est de 169,440 Tera-Watts.heure/an (TWh/an) pour le solaire thermique et de 713,900TWh/an pour le photovoltaïque. [10]

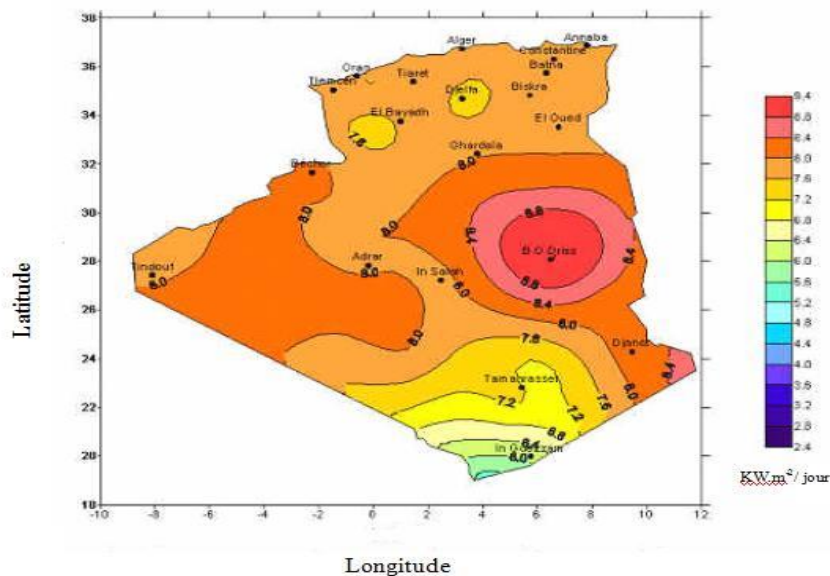


Figure (I.8) : Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien au mois de Juillet. [10]

I.7. Le mouvement Terre-Soleil :

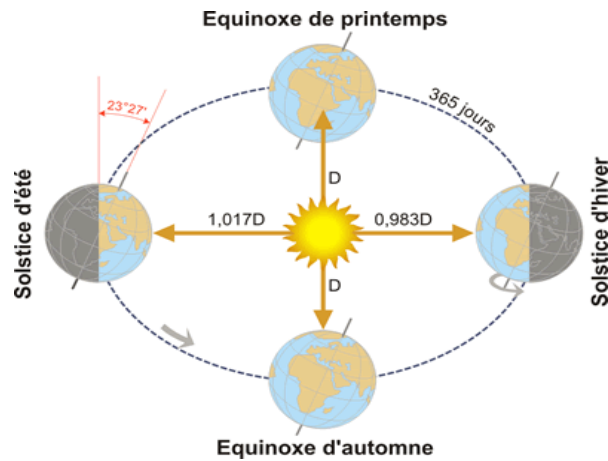


Figure (I.9) : La course de la Terre autour du Soleil.

La course de la Terre autour du Soleil décrit une ellipse légèrement aplatie. Dans cette ronde annuelle autour du Soleil, la Terre effectue un tour complet sur elle-même en 24 heures autour de l’axe des pôles. Cet axe nord – sud fait un angle de 23°27' avec la direction perpendiculaire au plan de l’orbite terrestre autour du Soleil.

Cette inclinaison est constante tout au long de la course autour du Soleil et est responsable des variations saisonnières. Ainsi pendant nos mois d’hiver, en hémisphère nord la durée d’insolation est relativement courte et le Soleil ne monte pas très haut dans le ciel, tandis que l’été règne sur l’hémisphère sud. Pendant nos mois d’été, la situation est inversée, l’hémisphère nord est tourné vers le Soleil. Les jours sont alors plus longs que les nuits dans l’hémisphère nord et le rayonnement incident se rapproche de la verticale. [6].

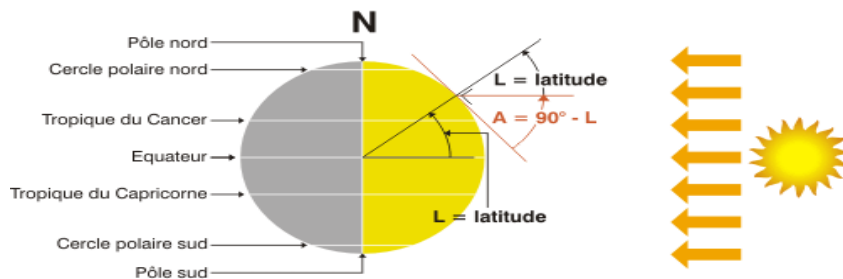


Figure (I.10) : La course de la Terre autour du Soleil Aux équinoxes de printemps et d’automne.

Aux équinoxes de printemps et d'automne (21 mars, 21 septembre), à midi, le rayonnement est perpendiculaire à l'équateur (latitude 0°) et partout sur le globe, les jours et les nuits sont de durée égale. C'est à ce moment que la hauteur du Soleil à midi est la plus facile à calculer. En effet, sa hauteur est égale à l'angle complémentaire de la latitude. [6].

$$H = 90^\circ - L \quad (\text{I.2})$$

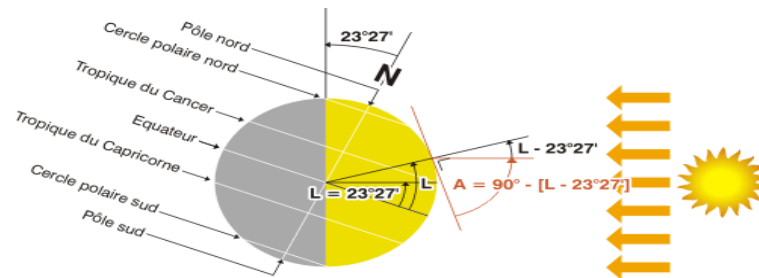


Figure (I.11) : La course de la Terre autour du Soleil Au solstice d'été.

Au solstice d'été (21 juin), la terre est inclinée vers les rayons solaires et, à midi, ceux-ci sont perpendiculaires au tropique du cancer (latitude $23^\circ 27' N$). Le Soleil ne se couche jamais dans les régions du globe situées à l'intérieur du cercle arctique (celui-ci se trouvant $23^\circ 27'$ au-dessous du pôle Nord). Une personne vivant à la latitude de $66^\circ 33' N$ ($90^\circ - 23^\circ 27'$) devrait veiller jusqu'à minuit pour voir le Soleil se promener aux alentours du nord, s'abaisser jusqu'à toucher l'horizon et commencer à s'élever de nouveau vers le secteur est du ciel. La hauteur du Soleil à midi (solaire) est de $23^\circ 27'$ supérieure à celle de l'équinoxe. [6].

$$H = 90^\circ - L + 23^\circ 27' \quad (\text{I.3})$$

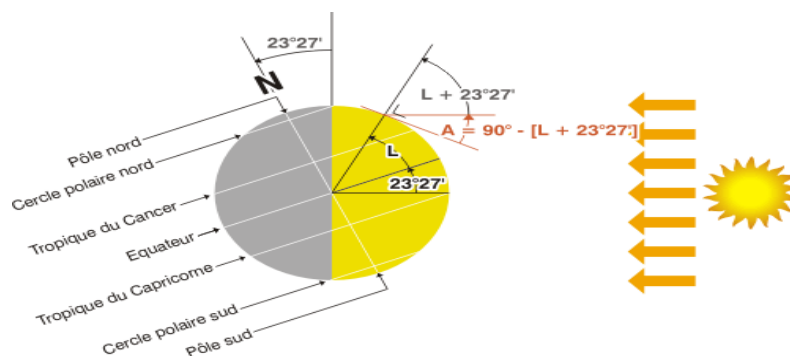


Figure (I.12) : La course de la Terre autour du Soleil Au solstice d'hiver.

Au solstice d'hiver (22 décembre), l'angle d'inclinaison est inversé et c'est le tropique du capricorne

(latitude $23^{\circ}27' S$) qui bénéficie d'un rayonnement perpendiculaire. La hauteur du Soleil à midi est de $23^{\circ}27'$ inférieure à celle de l'équinoxe.[6]

$$H = 90^{\circ} - L - 23^{\circ}27' \quad (I.4)$$

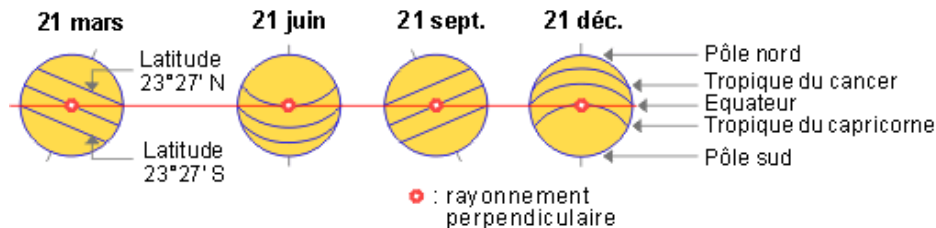


Figure (I.13) : La course de la Terre autour du Soleil au des variations saisonnières.

I.8. Le mouvement apparent du Soleil :

Pour bien comprendre et utiliser l'influence du Soleil dans le choix et le traitement d'un site, il faut bien sûr connaître à tout instant la position du Soleil dans le ciel. Cette information est indispensable pour le calcul des apports solaires, pour le choix de l'exposition d'un immeuble, l'implantation du systèmes actifs solaires (thermique ou photovoltaïque), l'aménagement des parties extérieures voisines, l'éclairage naturel des pièces intérieures, l'emplacement des fenêtres, des protections solaires et de la végétation, etc.

À un instant donné, la hauteur et l'azimut du Soleil déterminent la position du Soleil dans le ciel. Ainsi est connue la direction du rayonnement solaire et peuvent être calculées les surfaces ensoleillées du bâtiment. Ces calculs tiendront compte des effets d'ombrage dus au relief, au cadre bâti, à la végétation ou au bâtiment lui-même. En un lieu, La hauteur " α " du Soleil est l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan horizontal. Elle se compte de 0° à 90° à partir de l'horizon vers la voûte céleste. L'azimut " γ " du Soleil est l'angle créé entre le plan vertical passant à la fois par le Soleil et par le lieu considéré, et le plan vertical N-S. Cet angle vaut 0° au sud et est conventionnellement positif vers l'ouest et négatif vers l'est. [6]

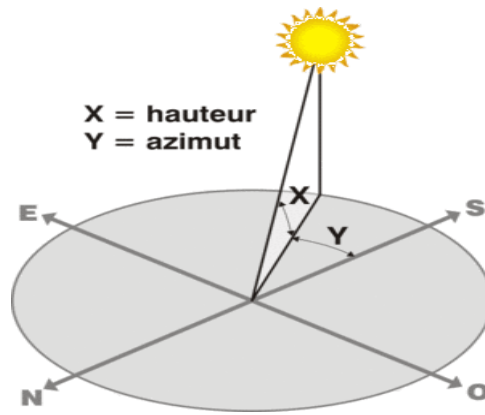


Figure (I.14) : Azimut et hauteur de Soleil.

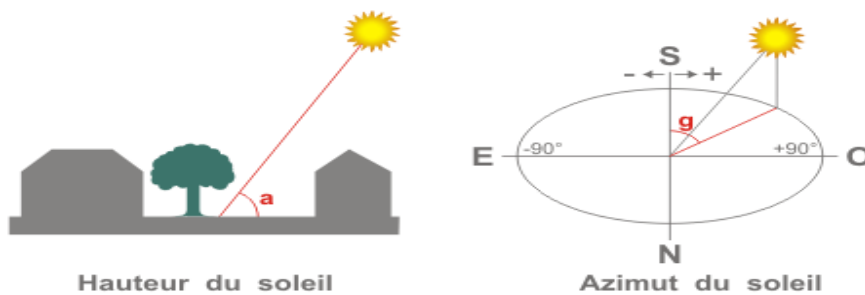


Figure (I.15) : Hauteur et Azimut du soleil.

I.9. Conclusion :

Dans ce premier chapitre de notre mémoire, nous avons détaillé plusieurs notions en relation avec l'énergie. Cette dernière, qui peut parfois s'avérer comme un concept assez complexe, possède différentes formes, sources et applications, ce qui la rend comme étant un domaine d'étude très vaste.

Ensuite, après avoir détaillé l'intime relation qui peut exister entre énergie solaire et environnement, nous sommes concentrés sur l'énergie solaire, une source qui est considéré comme la plus répandue et la plus connue des sources d'énergies dites renouvelables. En effet, cette dernière, à travers ses différentes technologies, représente l'avenir de la transition énergétique, que ça soit en Algérie ou partout dans le monde. Dans le prochain chapitre nous allons nous concentrer sur une de ces technologies, l'énergie solaire photovoltaïque, et introduire le concept de suivi solaire.

Chapitre II

**Le Panneau photovoltaïque et le
Suiveur solaire**

II.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique renouvelable, produite par les rayonnements du Soleil. La production de cette énergie peut se faire grâce aux cellules photovoltaïques, ou grâce aux panneaux solaires fixes, dont le rendement est faible. Pour optimiser le rendement, on utilise un système de poursuite en s'assurant que les panneaux sont perpendiculaires au soleil à tout moment pendant la journée et assure une adaptation entre la source et la charge au point de fonctionnement de la puissance maximale, qui s'appelle traqueur solaire.

Dans Ce chapitre nous allons présenter en premier temps le principe de fonctionnement de la cellule solaire. Ensuite, faire une description sur les suiveurs solaires (constitution, fonctionnement, les différents types des suiveurs ainsi que les méthodes de poursuite adoptée pour le fonctionnement des suiveurs solaires). Enfin, nous allons présenter les actionneurs employés dans la conception et la réalisation des suiveurs solaires.

II.2. Les Cellules photovoltaïque :

II.2.1. L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie.

La lumière du soleil se compose de photons contenant une énergie correspondant aux différentes longueurs d'onde du spectre solaire. Quand un photon heurte une cellule photovoltaïque, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule. [12].

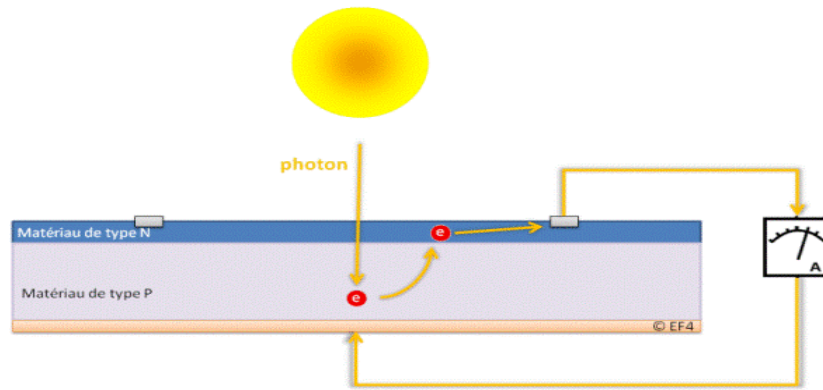


Figure (II.1) : principe de L'effet photovoltaïque.

Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome créant un « trou », qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou.[12]

II.2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons . Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ».

Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium , ils arrachent des électrons à ses atomes . Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le

circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se créé. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface. Voir le schéma.[13]

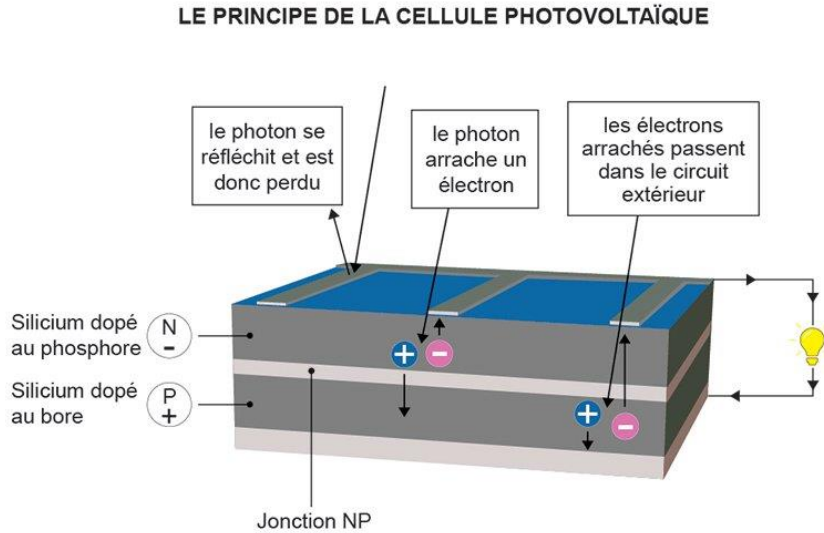


Figure (II.2) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

II.2.3. Modélisation de la cellule photovoltaïque :

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, la figure.II.12 illustre le schéma équivalent électrique d'une cellule PV réelle. Dans cette équation, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique. Ainsi, en statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante :

$$I_{cell} = I_{cc} - I_{sat} \left[\frac{\exp(V_{cell} + I_{cell} * R_s)}{n V_t} \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} * R_s}{R_p} \quad (II.1)$$

Avec :

$$V_t = \frac{kT}{e} \quad (II.2)$$

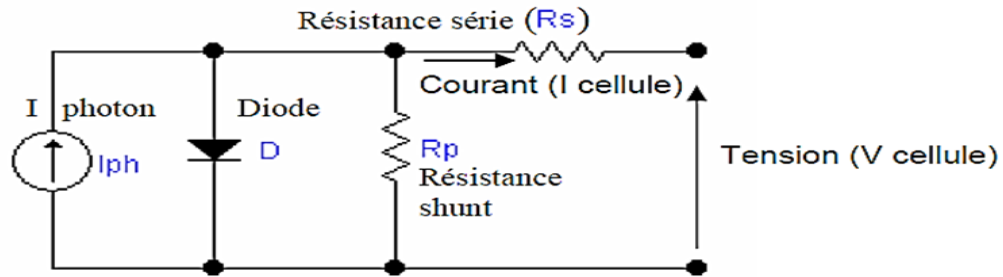


Figure (II.3) : Circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque.

Où I_{sat} : est le courant de saturation,

V_t : le potentiel thermo dyn

K : la constante de Boltzmann,

T : la température effective de la cellule en Kelvin,

e : la charge de l'électron,

n : le facteur de non idéalité de la jonction,

I_{celle} : est le courant fourni par la cellule,

V_{cell} : la tension à ses bornes,

I_{cc} : le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'éclairement et la température,

R_p : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

R_s : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions. La figure (II.3) montre la schématique classiquement adoptée pour une cellule PV élémentaire. [14]

II.2.4. Les différentes Caractéristiques d'une cellule solaire :

Le rendement η : est le rendement d'une cellule. C'est l'indicateur le plus important parce qu'il représente la proportion d'énergie électrique P_e créée par rapport à l'énergie solaire P_s reçue : $\eta = P_e / P_s$. (II.3)

Le rendement η peut être exprimé selon les facteurs suivants : [14]

$$\eta = I_{cc} V_{co} FF / P_s \quad (II.4)$$

Le Courant de court-circuit I_{cc} : est la densité volumique de courant de court-circuit, la plus grande, obtenue avec une tension presque nulle.[14]

$$I_{cc} = eG (L_n + L_p) \quad (\text{II.5})$$

La tension à circuit ouvert V_{co} : est la tension à circuit ouvert, la plus élevée, obtenue lorsque le courant ne circule pas. Elle vaut typiquement entre 600 et 700 mV. Une grande tension est, entre autres, à mettre en relation avec une faible résistance en série et une grande résistance en parallèle.[14]

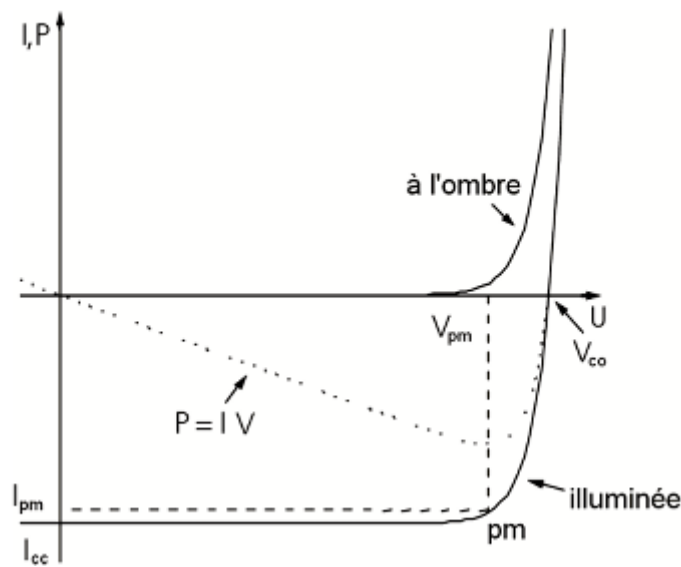


Figure (II.4) : Intensité et puissance d'une cellule à l'ombre et éclairée En fonction de la tension.

La résistance en série R_s : Elle correspond à celle que rencontrent les électrons et les trous dans la cellule. Elle rend compte de la différence de tension aux bornes de cette dernière, lorsqu'elle est à l'ombre. Elle doit être la plus faible possible.[14]

La résistance en parallèle R_p : Elle rend compte des recombinaisons dues aux imperfections de la ZCE et des bords ; elle représente le courant de fuite et doit être la plus élevée possible.

Le facteur de forme FF : c'est un paramètre important puisque son utilisation sert à qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque le rapport de la puissances maximale P_m fournie par la cellule sur le produit $I_{cc} V_{co}$.[14]

$$FF = P_m / I_{cc} V_{co} \quad (\text{II.6})$$

II.3. Les différents types des cellules photovoltaïques :

II.3.1. Les cellules photovoltaïques monocristallins :

Les panneaux solaires monocristallins sont utilisés dans les zones où l'intensité d'éclairage est élevée. Les cellules des panneaux solaires monocristallins sont en silicium pur dont le rendement énergétique se situe entre 18% et 24%, ce qui est le meilleur en termes de rentabilité [15].

II.3.2. Les cellules photovoltaïques polycristallins :

La cellule des panneaux solaires polycristallins est formée d'un groupe de cristaux de silicium de taille diverse. Ce type de plaque est le plus utilisé au monde, car il présente le meilleur rapport prix-rendement sachant que son rendement varie entre 14% et 18% [15].

II.3.3. Les cellules solaires amorphes :

Enfin, il y a les panneaux photovoltaïques à base de cellules amorphes. Ce type de plaque est utilisé dans les endroits où l'intensité lumineuse est faible. Les cellules de ce type de plaque sont en silicium gazeux avec un rendement compris entre 5% et 7%. Ces plaques se distinguent par leur couleur grise [15].

II.4. Regroupement de cellules photovoltaïques :

La tension au niveau de la cellule est de l'ordre de 0.6 à 0.7v, et pour que cette tension délivrée soit exploitable à large utilisation il est nécessaire de procéder au regroupement des cellules soit en série, soit en parallèle ou les deux en même temps.

L'assemblage de cellules photovoltaïques forme un module photovoltaïque.

II.4.1. Regroupement en série des cellules :

Dans ce type de regroupement on aura donc le courant au niveau de la charge est le même qui traverse chaque cellule. Tandis que la tension au niveau de la charge est la somme des tensions au niveau de chaque cellule. [15]

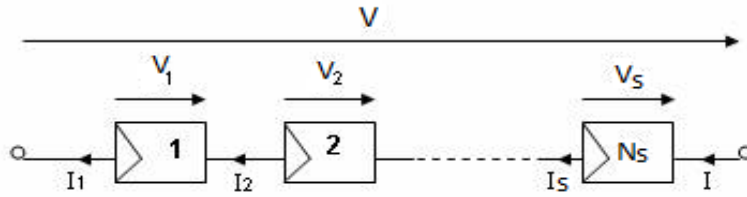


Figure (II.5) : Schéma d'un module formé d'un regroupement de N_s cellules en série.

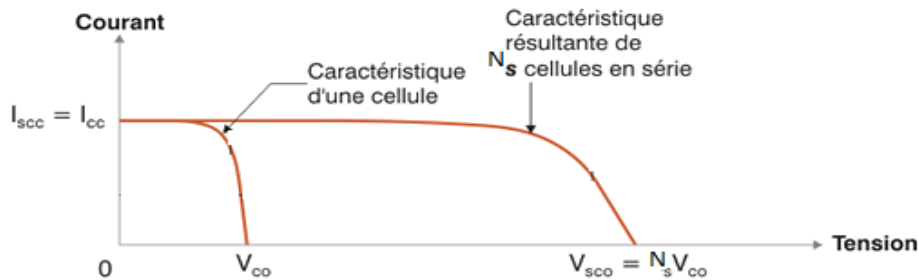


Figure (II.6) : Caractéristique courant-tension $I(v)$ d'un regroupement de « N_s » cellules en série.

Avec N_s représente le nombre de cellule en série,

La caractéristique courant-tension de ce groupement de cellule garde le même courant et la tension représente la multiplication de la tension d'une seule cellule par le nombre de cellule N_s .

II.4.2. Regroupement de cellules en parallèle :

Le courant total fourni à la charge représente la somme des courants générés par chaque cellule tandis que la tension au niveau de cette charge est la même que celle au niveau de chaque cellule. [15]

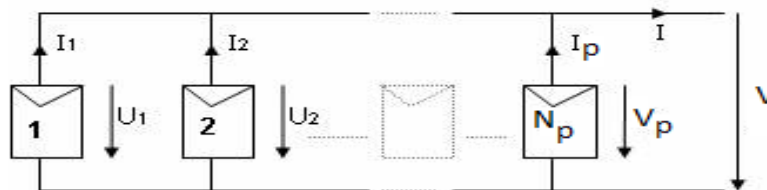


Figure (II.7) : Schéma d'un module formé d'un regroupement de « N_p » cellules en Parallèle.

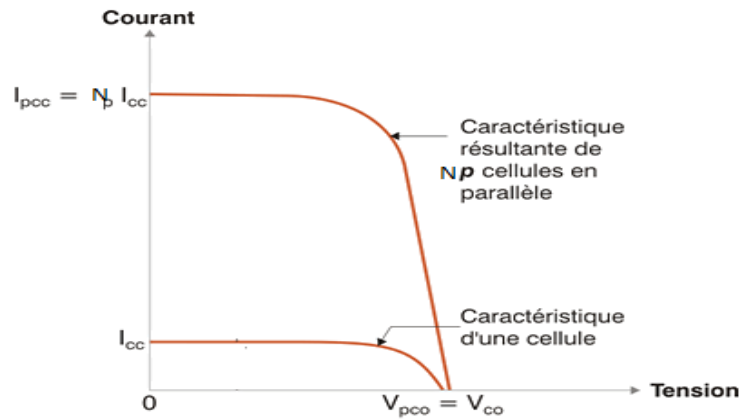


Figure (II.8) : Caractéristique courant-tension d'un Groupement de « Np » cellules en Parallèle.

La caractéristique courant-tension de ce groupement de cellule garde la même tension et le courant représente la multiplication du courant d'une seule cellule par le nombre de cellule Np.

II.4.3. Regroupement mixte :

Photovoltaïque est composé donc d'un ensemble série-parallèle de plusieurs modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques (cf. Figure II.9). [15]

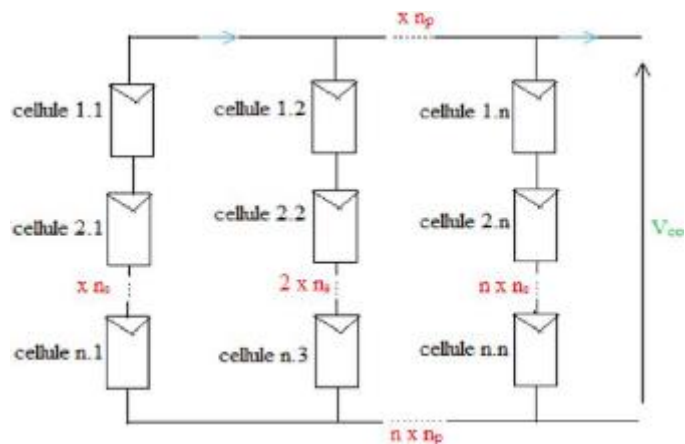


Figure (II.9) : Association des cellules PV mixtes (série-parallèle).

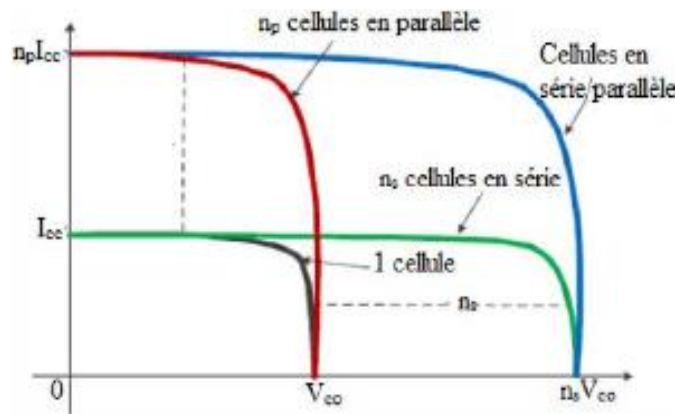


Figure (II.10) : Caractéristique d'un assemblage série/parallèle de n_s et n_p cellules PV identiques.

II.5. Modules et panneaux photovoltaïques :

Pour produire plus de puissance il faut envisager un assemblage de plusieurs cellules (PV) Soit en série, soit en parallèle. Cet assemblage forme ce qu'on appelle « module photovoltaïque ». Un module photovoltaïque est composé donc de plusieurs cellules solaires reliées les unes aux autres.

Le panneau solaire est un groupement de plusieurs modules, ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend de:

- La taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.
- Besoins en électricité.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage. [13]

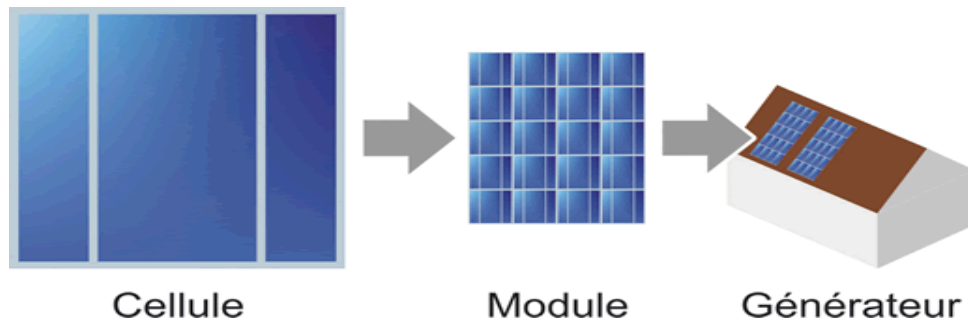


Figure (II.11) : constitués d'un panneau solaire.

Un panneau photovoltaïque utilise la lumière du soleil pour produire de l'électricité. De ce fait, les ombres sur les panneaux photovoltaïques vont fortement faire diminuer le rendement et la production de notre installation. Au moment de l'installation, faites-en sorte de les supprimer si cela est possible ou évitez d'installer les modules juste en dessous.

Les panneaux solaires sont une technologie intéressante pour réduire nos factures et adopter une attitude plus écologique. Mais pour avoir une production optimale, il faut entretenir nos panneaux solaires. Comme tous les objets d'extérieurs, nos panneaux prennent la poussière, la pollution, les feuilles mortes. Malheureusement ça nous ne pouvons rien y faire. Mais ce dépôt accumulé sur les panneaux, les empêche de capter correctement les rayons du soleil et diminue la production d'énergie. Nous devons donc nous assurer que nos panneaux sont toujours propres en utilisant un système de nettoyage ou faire appel à des experts. [13]

II.6. Les Suiveurs Solaire :

II.6.1. Définitions :

Le suiveur solaire est une structure portante qui permet d'orienter les panneaux solaires photovoltaïques en fonction de la position du soleil, afin d'en augmenter la productivité. L'idée est que le surplus d'énergie produite grâce à l'orientation des panneaux sera plus important que l'énergie dépensée à orienter les panneaux de façon optimale. En effet, un suiveur solaire peut augmenter le rendement d'un panneau photovoltaïque jusqu'à 40 % de plus qu'un panneau fixe. La meilleure orientation est celle qui fait que les rayons soient perpendiculaires aux panneaux. Suivre le Soleil nécessite deux axes :

En azimut (d'Est en Ouest à mesure de l'avancée de la journée) et en hauteur (selon la saison et l'avancée de la journée). La meilleure façon de suivre le Soleil est donc d'utiliser un suiveur à deux axes, mais il en existe avec un seul axe qui dépend de l'azimut, l'angle des panneaux par rapport au sol étant calculé de façon optimum selon la latitude. [17]

II.6.2. Le principe de fonctionnement du suiveur solaire :

Le suiveur solaire permet de pivoter le panneau solaire selon un ou deux axes dans le but de maximiser le rayonnement solaire, tout ceci pour augmenter la production d'énergie. Il est vrai que le soleil change constamment de position que ce soit dans la journée ou dans les différentes périodes de l'année. Il existe deux types des suiveurs, le mono- axiale et le bi-axiale. Suivre le soleil peut se faire sur deux axes, l'un d'est en ouest, c'est l'azimut et en hauteur selon les saisons et l'avancée des périodes. Le suiveur solaire se place en dessous du panneau ce qui va permettre de déplacer suivant les deux axes. [18]

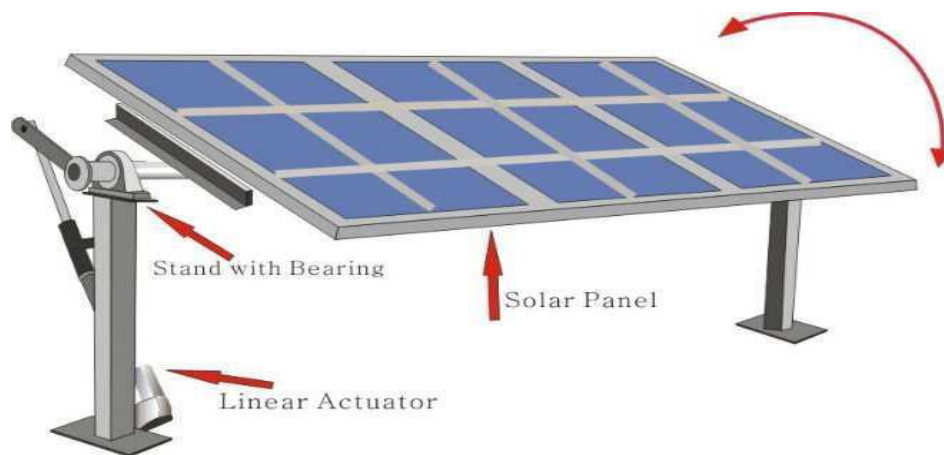


Figure (II.12) : Panneaux avec suiveur solaire.

II.6.3. L'intérêt des suiveurs solaires :

La production d'énergie électrique par les panneaux photovoltaïques est maximale lorsque la lumière du soleil est perpendiculaire sur les panneaux.

Lorsque les panneaux sont stationnaires, leur rendement n'est pas constant tout au long de la journée, comme lorsque le soleil se déplace l'angle d'éclairage change continuellement, donc le rendement varie entre le début et la fin de la journée. De cela vient l'intérêt des systèmes suiveurs, ils permettent de garder d'une façon continue les panneaux solaires orientés perpendiculairement aux rayons incidents du soleil. La

figure ci-dessous présente un diagramme comparatif de production électrique entre une installation fixe et une installation avec suiveur.[19]

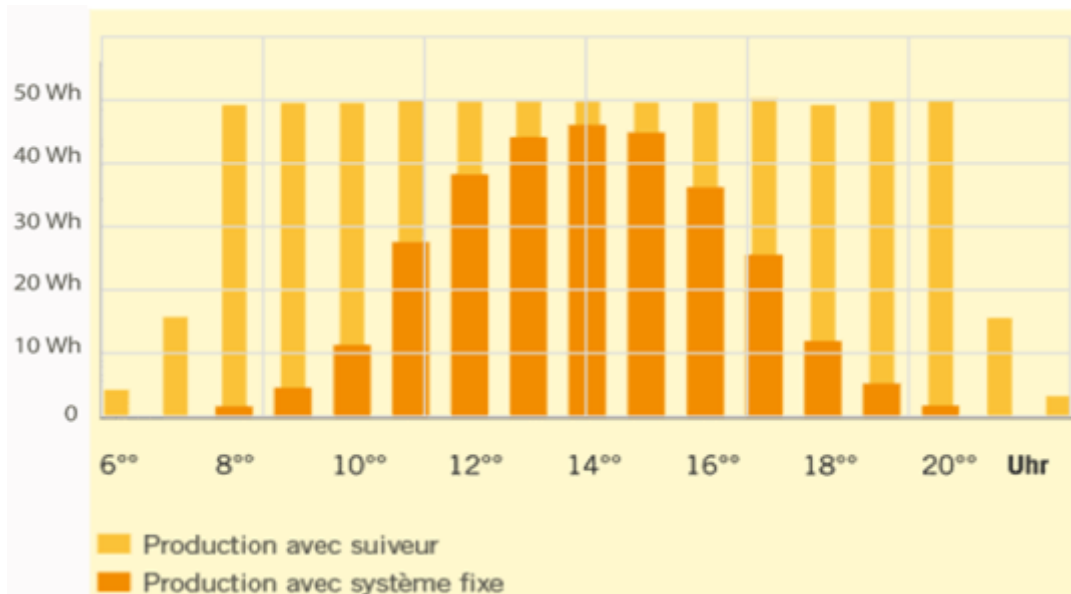


Figure (II.13) : la production électrique.

II.6.4. Les types des suiveurs solaires :

On distingue principalement deux grandes familles de suiveurs solaires : les passifs et les actifs qui comportent les suiveurs mono-axe et double axe. (Figure (II.14)).

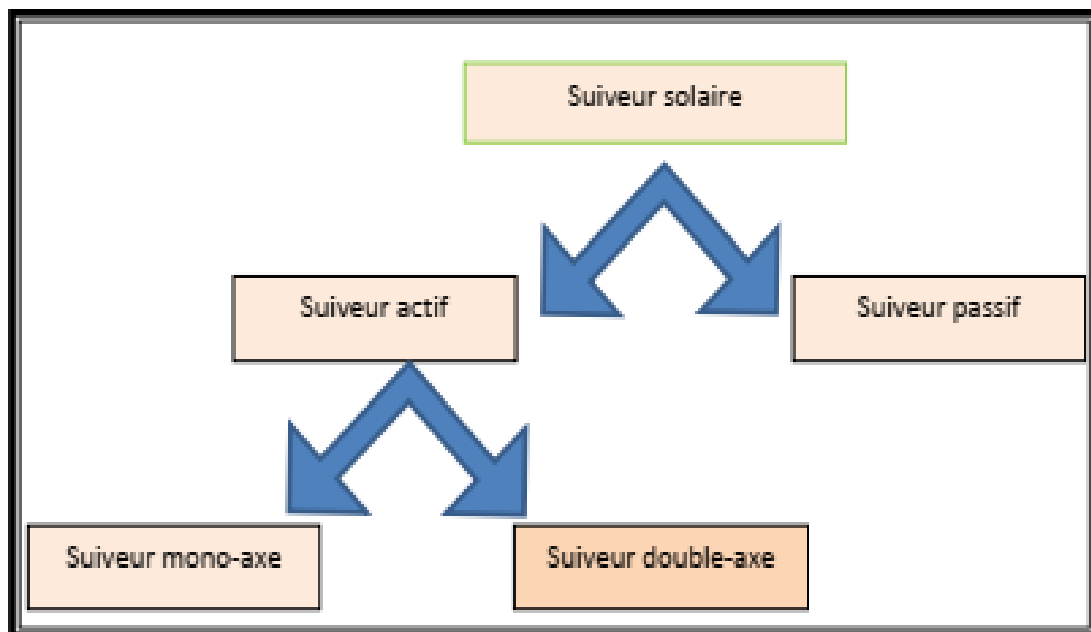


Figure (II.14) : Les types des suiveurs solaires.

II.6.4.1. Suiveur passif :

Ce type de suiveurs solaires possède deux tubes en cuivre remplis en fluides chimiques est monté sur les côtés Est et Ouest du PV. L'augmentation de la température induit par l'exposition aux rayons du soleil mène à la vaporisation de ces liquides. Le plus grand volume interne est occupé par partie gazeuse, et la quantité liquide se déplace vers le côté ombragé. Donc, le mouvement des PV est gouverné par un processus de transfert de mass. Cette technique ne nécessite aucune énergie pour orienter les PV. [5]

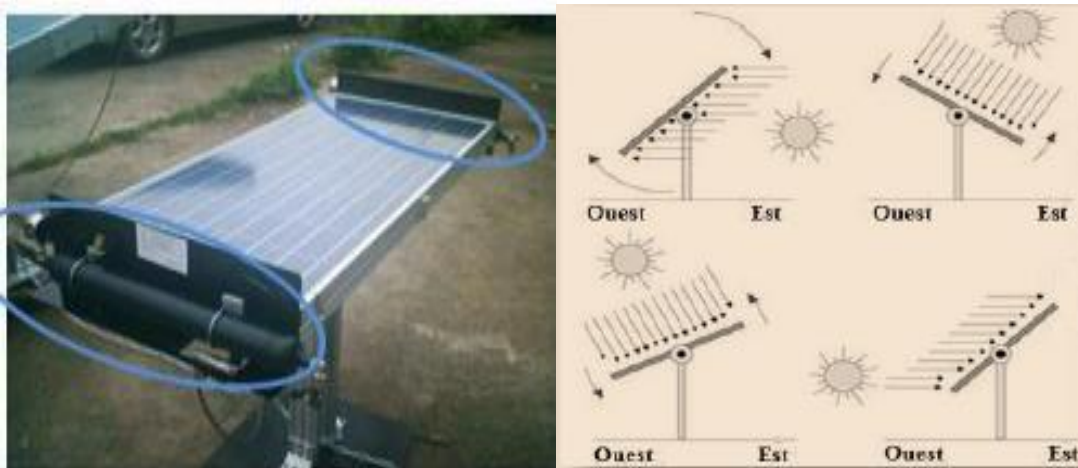


Figure (II.15) : Exemple et fonctionnement du suiveur passif.

II.6.4.2. Suiveur actif :

Les suiveurs solaires actifs utilisent le principe de la détection de lumière, suivant la trajectoire solaire en cherchant à optimiser au maximum l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface. Il existe deux types dans cette famille : les suiveurs mono axe et double axe. L'avantage de ces derniers par rapports aux suiveurs passifs, est qu'ils représentent une meilleure précision de suivi et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les réajustés [20].

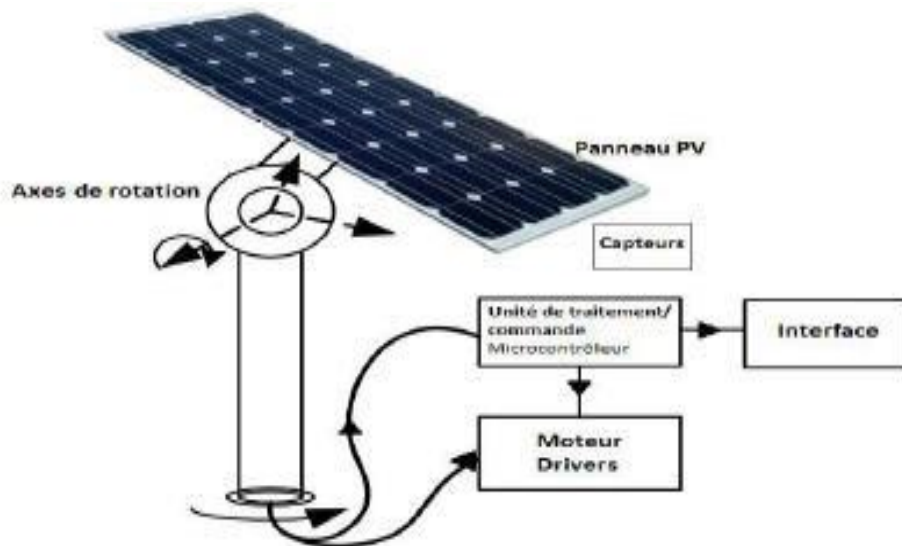


Figure (II.16) : Exemple et fonctionnement du suiveur actif.

II.6.5. Classification des suiveurs actifs :

II.6.5.1. Selon le nombre des axes de rotation :

a) *Suiveur solaire mono-axe :*

Ce type de suiveurs possède un seul degré de liberté et ils sont utilisés pour permettre une orientation dans une seule direction. Le trajet que suit cet axe en azimut de l'Est vers l'Ouest au fil de la journée. L'angle d'inclinaison du panneau est fixe. Pour recevoir le maximum de rayons du soleil durant toute l'année il faut placer le PV selon l'angle le plus adéquat. Il est placé selon la latitude du lieu où est disposé le PV. [21].

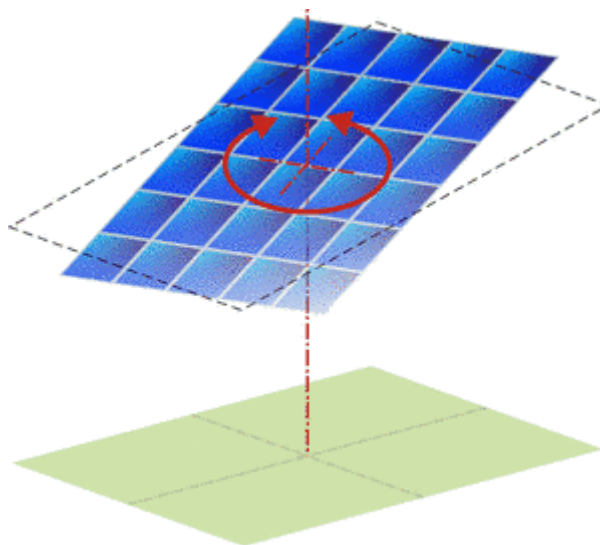


Figure (II.17) : Suiveur solaire mono-axe.

b) Suiveur solaire double axe :

Ce suiveur est le plus impressionnant et offre les meilleures performances par rapport au suiveur mono-axe. Ce type de suiveur solaire est l'opposé du précédent, il se compose de deux axes ce qui lui permet de suivre les mouvements en azimut et en inclinaison au cours de la journée. Cela permet au PV de rester constamment orienté vers le soleil.[21]

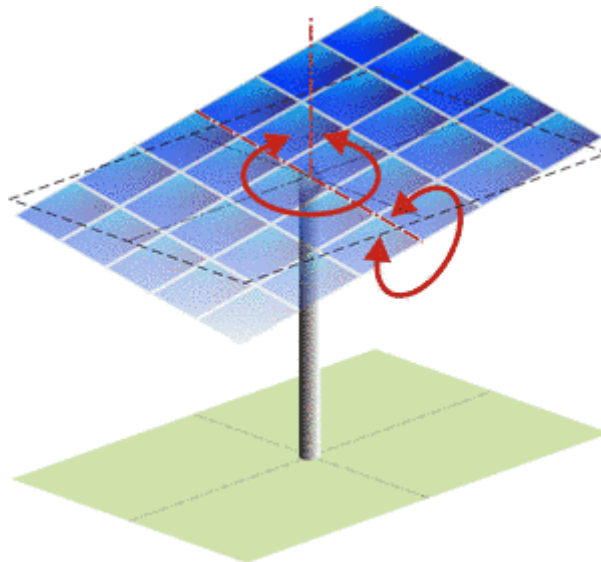


Figure (II.18) : Suiveur solaire double axe.

II.6.5.2. Selon le principe de suivi :**a) Suiveur à boucle ouvert :**

Cette méthode est basée sur les calculs astronomiques pour déterminer la position du soleil, les coordonnées du suiveur sont fournies à travers l'heure et coordonnées de GPS, Il utilise comme points d'entrée : date, jour et heure en plus de la longitude et la latitude. Cependant, cette méthode est susceptible aux perturbations et aux erreurs de modélisation. [22]

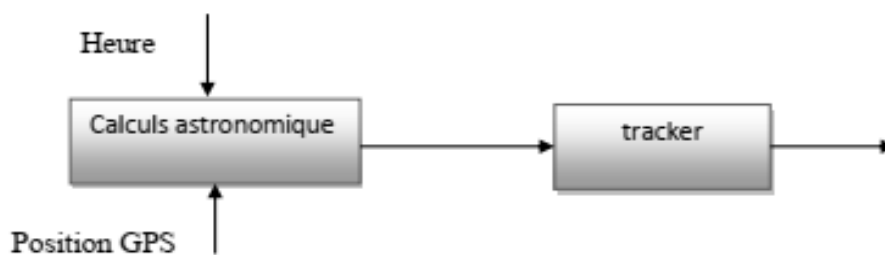


Figure (II.19) : Commande en boucle ouverte.

b) Suiveur à boucle fermée :

Cette méthode est basée sur une acquisition des données délivrée par des capteurs de lumières de type photodétecteurs afin de contrôler les actionneurs du suiveur, cette technique permet une surveillance instantanée du soleil ainsi qu'un bon guidage des panneaux solaires. [22]

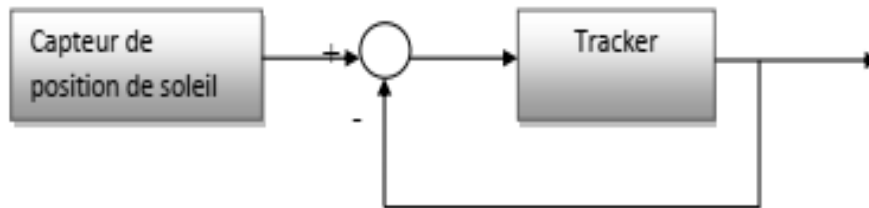


Figure (II.20) : Commande en boucle fermée.

c) Suiveur hybride :

Cette méthode est une combinaison entre la méthode à boucle ouverte et la méthode à boucle fermée, Elle combine la donnée proposée par la commande en boucle fermée et le calcul de position proposée par la commande en boucle ouverte.[22]

II.7. Constitution du suiveur solaire :

II.7.1. Partie électronique :

II.7.1.1. Capteur LDR :

Le capteur LDR (light dépendant Résistor) est une photorésistance sensible à la lumière incidente à laquelle elle est exposée. Sa fonction principale c'est de mesurer l'intensité de la lumière. Pour notre application nous avons utilisés quatre capteurs LDR répartis en groupe de deux et optiquement isolés entre eux de manière à ce que l'éclairement de chaque groupe ne soit identique que s'ils sont pointés vers le soleil.

Ces quatre capteurs constituent un système de lunette. Elles sont solidaires au panneau solaire et placées sur le même plan que celui-ci. Elle forme ainsi le capteur de détection de la position du soleil. Dans le cas où le panneau solaire n'est pointé vers le soleil, un signal est généré par le diviseur de tension des LDR ombragées. Ce signal est transmis à l'entrée du microcontrôleur pour une éventuelle instruction de commande des moteurs.[23]

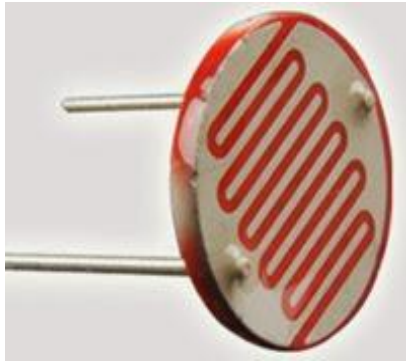


Figure (II.21) : Capteur LDR.

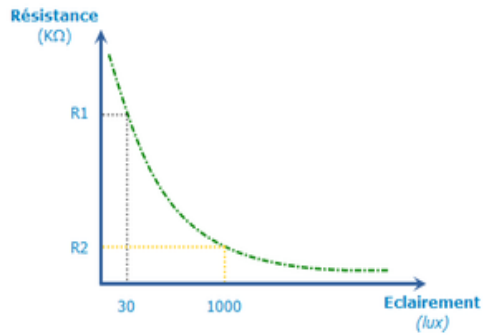


Figure (II.22) : Caractéristique d'un LDR.

a) Emplacement des LDR sur les PV :

Position pour les suiveurs à double axe

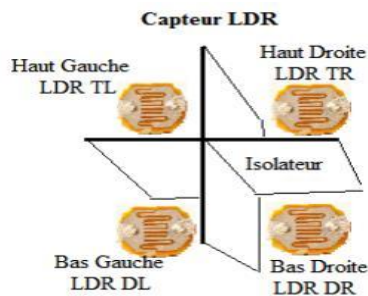


Figure (II.23) : Capteurs en quatre quadrants en forme (+).

La figure (II.23) illustre l'emplacement en quatre quadrants en utilisant quatre capteurs séparés par deux plants (forme +).



Figure (II.24) : Capteurs en quatre quadrants en forme (×).

La figure (II.24) illustre l'emplacement en quatre quadrants en utilisant quatre capteurs séparés par deux plants (forme ×).

Position pour les suiveurs mon-axe

Deux capteurs séparés par un plant (utiliser dans les suiveurs mono-axe) (voir figure II.25).

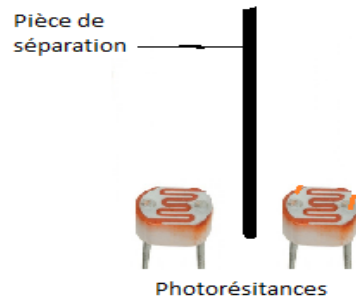


Figure (II.25) : deux capteurs séparés.

II.7.2. Carte de commande :

Le circuit de commande de notre système est basé complètement sur un circuit programmable dit « Arduino », l'avantage de ce dernier est de minimiser la surface des cartes électriques donc on minimise l'utilisation des quantités des composants électroniques. [5]

II.7.2.1. Définition de la carte Arduino :

Arduino est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif Constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation. [5]

II.7.2.2. Types de cartes Arduino :

Il existe plusieurs types de cartes Arduino, nous citons :

- Arduino Uno.
- Arduino Méga.
- Arduino Nano.
- Lily Pad Arduino.
- Arduino Leonardo.
- Red Board. [5]



Figure (II.26): Arduino UNO



Figure (II.27): Arduino Méga

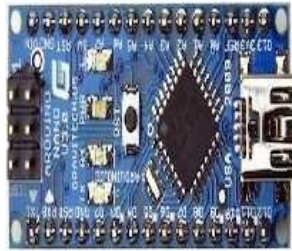


Figure (II.28): Arduino Nano.



Figure (II.29): Arduino Leonardo



Figure (II.30): Red Board

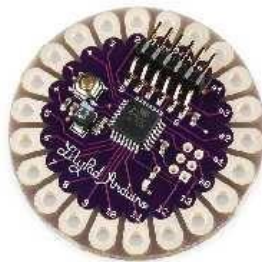


Figure (II.31): Arduino Lily Pad

II.7.2.3. Arduino Uno :

L'Arduino Uno est une carte microcontrôleur basée sur le Atmega328. Elle est dotée de 14 broches Entrées/Sorties numériques 6 en PWM et 6 configurable en entrées analogiques, d'un oscillateur à quartz 16 MHz, d'une connexion USB, d'un jack d'alimentation, d'un support ICSP et d'un bouton reset. La carte ARDUINO UNO est livrée prête à fonctionner, il suffit de la connecter à un ordinateur par le câble USB et de l'alimenter à l'aide d'un adaptateur USB ou de piles.

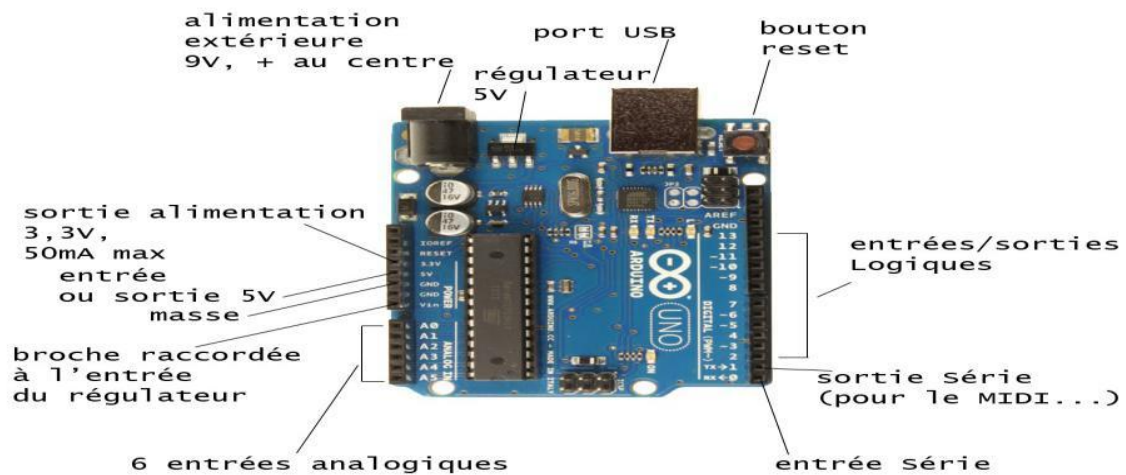


Figure (II.32) : La carte Arduino uno.

Voici quelques accessoires d'Arduino utilisées dans ce projet.

II.7.2.4. Câble USB :

Le câble USB permet à la fois d'alimenter un projet Arduino, de programmer la carte (via Arduino IDE) mais aussi d'utiliser le Moniteur Série.



Figure (II. 33): Cable USB type A/B (Arduino UNO).

II.7.2.5. Fils de pin d'Arduino :

Ces fils males sont utilisés pour brancher et connecter l'Arduino avec d'autre pièce et pour les tests. La plaque d'essai est un dispositif qui permet de réaliser le prototype d'un circuit électronique elle est utilisée dans la plupart des expériences d'Arduino. [5]



Figure (II. 34) : Fils de pin d'Arduino.

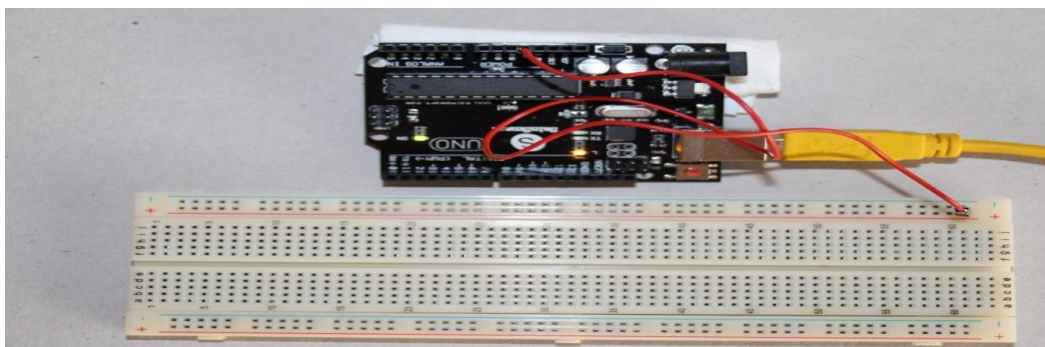


Figure (II.35): Plaque d'essai.

II.7.3. Partie Programmation :

C'est cette partie du suiveur qui permet au microcontrôleur d'accomplir ses fonctions en accordant à chaque entrée/sortie une fonction bien définie dans le circuit électronique en commençant par les broches programmées de recevoir les signaux des LDR et en terminant par les pattes du microcontrôleur prévues pour transporter les différentes instructions données, aux moteurs pour orienter les panneaux. [5]

II.7.4. Partie mécanique :

La partie mécanique permet de donner la flexibilité nécessaire pour exécuter les instructions données par le microcontrôleur. Elle est constituée essentiellement de deux moteurs pour commander le panneau en horizontal ou en vertical, le support métallique du panneau en forme de U, l'axe vertical pour permettre le système de pivoter en horizontal et la base sur lequel assis tout le système. [5]

II.7.4.1. Les moteurs utilisés comme actionneurs dans les suiveurs :

II.7.4.1.2. Servomoteur :

a) Description :

Un servomoteur est un actionneur (moteur) capable de maintenir une opposition à un effort statique et dont la position est vérifiée en continue et corrigée en fonction de la mesure. Le servomoteur est composé de plusieurs éléments visible :

- Les fils.
- L'axe de rotation sur lequel est monté un accessoire en plastique ou en métal.
- Le boîtier qui le protège.

Aussi de plusieurs éléments que l'on ne voit pas, qui se trouve à l'intérieur du boîtier.

- Un moteur à courant continu.
- Des engrenages pour former un réducteur.
- Un capteur de position de l'angle d'orientation de l'axe (un potentiomètre bien souvent).
- Une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu.

La position est définie avec une limite de débattement d'angle de 180 degrés. Souvent abrégée « servo » provenant du latin servus qui signifie « esclave ».

Il excite plusieurs servomoteurs, dans notre application on a utilisé deux servomoteurs de puissance (10Kg) MG996R. Il contient trois fils, un pour l'alimentation, l'autre pour la masse (GND) et le dernier pour le signal d'entrée (la commande) [24].

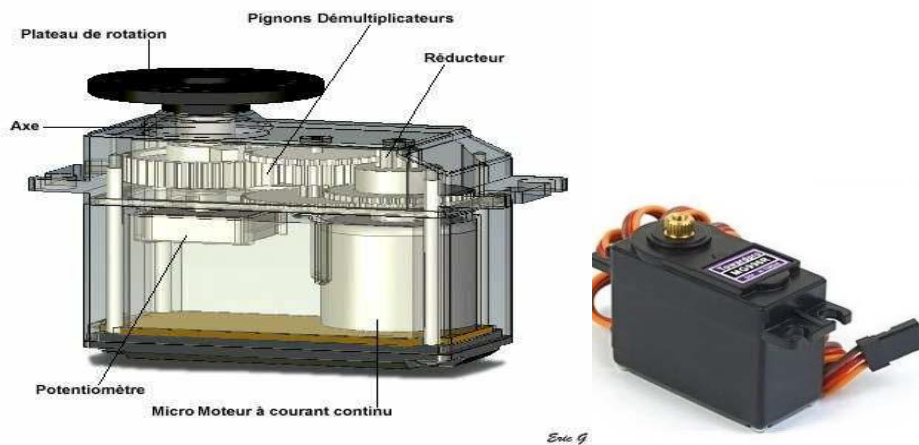


Figure (II.36) : description générale d'un servomoteur

b) Principe de fonctionnement d'un servomoteur :

Les servomoteurs sont commandés par l'intermédiaire d'un câble électrique qui lui transmette des consignes de position sous forme d'un signal codé en largeurs d'impulsions 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 de bras de commande du servomoteur. Comme le montre la figure ci-dessous : [24]

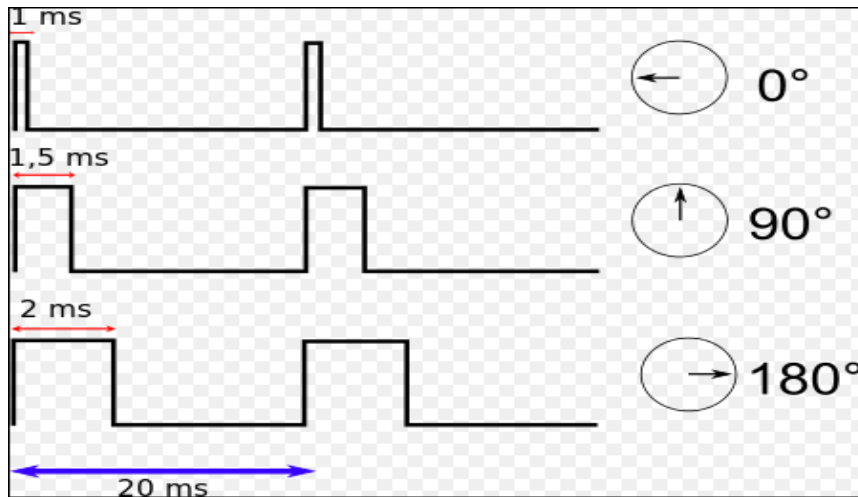


Figure (II.37) : l'angle de l'axe du servomoteur en fonction de la largeur de l'impulsion.

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.[24]

Après la réalisation du suiveur solaire, il est nécessaire d'ajouter un régulateur de charge à notre générateur photovoltaïque.

II.7.5. Régulateur de charge :

II.7.5.1. Définition :

Un régulateur solaire est un outil particulièrement utile si notre installation solaire photovoltaïque fonctionne grâce à un parc batterie : en effet, il permet d'en assurer la protection, en écartant tout risque de surcharge ou de décharge trop importante. Une batterie dure plus longtemps si sa charge ne descend pas trop fréquemment au-dessous de 40% et ne monte pas non plus au-dessus des 95%. Grâce au régulateur solaire, notre installation photovoltaïque voit sa durée de vie optimisée, et son rendement mieux assuré. Un régulateur solaire, également appelé contrôleur de charge, aide également à accroître la puissance de nos panneaux solaires. Grâce aux régulateurs, la capacité de recharge de notre batterie solaire se voit augmentée de 100%.

Il existe différents types de régulateurs solaires, mais tous ont un principe de fonctionnement commun : ils sont associés à un générateur photovoltaïque, qui assure à la fois la production et la gestion de l'électricité, fournie par les capteurs solaires. Concrètement, pour éviter toute surcharge ou décharge, le contrôleur solaire vérifie l'intensité du courant ainsi que la tension entre les modules photovoltaïques, qui produisent l'électricité, et les batteries de notre installation (ou accumulateurs).

Grâce à ses voyants lumineux, le régulateur solaire indique qu'il fonctionne correctement, mais prévient également les éventuels soucis se rapportant à la batterie de notre installation solaire : ainsi, il est simple de suivre le bon fonctionnement de notre installation !

- Le régulateur solaire le plus répandu est le régulateur solaire MPPT (pour Maximum Power Point Tracking). Ce type de régulateur scanne la tension électrique que produit le panneau solaire plusieurs fois par jour, ce qui lui permet de trouver le point de sortie maximum du courant que produit le panneau : cette puissance est ensuite toujours utilisée à son plein potentiel, c'est ce type qu'on va utiliser dans notre étude.
- L'autre principal régulateur solaire est le régulateur PWM (Pulse Width Modulation) : il récupère le courant des panneaux solaires photovoltaïques, et l'envoie directement dans la batterie. Le courant est transmis sous forme d'impulsions de longueur et de fréquence variables.[25]

II.7.5.2. Fonctionnement du Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

Le régulateur de charge est composé d'un convertisseur DC/DC à découpage de haut rendement qui assure trois fonctions :

- Détection de la puissance maximale du champ photovoltaïque tant que la batterie n'est pas chargée.
- Conversion DC/DC.
- Régulation de la tension de sortie en fonction de la phase de charge (Bulk, Absorption et Floating).

Le champ solaire est connecté à l'entrée du régulateur et la batterie à sa sortie. Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de régulation, le régulateur fait fonctionner le générateur photovoltaïque à puissance maximale ppm et transfère cette puissance à la sortie.

Par conception, le régulateur MPPT permet un gain de production de **5 à 30%** par rapport à un régulateur PWM. Ce gain augmentera en hiver et pendant les périodes de faible ensoleillement.

Le régulateur de charge MPPT permet une plus grande souplesse au niveau du choix des panneaux. En effet, tous les types de module photovoltaïque peuvent être utilisé du moment que l'on reste dans les tolérances de tension (V) et de courant (A) du régulateur.

Pour bien choisir le modèle adapté à nos panneaux solaires, utiliser le Calculateur MPPT.[26]

Remarque : Le convertisseur DC/DC est utilisé comme abaisseur de tension Ce qui signifie que la tension MPP du générateur photovoltaïque doit toujours être supérieure à la tension batterie.

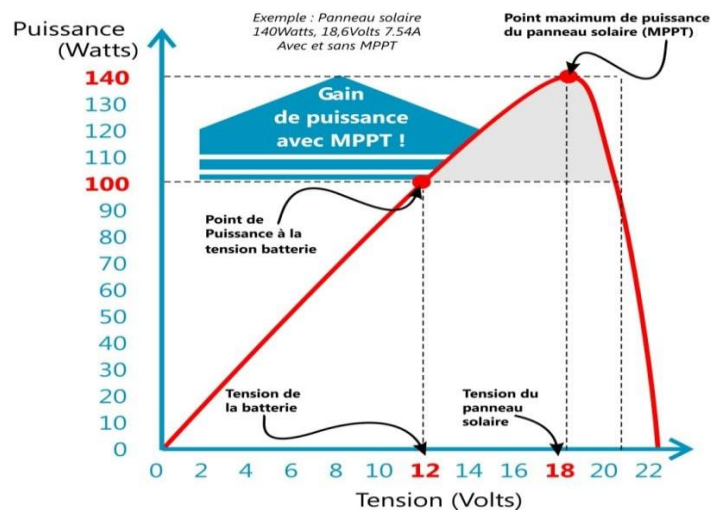


Figure (II.38) : courbe de charge MPPT.

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons commencé par un aperçu général sur le domaine photovoltaïque. Après avoir exposé l'essentiel et les bases de fonctionnement des cellules solaires PV, ainsi que les différentes Caractéristiques, Groupement de cellules et les différentes technologiques de ce secteur.

Ensuite, nous avons exprimés le principe de fonctionnement, les types de suiveurs, et les différentes techniques du suivi solaire, sujet principal de notre mémoire .Puis, nous avons présenté les différents éléments constitutifs du traqueur que nous sommes amenés à réaliser. Nous avons également parlé du contrôleur de charge utilisé dans notre installation.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter en détaille les étapes de simulation de notre suiveur.

Chapitre III

Résultats et interprétation

III.1. Introduction :

Après avoir établi en détail l'aspect théorique de la cellule PV, qui constitue l'élément de base du module solaire, ainsi que le suiveur solaire en décrivant le fonctionnement et la constitution de chaque bloc qui le compose, nous allons à présent converger cette étude en simulant notre système de poursuite dans Proteus. Tout d'abord, nous allons fixer un cahier des charges. Puis, nous allons présenter les dispositifs et les outils logiciels employés afin d'étudier ce système. Enfin, nous allons présenter le programme permettant le pilotage de ce suiveur et les résultats de notre simulation.

III.2. Conception du suiveur :

Ce projet a pour objectif de concevoir un système suiveur du soleil à deux axes où les photodétecteurs LDR sont utilisés en tant que capteurs. Les dispositifs de la commande des actionneurs ainsi que l'acquisition du signal provenant des capteurs sont décrits comme suit :

- Carte Arduino UNO ;
- Quatre capteurs LDR placés en quadrature ;
- Deux servomoteurs.

III.3. Les logiciels utilisés :

III.3.1. Le logiciel Arduino IDE :

Le logiciel permet de programmer la carte Arduino. Il offre une multitude de fonctionnalités. Le langage Arduino est inspiré de plusieurs langages. On retrouve notamment des similarités avec le C, le C++, le Java. Le langage impose une structure particulière typique de l'informatique embarquée. Le programme est lu par le microcontrôleur de haut vers le bas. Une variable doit être déclarée avant d'être utilisée par une fonction. La structure minimale est constituée :

En tête : déclaration des variables, des constantes, indication de l'utilisation de Bibliothèques etc....

Un setup (initialisation) : cette partie n'est lue qu'une seule fois, elle comprend les fonctions devant être réalisées au démarrage (utilisation des broches en entrées ou en sortie, mise en marche du midi, du port série de l'I2C etc..). [27]

Une Loop (boucle) : cette partie est lue en boucle ! C'est ici que les fonctions sont réalisées.

a) L'interface :

La figure (III.1) représente l'interface du logiciel Arduino, qui se compose de :

- 1_ Barre de menus.
- 2_ Barre d'outils rapide.
- 3_ Editeur de code pour écrire le programme.
- 4_ Débogueur (affichage des erreurs de programmation)

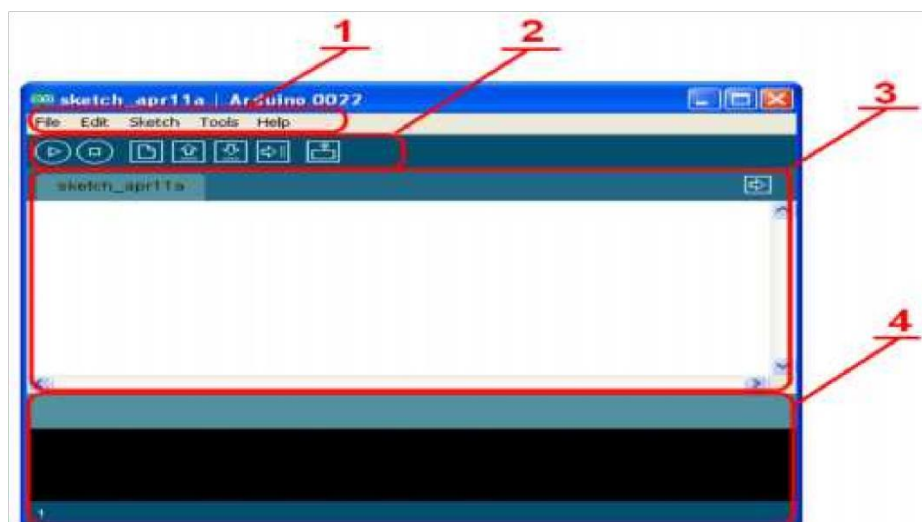


Figure (III.1) : L'interface du logiciel Arduino.

b) Les boutons du logiciel :

Chaque bouton indiqué sur la figure (III.2) à une fonctionnalité,

1. Permet de vérifier le programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans le programme
2. Créer un nouveau fichier
3. Sauvegarder le programme en cours
4. Liaison série
5. Stoppe la vérification
6. Charger un programme existant
7. Compiler et envoyer le programme vers la carte. [27]

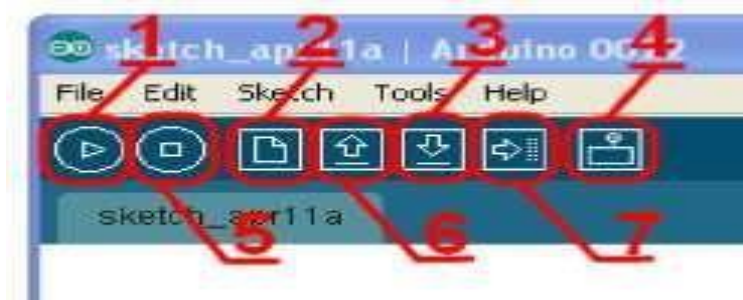


Figure (III.2) : Les boutons du logiciel Arduino.

III.3.2. Le Logiciel Proteus :

C'est un logiciel de la famille CAO (Conception Associé par Ordinateur), il permet de schématiser tout montage électronique et de dessinez les circuits imprimés électroniques. Il permet également la simulation en temps réel des circuits électroniques, les circuits électrotechniques et notamment les actionneurs électromécaniques. La version utilisée dans ce mémoire est la version 8. [28]

III.3.2.1 Lancement du module Proteus :

Dans le menu Démarrer sélectionner Proteus 8 Professional Double cliquer sur l'icône Proteus placée dans le bureau. [28]

III.3.2.2 Rôle du logiciel Proteus :

La suite logicielle Proteus est composée des modules suivants :

- **Saisie du schéma** : La saisie d'un schéma structurel d'un circuit électronique (assemblage de composants électroniques dont on fixe les valeurs et les références) reliés par des connexions électrique (fils).[29]

- **La simulation du comportement** :

Le lancement d'un simulateur permet la simulation du comportement des composants du schéma. Ce simulateur effectue des calculs en se basant sur des modèles mathématiques (modèle SPICE, définis par les concepteurs de composants).

III.3.2.3 Composantes de l'interface du logiciel Proteus :

La Figure (III.3), montre-les différents fenêtres composant l'interface du logiciel Proteus

▪ Fenêtre d'ensemble

Le cadre en bleu délimite l'espace de travail tel qu'il a été défini. Le cadre en vert délimite la zone de travail, c'est à dire la partie du schéma visible dans la fenêtre principale. On peut déplacer cette zone de travail en pointant la souris sur la zone désirée de la fenêtre d'ensemble et en effectuant un clic gauche. On peut redéfinir la zone de travail dans la fenêtre d'ensemble en appuyant sur la touche majuscule 'shift' du clavier, associée au déplacement de la souris en maintenant appuyé le bouton gauche. [29]

▪ Fenêtre d'édition

C'est dans cette fenêtre qu'on édite le circuit. Elle ne représente que la partie du circuit qui est définie par le cadre vert dans la fenêtre d'ensemble. [30]

On peut redéfinir la zone travail à l'aide de la fenêtre d'ensemble ou en utilisant la commande 'Zoom' du menu 'Affichage'.

▪ La boîte à outils

Elle est composée d'un ensemble d'icônes dont les fonctions seront détaillées ultérieurement et d'un sélecteur d'objet utilisé pour choisir les boîtiers, le style des pastilles, des traces, des traversées. etc. [30]

▪ Coordonnées du curseur

Les coordonnées déterminent la position du curseur par rapport à l'origine qui par défaut se trouve au centre de la fenêtre d'édition. Les coordonnées sont affichées en 1/1000 de pouce.

▪ Raccourcis clavier des fonctions d'édition courantes

Ajustement de la fenêtre de visualisation : on place le pointeur de la souris à l'endroit qu'on veut agrandir puis on utilise les touches F6 à F8.

Occultation de la grille : touche G.

Ajustement du pas de grille : touches F2 à F4.

Définition d'une nouvelle origine : touche O.

Marquage d'un objet : cliqué sur l'objet à l'aide du bouton droit de la souris, il passe en surbrillance.

Démarquage d'un objet : cliquer avec le bouton droit de la souris dans une zone vierge de la feuille.

Annuler la dernière commande : Ctrl Z.

Rétablir la dernière commande : Ctrl Y

Effacement d'un objet : cliquer 2 fois avec le bouton droit de la souris. [30]

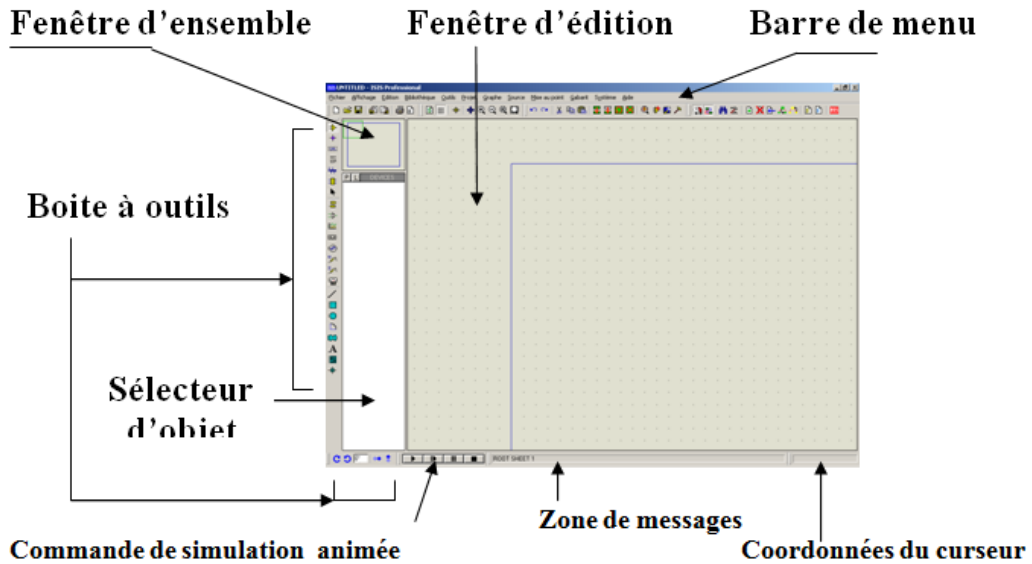
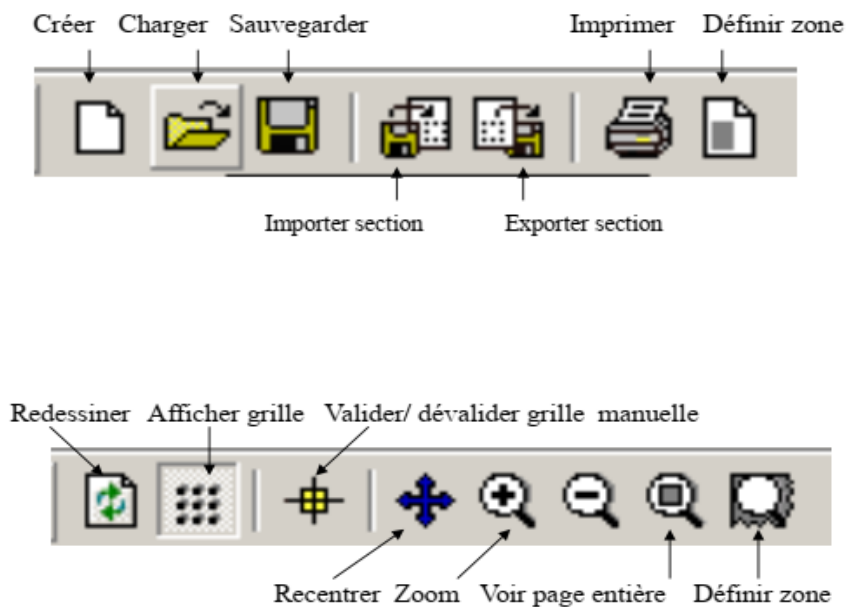
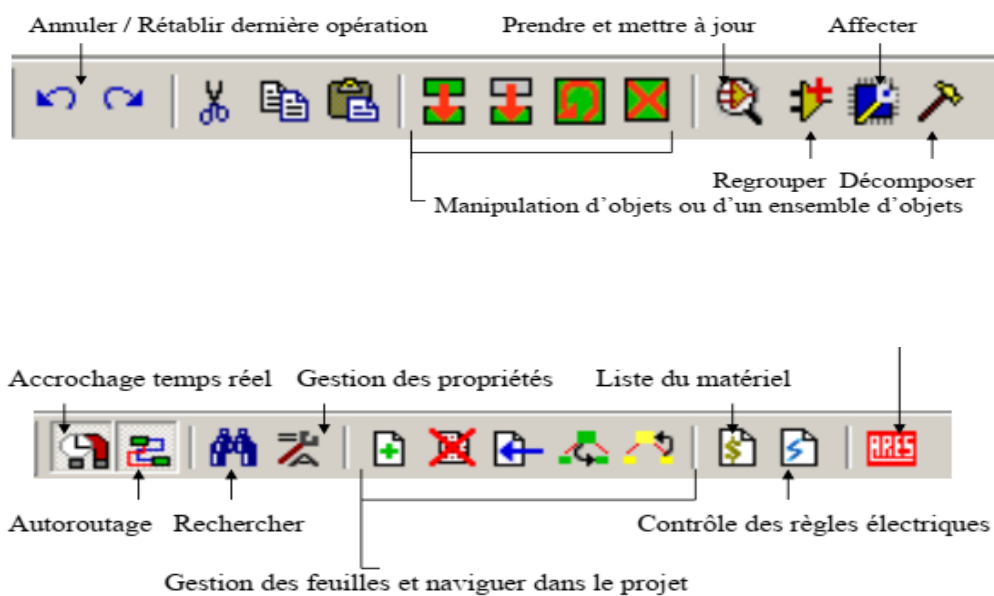


Figure (III.3) : Les fenêtres composant l'interface du logiciel Proteus.

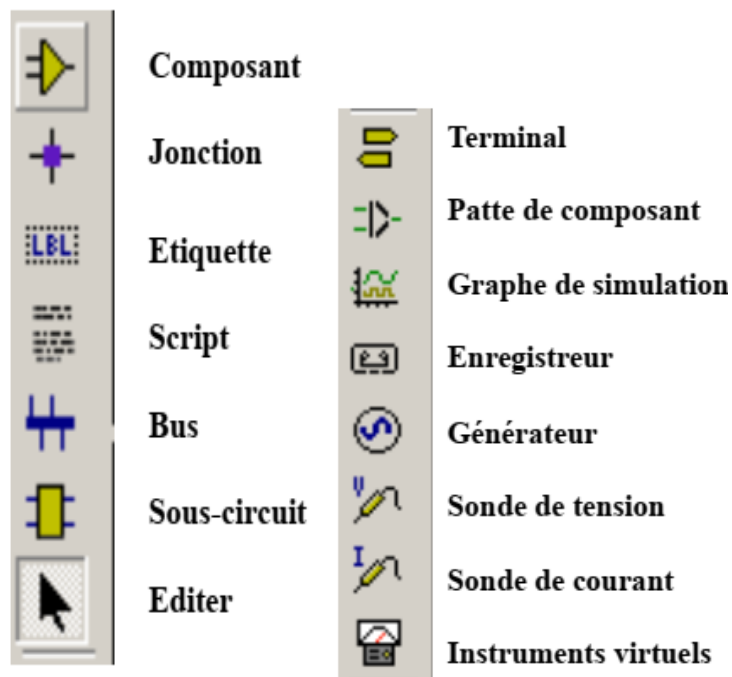
III.3.2.4. Organisation de la boîte à outils :

a) Menu commande

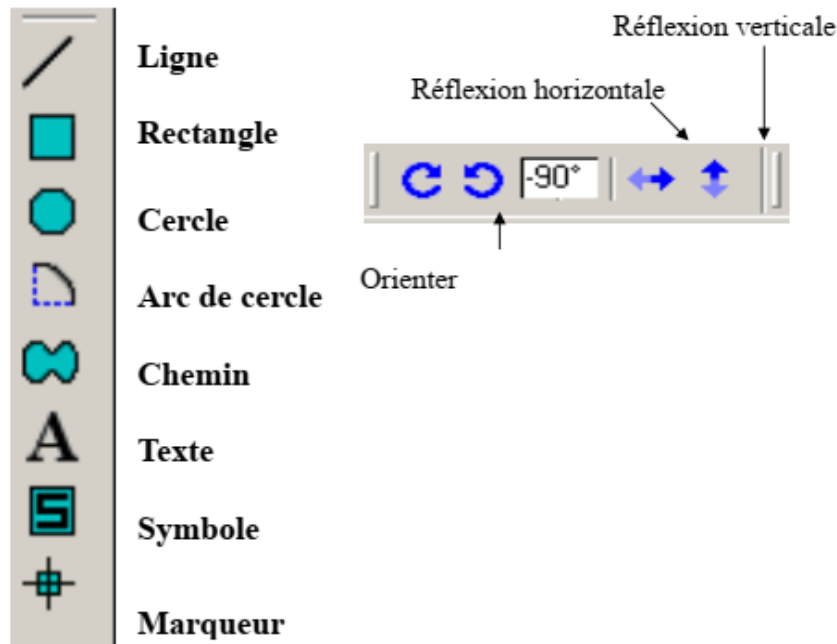




b) Mode principal Mode gadgets ou accessoires



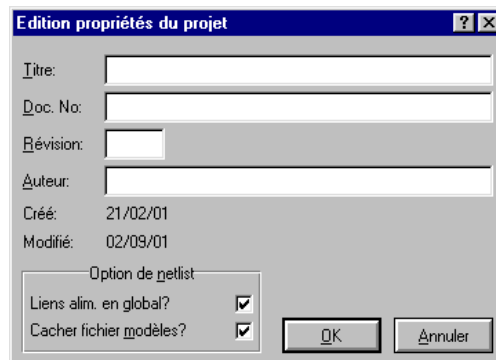
c) Mode graphique Orientation des objets



III.3.2.5. Définir les caractéristiques du projet et des schémas :

Pour définir les caractéristiques du projet :

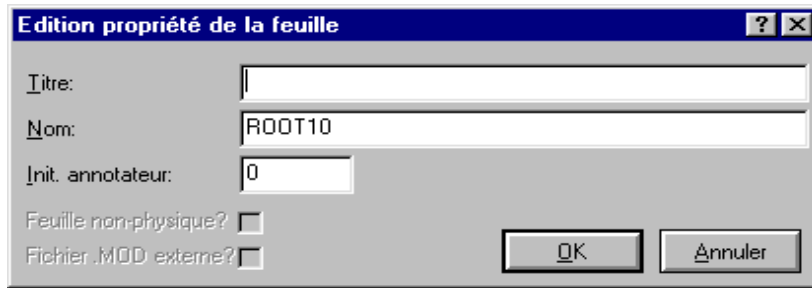
- ♣ Sélectionnez la commande 'éditer les propriétés du projet' sous le menu 'Projet'



- ♣ Renseignez les différents champs puis validez par **OK**.

Pour définir les caractéristiques d'une feuille :

- ♣ Sélectionnez la commande 'éditer propriétés de la feuille' sous le menu 'Projet'



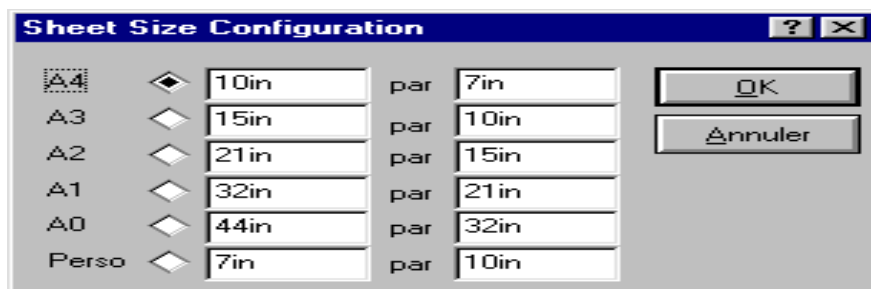
♣ Renseignez les différents champs puis validez par **OK**.

Pour créer plusieurs feuilles, sélectionnez la commande '**Nouvelle feuille**' sous le menu '**Projet**' pour chacune des feuilles à créer.

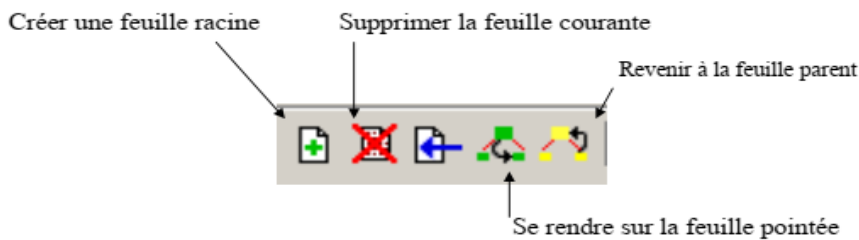
Les connexions entre les feuilles sont alors indiquées au moyen de noms de liens communs

Pour définir la taille des feuilles :

♣ Sélectionnez la commande '**Définir taille des feuilles**' sous le menu '**Système**'. [30]



Pour gérer les feuilles et naviguer dans le projet



III.3.2.6. Bibliothèques de composants :

Les composants sont contenus dans des bibliothèques. Celles-ci sont disponibles dans le fichier Library.PDF accessible via le chemin ci-dessous :

C:\Program Files\Labcenter Electronics\Proteus 5.2 Professional\Library Lorsque vous créez un nouveau schéma vous devez consulter les bibliothèques pour vérifier que les composants sont disponibles. Lorsque le composant n'existe pas, vous devez le

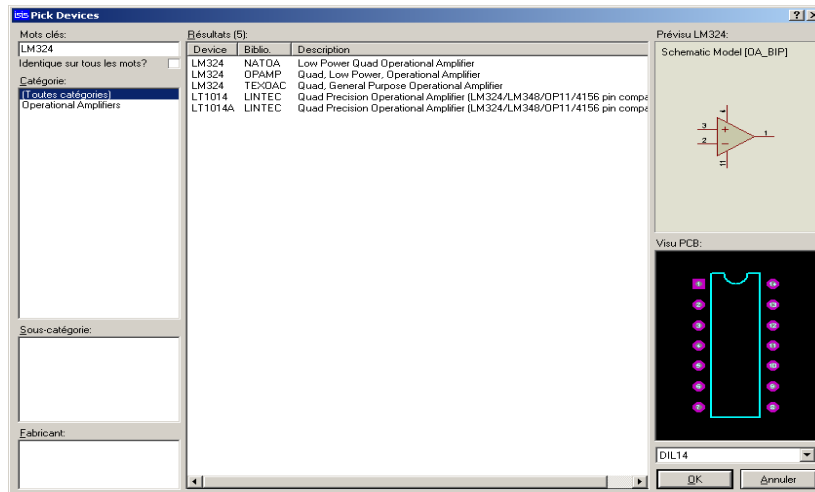
créer.[30]

III.3.2.7. Sélection des composants :

1/ Sélectionnez l'icône 'composant'.

2/ Accédez aux composants via le sélecteur d'objet en cliquant sur P (Prendre composant).

La fenêtre 'Pick Device' ci-dessous apparaît :



- Entrez la référence du composant.
- Sélectionnez la catégorie, la sous-catégorie et le fabricant
- Vérifiez si le composant dispose d'un modèle de simulation.
- Vérifiez si le composant dispose d'une empreinte.
- Validez par OK.
- Le composant apparaît dans le sélecteur d'objet. [30]

III.4. Simulation du suiveur en Proteus :

La figure (III.4) illustre le schéma électrique permettant la simulation du comportement du système suiveur solaire.

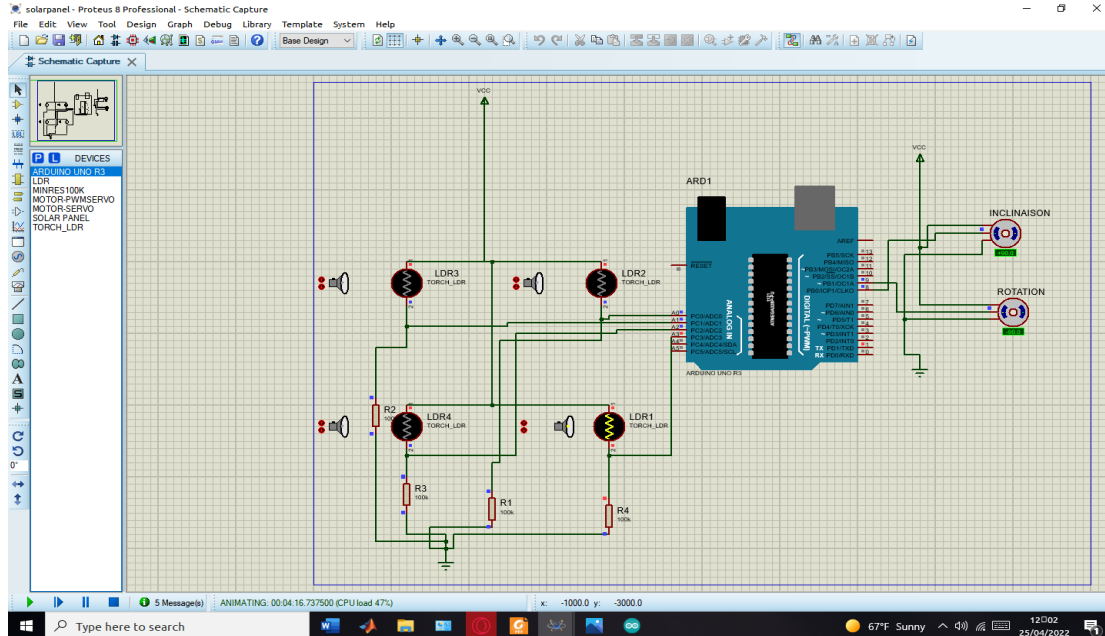


Figure (III.4) : Schéma électrique du système suiveur simulé en ISIS Proteus

III.4.1. Processus de suivi :

Le mouvement du servomoteur suivra l'état du LDR. Dans le système de suivi solaire à deux axes, il y a 2 servomoteurs. Un moteur est utilisé pour contrôler l'axe d'inclinaison et un autre moteur est utilisé pour contrôler l'axe de rotation.

Cas 1 : l'Intensité lumineuse du LDR1 > LDR2, LDR3 et LDR4

La figure (III.5) montre que le capteur LDR 1 a l'intensité de lumière la plus élevée, produisant ainsi une tension de sortie plus élevée que les autres capteurs. Dans cette simulation, l'intensité lumineuse la plus élevée est fixée à 15,1 lux et la plus faible est à 0,1 lux. Cette condition est appliquée aux cas 2, 3 et 4 sauf pour le cas 5 où la simulation est sur le point de tester la rotation du moteur si l'intensité lumineuse de chaque capteur est fixée à 15,1 lux. Pour le cas 1, le servomoteur A tourné dans le sens antihoraire et le servomoteur B tourne dans le sens horaire. Lorsqu'il est appliqué à la situation réelle, servomoteur A contrôle le mouvement de l'axe d'inclinaison du suiveur solaire et le servomoteur B contrôle l'axe de rotation du suiveur solaire.

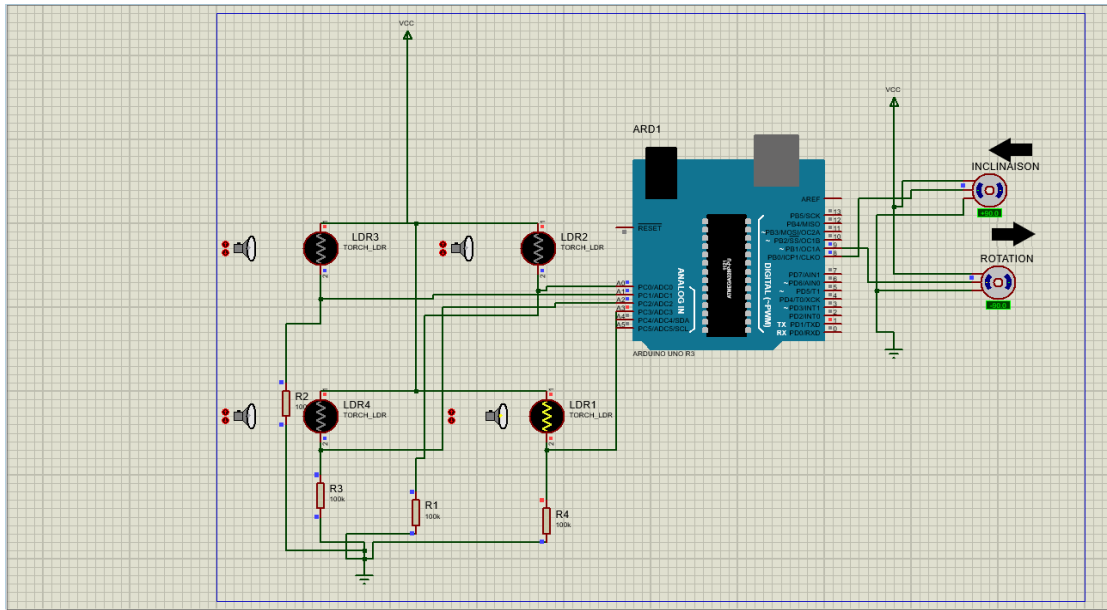


Figure (III.5) : Condition pour LDR1 supérieure aux autres capteurs.

Case 2 : l'intensité lumineuse du LDR2 > LDR1, LDR3 et LDR4

La figure (III.6) montre la condition dans laquelle le capteur LDR 2 obtient l'intensité lumineuse la plus élevée. La position de la lumière dans ce cas est en position 2. Par conséquent, pour que tous les capteurs acquièrent la même intensité de lumière, l'axe d'inclinaison doit se déplacer dans le sens horaire et l'axe de rotation se déplacer dans le sens horaire comme indiqué par les servomoteurs A et B sur La figure (III.5).

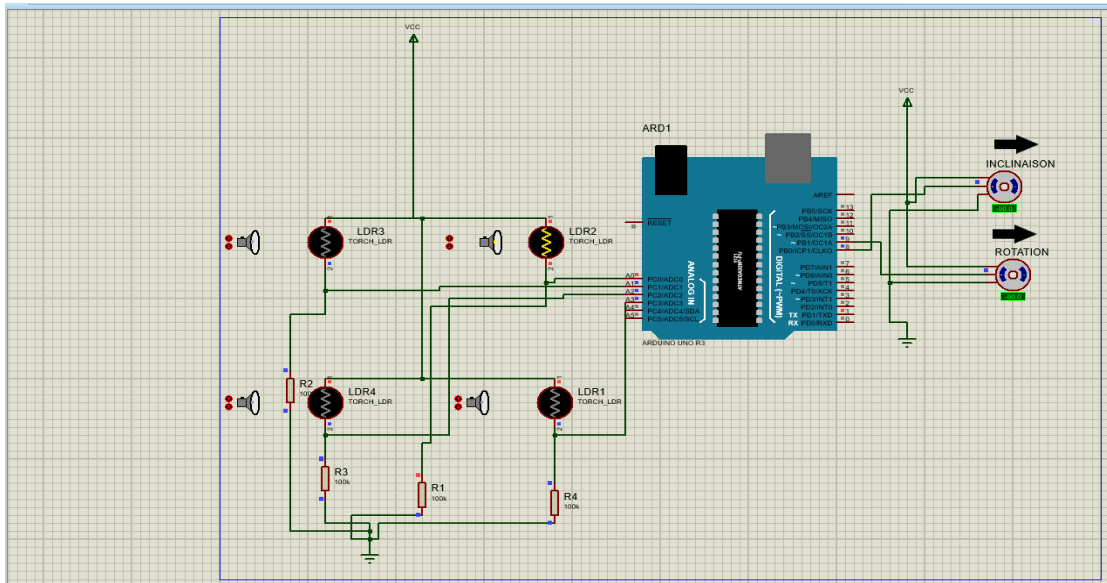


Figure (III.6) : Condition pour LDR2 supérieure aux autres capteurs.

Cas 3 : l'Intensité lumineuse du LDR3 > LDR1, LDR2 et LDR4

La figure (III.7) est la condition lorsque la lumière est placée sur la position 3, ainsi le capteur LDR 3 gagne l'intensité la plus élevée de lumière par rapport aux autres capteurs. Pour que l'ensemble du capteur LDR atteigne la même intensité lumineuse, l'axe d'inclinaison qui est le servomoteur A tourné dans le sens horaire. D'autre part, l'axe de rotation qui est contrôlé par le servomoteur B tournera dans antihoraire.

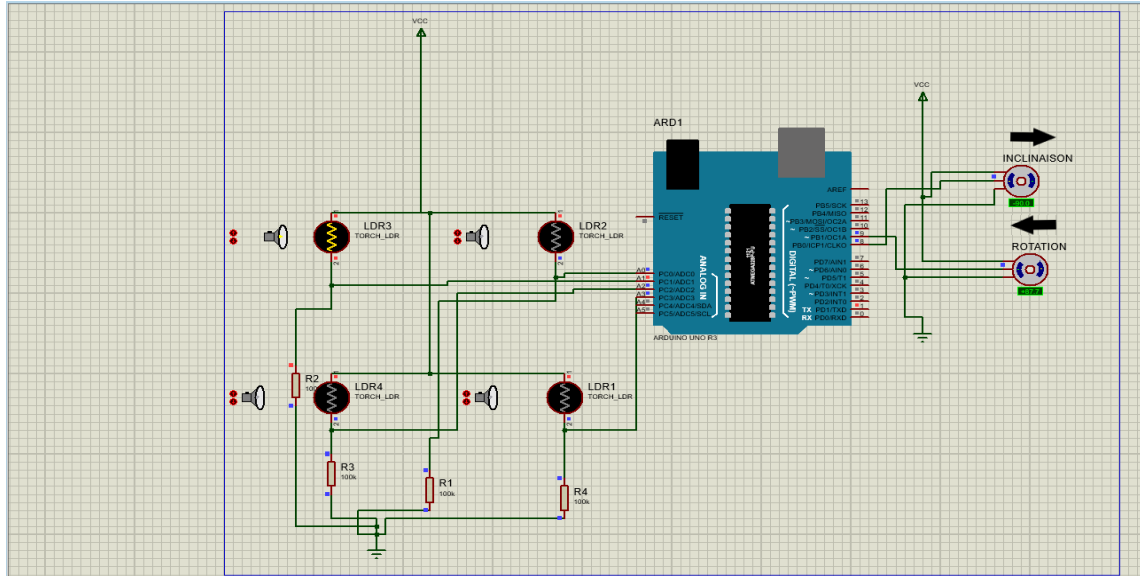


Figure (III.7) : Condition pour LDR3 supérieure aux autres capteurs.

Cas 4 : l'Intensité lumineuse du LDR4 > LDR1, LDR2 et LDR3

La figure (III.8) montre la condition lorsque le capteur LDR 4 a reçu la plus haute intensité de lumière et la position de la lumière est en position 4. Dans ce cas, le suiveur solaire doit faire pivoter son axe d'inclinaison dans le sens horaire et l'axe de rotation doit tourner dans le sens antihoraire. Dans cette simulation, le servomoteur A se déplace dans le sens antihoraire et le servomoteur B tournera dans le sens antihoraire d'une montre.

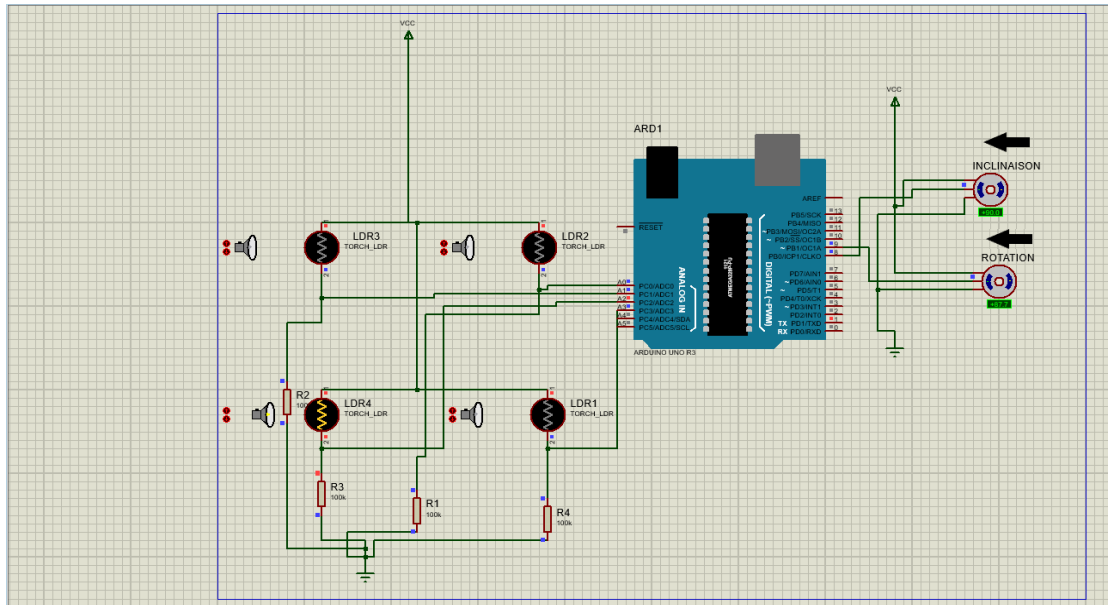


Figure (III.8) : Condition pour LDR4 supérieure aux autres capteurs.

Cas 5 : l'Intensité lumineuse $LDR1 = LDR2 = LDR3 = LDR4$

La figure (III.9) est le cas final de la partie programmation. Cela compare l'ensemble du capteur sur une valeur fixe de 15,1lux, ce qui signifie que tous les capteurs reçoivent la même intensité lumineuse. La position de la lumière est placée à la position 5 où la lumière distribuée équitablement. Par conséquent, les servomoteurs A et B restent dans la même position au lieu de tourner. Dans les applications réelles, c'est là que le panneau solaire est perpendiculaire à la lumière du soleil et la production d'énergie peut être amélioré.

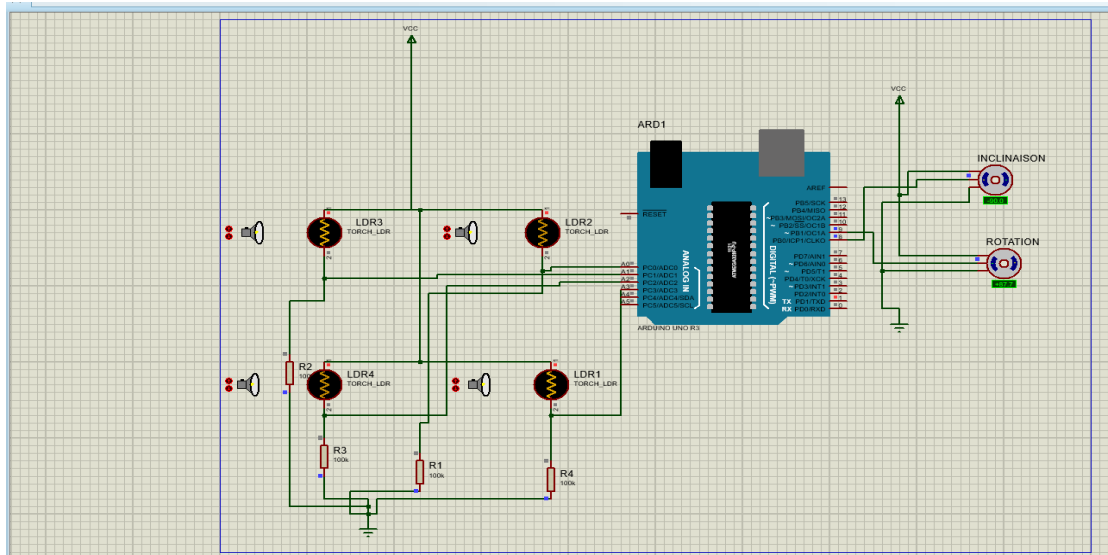


Figure (III.9) : Condition lorsque tous les capteurs LDR ont reçu la même intensité Lumineuse

Après avoir la présentation et l'explication de la simulation du fonctionnement du suiveur on passe à la simulation du régulateur de charge MPPT.

III.5. Simulation du contrôleur de charge MPPT en Proteus :

La figure (III.10) illustre le schéma électrique permettant la simulation du comportement du contrôleur de charge MPPT.

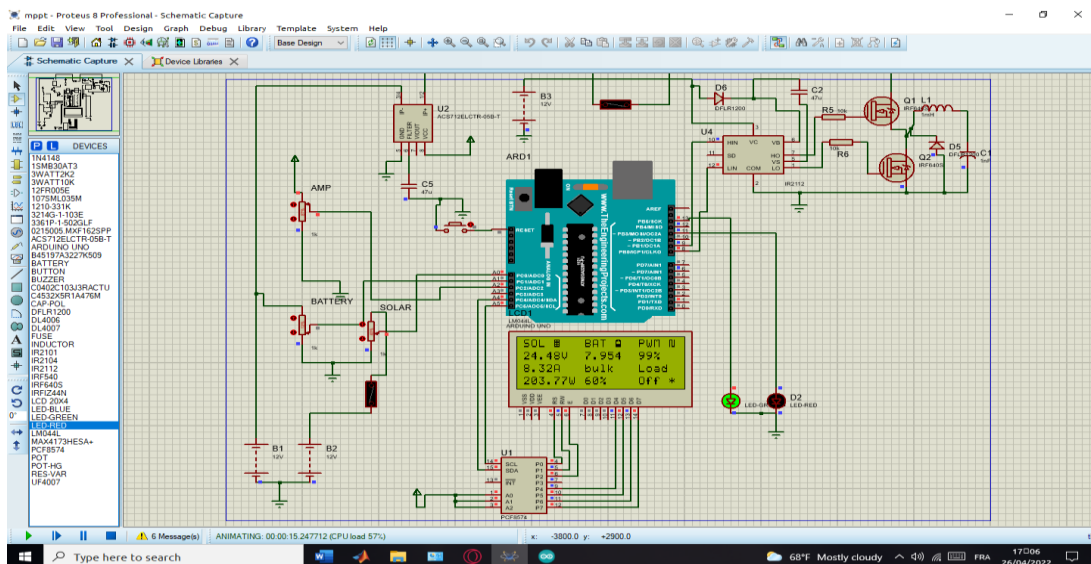


Figure (III.10) : Schéma électrique du contrôleur de charge MPPT simulé en ISIS Proteus.

III.5.1. La conception du contrôleur de charge :

Ce Contrôleur de charge solaire MPPT basé sur Arduino. Il a des caractéristiques telles que l'affichage LCD et l'indication LED. Il est équipé de diverses protections pour protéger le circuit des conditions anormales. Le microcontrôleur utilisé dans ce contrôleur est Arduino Uno même utilisé dans notre suiveur. Cette conception convient à panneau solaire de 50W pour charger un plomb-acide 12V couramment utilisé batterie. Nous pouvons également utiliser d'autres cartes Arduino comme Pro Mini, Micro et Nano.

Les composants utilisés pour réaliser un contrôleur de charge sont :

1. Arduino Uno
2. Current Sensor (ACS712-5A)
3. Buck Converter (LM2596)
4. LCD display (20x4 I2C)
5. Diodes (2x NFLR1200)
6. MOSFET (2x IRF6405))
7. MOSFET driver (IR2112)
8. Inducteur (1x 33uH -5A)
9. LED (1 x Rouge ,1 x vert)
10. Condensateurs (2 x 47 uF)
11. Condensateurs polarisés (1x 1nF)
12. Potentiomètre (x2)
13. Fusible (2x 5A)
14. Résistance (2x 10kohm)

On utilise un convertisseur abaisseur (Buck Converter) est un convertisseur DC-DC dans lequel la tension de sortie est toujours inférieure ou égale à la tension d'entrée. Le schéma d'un convertisseur abaisseur est montré dans la figure (III.11). [33]

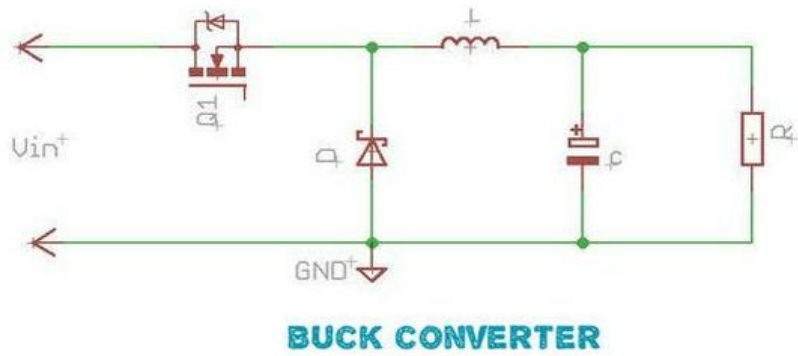


Figure (III.11) : un convertisseur abaisseur (Buck Converter).

III.5.1.1. Principe de fonctionnement de Buck Converter :

a) Lorsque le MOSFET est activé :

Lorsque le MOSFET est activé, Le courant circule dans l'inductance (L), la charge (R) et le condensateur de sortie (C) comme montré sur la figure (III.12) et la figure (III.13). Dans cette condition, la diode est inversée. Donc aucun courant ne le traverse. Pendant la marche l'énergie magnétique de l'état est stockée dans l'inducteur et l'énergie électrique est stockée dans le condensateur de sortie.[31]

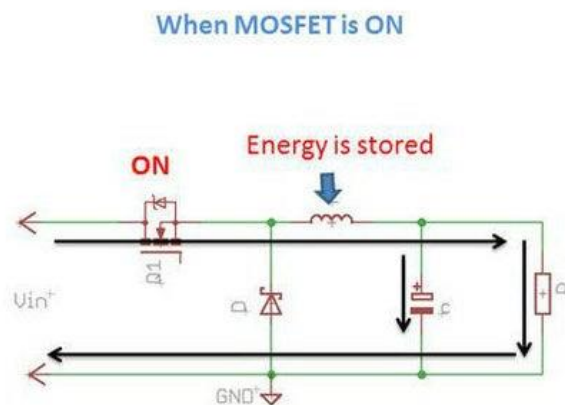


Figure (III.12) : l'état du convertisseur lorsque le MOSFET est activé

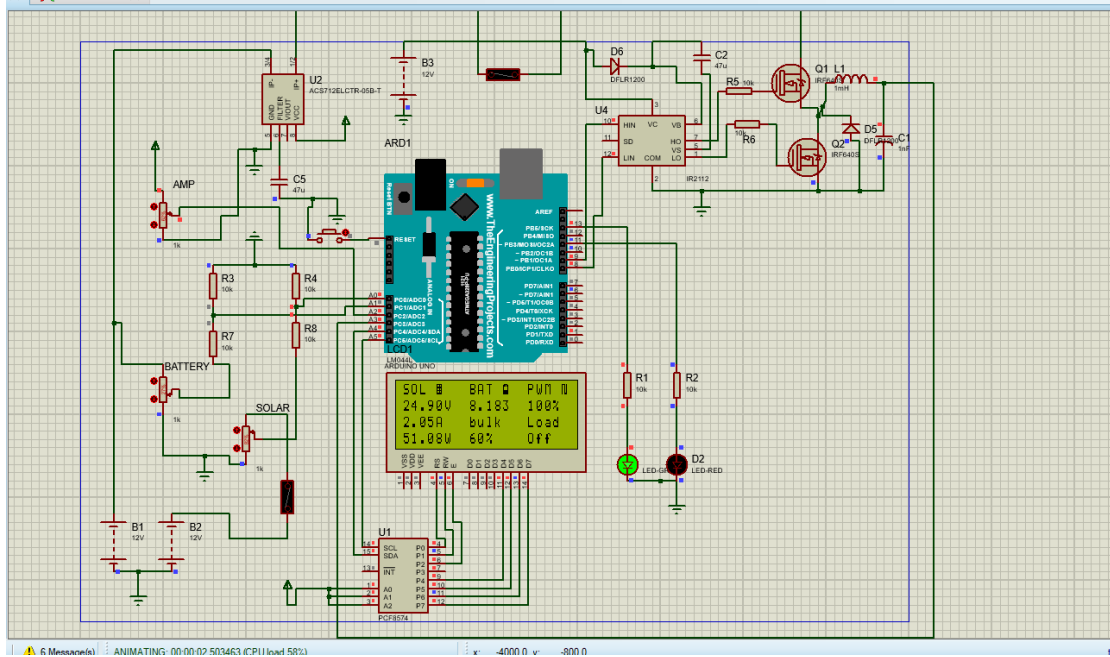


Figure (III.13) : l'état du MPPT Lorsque le MOSFET est activé

b) Lorsque le MOSFET est désactivé :

Lorsque le MOSFET est désactivé, l'énergie stockée dans l'inductance est effondrée et le courant complète son chemin à travers la diode (polarisée en direct) comme indiqué dans la figure (III.14) et la figure (III.15). Lorsque l'énergie stockée dans l'inducteur disparaît, l'énergie stockée dans le condensateur est fournie à la charge pour maintenir le courant. [31]

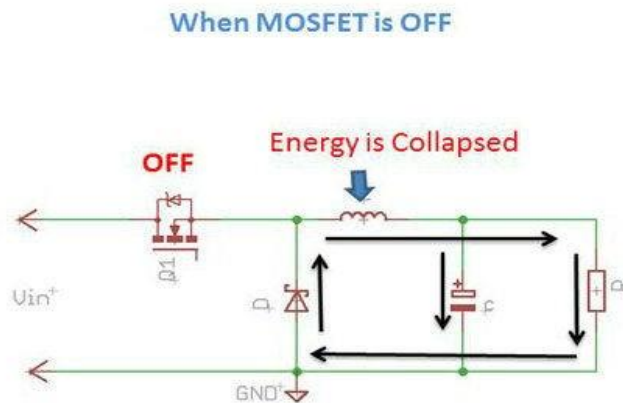


Figure (III.14) : l'état du convertisseur lorsque le MOSFET est désactivé.

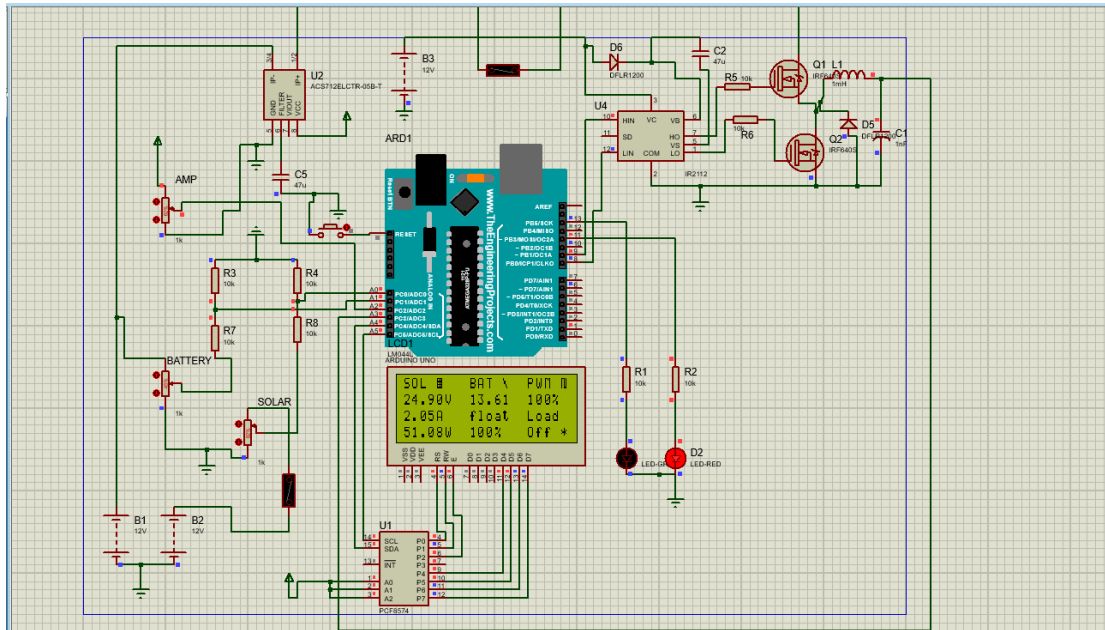


Figure (III.15) : l'état du MPPT lorsque le MOSFET est désactivé.

III.5.1.2. L'organigramme du contrôleur de charge :

Voici l'organigramme qui explique le déroulement des différentes séquences de commande du contrôleur de charge MPPT, Figure (III.16), il comportera plusieurs boucles dont la fin d'exécution succède toujours à son commencement. [31]

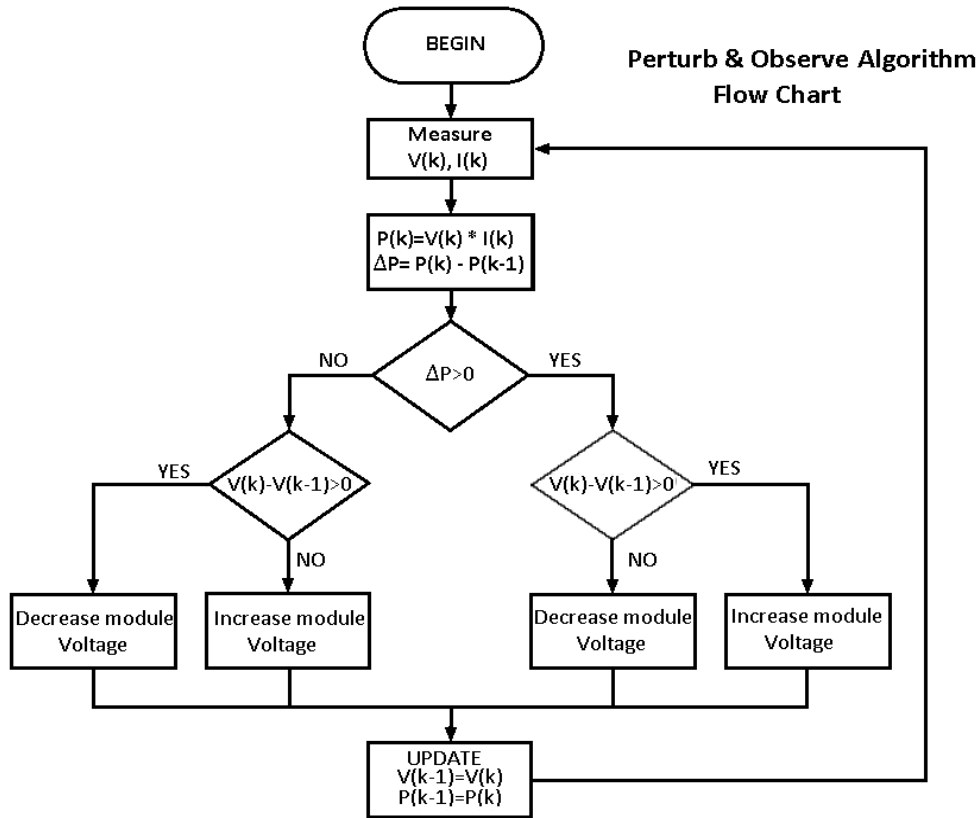


Figure (III.16) : Organigramme de commande du contrôleur de charge MPPT.

Pour tirer les performances du traqueur on utilise une application web PVGIS pour avoir de la donnée comme le rayonnement et l'énergie.

III.5.2. Simulation de la performance du suiveur par le PVGIS :

Notre simulation est effectuée par l'application PVGIS permettant d'estimer la production de n'importe quel système photovoltaïque installé ou à installer en Europe ou en Afrique.

PVGIS est une application Web (figure. III.17) qui permet à l'utilisateur d'obtenir des données sur le rayonnement solaire et la production d'énergie des systèmes photovoltaïques (PV), n'importe où dans la plupart des régions du monde. Son utilisation est entièrement gratuite, sans aucune restriction quant à l'utilisation des résultats et sans aucune inscription nécessaire. PVGIS peut être utilisé pour effectuer un certain nombre de calculs différents.

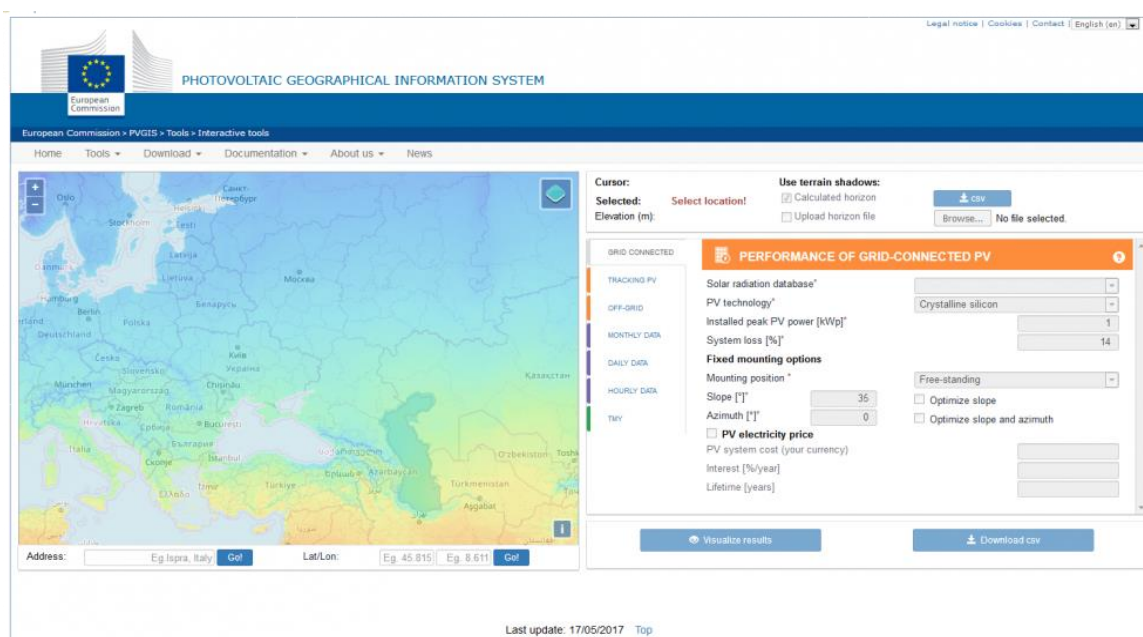


Figure (III.17) : Interface PVGIS lorsque vous accédez pour la première fois à l'application Web.

III.5.2.1. Résultat obtenu par la simulation :

Le Site de simulation choisi est le Pôle Universitaire de m'sila.

a) *Entrées fournies :*

Latitude/Longitude	35.700,4.551
De M'sila	
Horizon	Calculé
Base de données	PVGIS-SARAH2
Technologie PV	Silicium cristallin
PV installée	0.2 kWp
Pertes du système	14

Tableau (III.1) : Entrées fournies

b) *Résultats de la simulation du suiveur a doublé axe :*

Angle d'inclinaison	[°]
Production annuelle PV [kWh]	467.97
Irradiation annuelle [kWh/m²]	3036.56
Variabilité interannuelle [kWh]	8.9

Tableau (III.2) : Résultats de la simulation du suiveur a doublé axe.

Changements de la production à cause de:

Angle d'incidence [%]	-1.32
Effets spectraux [%]	0.44
Temp et rayonnement faible [%]	-9.6
Pertes totales [%]	-22.94

Tableau (III.3) : cause de changements de la production du suiveur a doublé axe.

c) *Résultats de la simulation du système PV fixe :*

Angle d'inclinaison	32°
Angle d'azimut	0°
Production annuelle PV :	345.51 kWh
Irradiation annuelle :	2251.38 kWh/m ²
Variabilité interannuelle :	6.13 kWh

Tableau (III.4) : Résultats de la simulation du système PV fixe.

Changements de la production à cause de:

Angle d'incidence [%]	-2.59
Effets spectraux [%]	0.47
Temp et rayonnement faible [%]	-8.83
Pertes totales [%]	-23.27

Tableau (III.5) : cause de changements de la production du système PV fixe.

Mois	système PV fixe			système PV Mobile		
	E_m	H(i)_m	SD_m	E_m	H(i)_m	SD_m
Janvier	25.4	153.7	2.6	33.7	204.3	3.8
Février	25.3	154.8	2.8	32.7	200	4.1
Mars	30.4	190.9	1.7	39.7	248	2.7
Avril	30.7	199.8	1.9	41	264.3	3
Mai	32	213.7	1.6	45.6	300.8	3.1
Juin	31.5	216.6	0.8	46.5	315.7	1.8
Juillet	32.7	228.9	0.8	47.6	329.6	2
Août	32.2	224.4	1.1	44.6	308	1.8
Septembre	32.2	194.4	1.4	37.8	251.1	2.4
Octobre	28.5	183.6	2	36.5	234.2	3.1
November	24.1	148.8	1.8	31.2	192.5	2.7
December	23.5	142	2.2	31.1	188	3.2

Tableau (III.6) : Énergie PV et irradiation solaire mensuelle.

Avec :

E_m : Production électrique moyenne mensuelle du système défini [kWh].

H(i)_m : Montant total mensuel moyen de l'irradiation globale reçue par mètre carré sur les panneaux du système défini [kWh/m²].

SD_m : Déviation standard de la production électrique mensuelle à cause de la variation interannuelle [kWh].

On remarque que La production meilleure donnée par le panneau suiveur de soleil par rapport au panneau fixe est due principalement à l'irradiation maximale qui le caractérise. Nous illustrons cette variance en traçant la courbe suivante.

A l'aide de l'excelle nous avons tracé les courbes dans la Figure (III.18) et la Figure (III.19) que représenter l'irradiation et la production mensuelle.

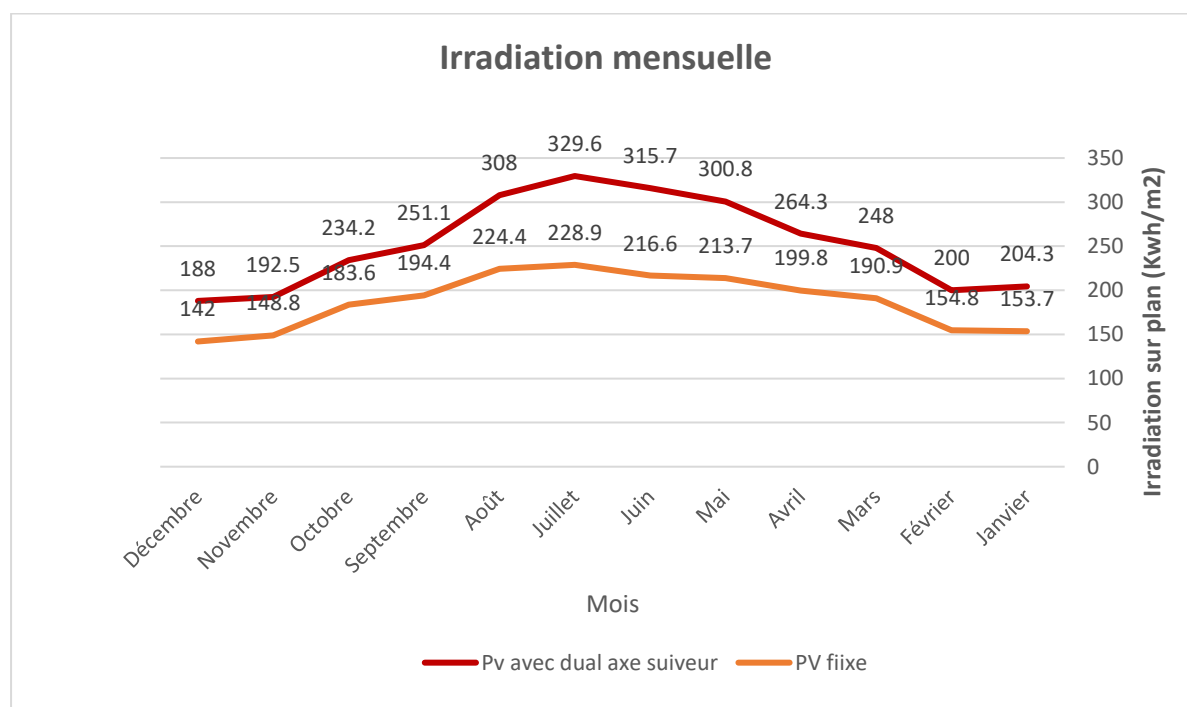


Figure (III.18) : Irradiation mensuelle du système PV.

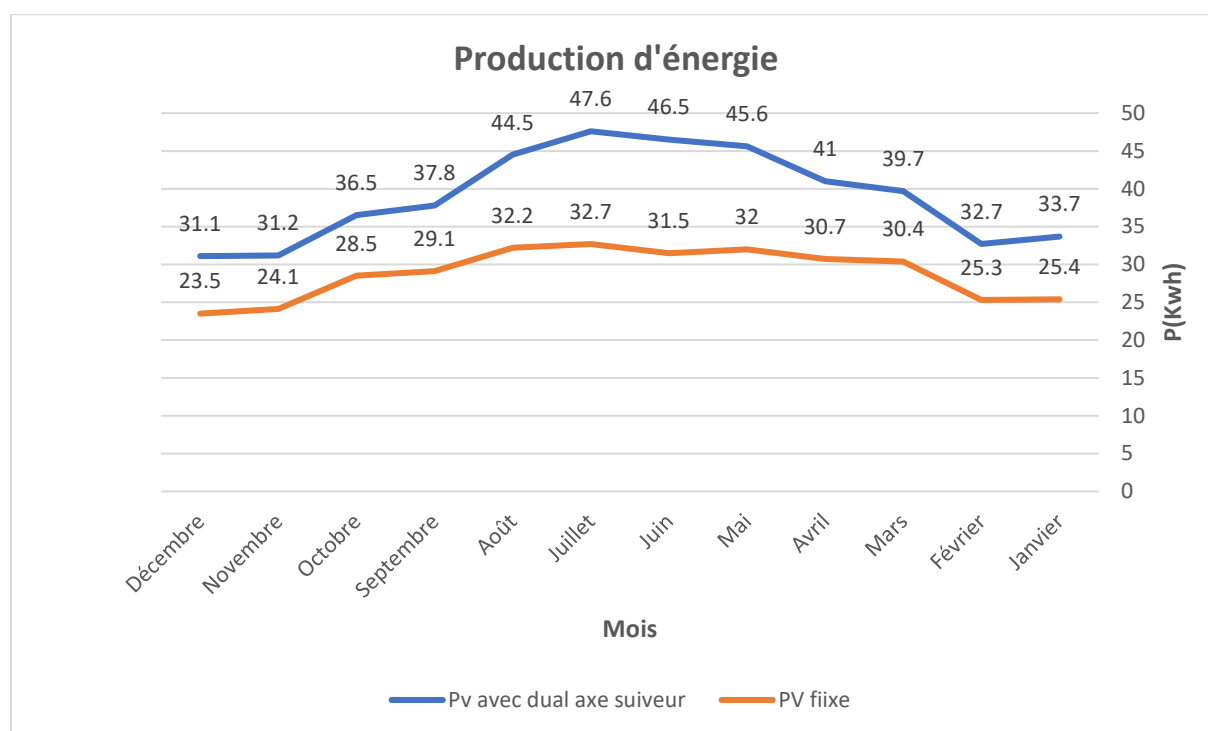


Figure (III.19) : Production électrique mensuelle du système PV.

III.5.2.3. Calcul d'enseillement reçu sur chaque type :

Nous allons dans cette partie estimer la quantité d'enseillement disponible sur site ainsi celle reçue et interceptée par un panneau fixe orienté au plein sud $\alpha = 0$ et incliné à l'angle de locale altitude $\beta = 32^\circ$.et pour de type Azimut/élévation on met α et β respectivement.

Heures TSV	Azimuth du soleil α	Hauteur du soleil β	Irradiation disponible sur le site	Irradiation reçu sur un suiveur	Irradiation reçu sur un panneau fix
4h00	-53.6°	0.0°	0	0	0
5h00	-62.7°	2.1°	95	89	0
6h00	-70.8°	13.3°	453	411	0
7h00	-78.5°	25.0°	726	653	10
8h00	-86.3°	37.1°	887	791	256
9h00	-84.8°	49.2°	962	851	521
10h00	-72.5°	61.2°	1006	883	740
11h00	-50.2°	72.0°	1030	900	869
12h00	0.0°	77.5°	1038	906	906
13h00	50.2°	72.0°	1030	900	869
14h00	72.5°	61.2°	1006	883	740
15h00	84.8°	49.2°	962	851	521
16h00	86.3°	37.1°	887	791	256
17h00	78.5°	25.0°	726	653	10
18h00	70.8°	13.3°	453	411	0
19h00	62.7°	2.1°	95	89	0
20h00	53.6°	0.0°	0	0	0
			11356	10062	5698
Rendement (%)				n=88.60%	n=50.17%

Tableau (III.7) : les mesures d'Irradiation reçu sur chaque type.

L'énergie reçue sur un panneau fixe incliné à l'angle de latitude est inférieure de celle disponible sur site. De la même façon nous pouvons calculer l'ensoleillement reçu de suiveur dual axes montré sur la figure (III.20).

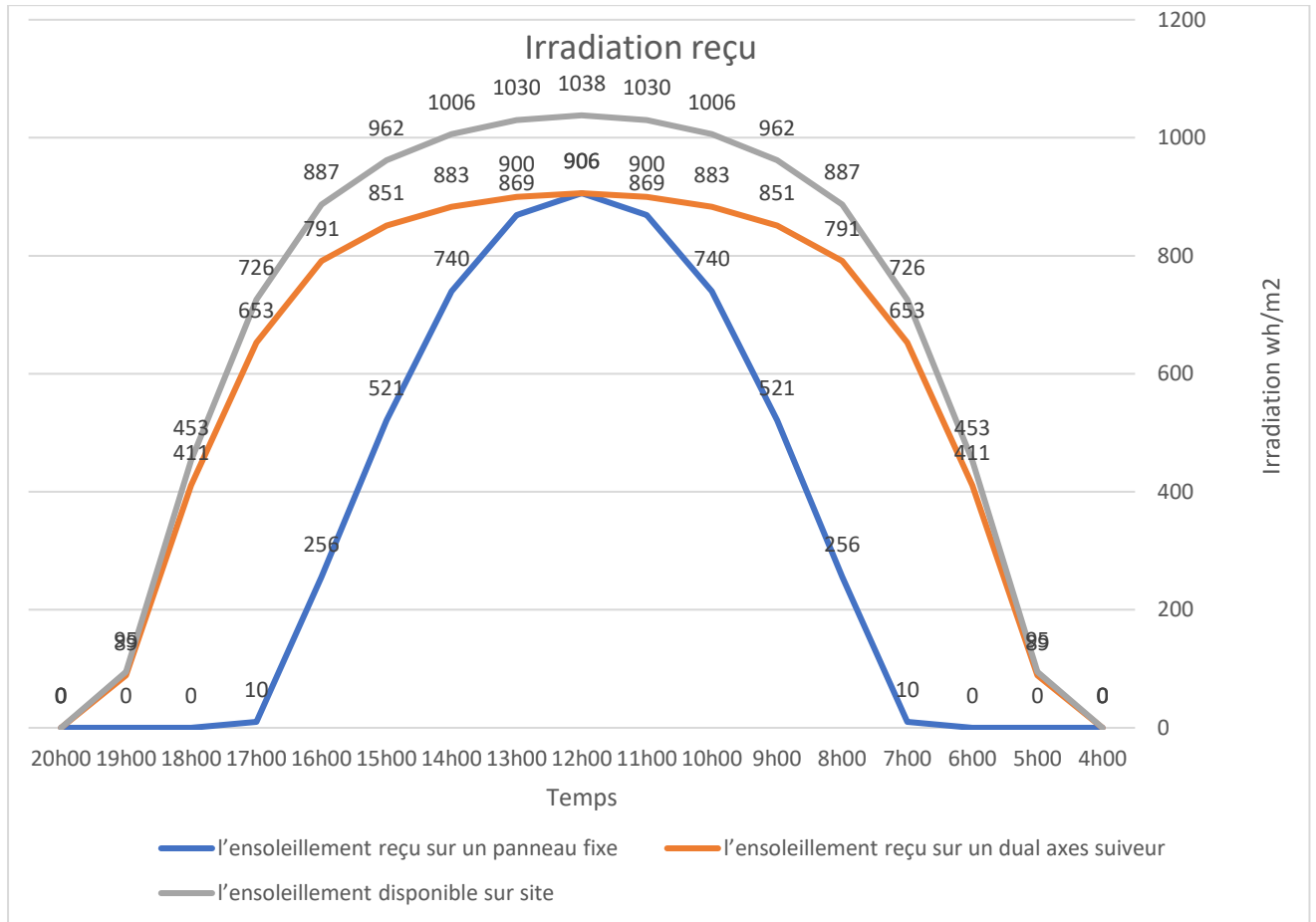


Figure (III.20) : Quantité d'énergie reçue et interceptée par dual axes suiveur et panneau fixe.

Le traqueur dual axes (azimut/élévation) prouve un bon résultat pour recevoir la grande quantité de flux par rapport au panneau fixe avec un rendement 88.60%, sa courbe est superposée avec la courbe d'insolation reçu. Par contre, le rendement du panneau fixe est de 50.17%. Nous résultat de simulation sont ont bon accord avec d'autres simulés on Matlab tirer de la littérature [32].

III. 6. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré pour mettre en œuvre le système suiveur via la simulation en utilisant le logiciel ISIS Proteus 8. En premier lieu, nous avons présenté le cahier des charges en décrivant les différents dispositifs employés dans ce projet. Puis, nous avons également présenté les environnements logiciels employés pour concevoir le système suiveur. Enfin, nous avons mis en évidence le programme élaboré pour commander le contrôleur de charge MPPT.

Grace à l'application Web PVGIS, nous avons pu obtenir des données sur le rayonnement solaire et la production d'énergie des systèmes photovoltaïques pour qu'on puisse tracer les courbes et calculer le rendement du traqueur et du système fixe, cette comparaison faite a pour but de montrer l'efficacité du suiveur solaire, rendement de 88,60% par rapport à celle du système fixe 50, 17%.

La simulation du circuit du suiveur solaire nous a montré une bonne concordance avec d'autres résultats de simulation tirés de la littérature [32]. Ceci nous confirme le bon fonctionnement de notre suiveur solaire.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude et la simulation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino UNO, à l'aide des composants électroniques programmables gérés par un Microcontrôleur Arduino, L'objectif de ce travail réside dans la mise en œuvre d'une solution technique permettant de réaliser un panneau photovoltaïque mobile autour d'un dual axes (Azimut/élévation) afin d'améliorer son taux d'absorption du rayonnement solaire. Pour cela, le système que nous avons pu simuler s'est avéré capable de suivre la position du soleil.

Dans un premier temps, nous avons détaillé plusieurs notions en relation avec l'énergie. Cette dernière, qui peut parfois s'avérer comme un concept assez complexe, possède différentes formes, sources et applications, ce qui la rend comme étant un domaine d'étude très vaste. Puis un bref historique sur l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque ainsi que l'évolution de son utilisation est Décrites.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté en premier temps le principe de fonctionnement de la cellule solaire. Ensuite, faire une description sur les suiveurs solaires (constitution, fonctionnement, les différents types des suiveurs ainsi que les méthodes de poursuite adoptée pour le fonctionnement des suiveurs solaires). Enfin, nous avons présenté les actionneurs employés dans la conception et la réalisation des suiveurs solaires.

Dans le troisième chapitre Nous avons présenté les résultats de notre simulation en Proteus, Le traqueur dual axes (azimut/élévation) prouve un bon résultat pour recevoir la grande quantité de flux par rapport au panneau fixe avec un rendement 88.60%, sa courbe est superposée avec la courbe d'insolation reçu. Par contre, le rendement du panneau fixe est de 50.17%. Nos résultats de simulation sont en bon accord avec d'autres simulés on Matlab tiré de la littérature [32].

Notre système simulé est capable de suivre fidèlement la position du soleil toute au long de la journée, et il assure à chaque instant une adaptation entre la source et la charge par un contrôleur de charge MPPT.

Comme perspective, nous projetons d'ajouter un système automatique de nettoyage.

Références

[1] Boudjelakha Amar, Guessoumi Farid, (2017/2018), "Command d'un Panneau solaire à l'aide d'un microcontrôleur ATMEGA", Mémoire de fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme MASTER ACADEMIQU en Télécommunications, Université Echahid HAMMA Lakhdar d'El-Oued.

[2] I. Laib, Y. Elgouni, S. Boukhous, A. Hamidat, (2014), " Etude et réalisation d'un système solaire pour générateur photovoltaïque".

[3] https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/sources_denergie/187238

[4] http://www.energies-renouvelables.org/energies_renouvelables.asp

[5] Bara Meriem, Bennouri sabrina, (2019)," Etude et conception d'un suiveur solaire pour application photovoltaïque", mémoire de Master 2, Centre Universitaire Abdelhafid B oussouf -Mila.

[6] energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/

[7] Cea de la recherche à l'industrie, Clefs Cea n°49/50/51 Le photovoltaïque : les filières, les marchés, les perspectives - Patrick Jourde CEA/GENEC, Cea jeunes : l'énergie (les docs des incollables) ADEME 13è journées internationales de thermiques d'ALBI (Ecole des Mines), août (2007) (un nouveau concept de centrale solaire thermodynamique basé sur un récepteur à lit fluidisé : 12ème rencontre scientifique de la région centre Les nouvelles piles nanocristallines. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne Desertec.org

[8] S. Bentouba, A. Slimani, M. S. Boucherit, (2007), "Revue des Energies Renouvelables"

[9] S. Labed, (2004)" Contribución al desarrollo de métodos para la electrificación rural Fotovoltaica a gran escala". Thèse de doctorat. Universidad politécnica de madrid Escuela técnica superior de ingenieros de telecomunicación, Madrid.

[10] <http://www.enerzine.com/1/235+algerie-le-nouvel-eldorado> solaireenergie+.html

[11] R. Sellami, M. Abbas, H. Bendjebbas, (2007), "Installation et étude d'un chauffe-eau solaire couple a un cumulus pour alimenter la cuisinée l'udes en eau chaude", Rapport préliminaire. Centre de Développement des Energies Renouvelables, Algérie

[12] <https://ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html>

[13] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaique-comment-ca-marche#:~:text=Le%20principe%20de%20fonctionnement,et%20de%20neutrons...%20>

[14] Quinte Sciences, Les cellules photovoltaïques en silicium : théorie et fabrication, Nicolas Richet

[15] Necir.A et Bouchaal.A, (2018), "conception et réalisation d'un suiveur du soleil Commandé par une Carte Arduino ", Mémoire de Master 2, université d'El-Oued

[16]<https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/rendement-et-puissance-crete-des-cellules-photovoltaiques/>

[17] F. decq, B roussel, M lemagnant, (2014), "Rapport de projet : tournesol photovoltaïque".

[18] L. Colbert, T. Lucas Hadjeres, (2015), "Suiveur solaire".

[19] Foundou.A et Hassan.S, (2018), " pilotage automatique d'un système photovoltaïques ", mémoire de Master, université Aboubakr Bekaïd Tlemcen, P 38-39.

[20] Mlle BENMOHAMMADI Zahra, (2013/2014), " Etude, conception et réalisation d'une commande d'un tracker solaire (suiveur solaire)", Mémoire de fin d'étude Master, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah.

[21] Sini Boukrout.A et Lamr Mohamed, (2017), " Etude et conception d'un suiveur du soleil pour un générateur photovoltaïques", mémoire de master, université A.M.Oulhadj-Bouira, P 18-19.

[22] Boujnane.S, (2016), "Tracker solaire à deux axes", mémoire de master, université Sidi Mohamed ben Abdellah

[23] S. Boukhenous et M. Aissat, (2010), "Contribution à la Réalisation d'un Suiveur Automatique pour Panneau Solaire", Vème Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'environnement, 04-06 Novembre, , Sousse, Tunisie," " Laboratoire d'Instrumentation, LINS, Faculté d'Electronique &d'Informatique USTHB, BP.32, Bab-Ezzouar, 16111, Alger.

[24] http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf

[25]<https://www.solaris-store.com/content/44-principe-de-fonctionnement-d-unregulateur-solaire>.

[26] <https://mon-panneau-solaire.info/panneaux-solaires/regulateur-solaire/>

[27] PDF /arduino. odtClasses de 2nde SI-CIT et de première SI

[28] <http://www.elektronik.fr/logiciels/proteus.php> 05-05-2016

[29] M. Bernard, (04/09/2008), "Présentation de la suite logicielle PROTEUS".

[30] L. Armand. "SAISIE DE SCHEMA ISIS 6.

[31] ARDUINO MPPT SOLAR CHARGE CONTROLLER (Version-3.0), by opengreenenergy

[32] Boughoufala Mohamed, (2011)," Conception et réalisation d'un système de Suiveur Solaire pour des systèmes photovoltaïques", Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Magister en électronique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oron MOHAMED BOUDIAF