

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électronique
Spécialité Instrumentation

présenté par

M'SILTI Djamila

&

ARAIBIA Maria Hibet Allah

ETUDE ET REALISATION D'UN SUIVEUR SOLAIRE

Proposé par : **Mme GEURGAH MANEL**

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

ملخص:

التكنولوجيا الكهروضوئية هي ثورة الطاقات المتجددة ، هي طاقة أساسية لمستقبل الطاقات المستدامة. يقدم هذا العمل إدراكاً لنظام التتبع الشمسي ذي المحورين ، مما يضمن استخدام الألواح الكهروضوئية التي توضع مواجهة للشمس قدر الإمكان من أجل زيادة كفاءة الطاقة. تمحور عملنا في هذا المشروع حول تحقيق الجزء الإلكتروني من التابع باستخدام لوحة اردوينو أونو التي تستقبل إشارات من مستقبلات المقاوم الضوئي للتحكم في محركين مؤازرين على محورين رأسياً وأفقياً. أظهرت الاختبارات الأولى أن نظامنا يعمل بشكل جيد.

كلمات المفاتيح: التكنولوجيا الكهروضوئية ، التتبع الشمسي ، الألواح الكهروضوئية ، كفاءة الطاقة ، التابع ، اردوينو أونو ، المقاوم الضوئي ، محركين مؤازرين ، محورين.

Résumé :

La technologie photovoltaïque est la révolution des énergies renouvelable, c'est une énergie primordiale pour le future des énergies durable.

Ce travail présente une réalisation d'un système de poursuite solaire à deux axes, qui assure l'exploitation des panneaux photovoltaïque face au soleil le maximum possible dans le but d'augmenter leur rendement énergétique. Notre travail dans ce projet a abouti à la réalisation de la partie électronique de suiveur utilisant une carte ARDUINO UNO pour commander les deux servomoteurs sur deux axes vertical et horizontal.

Les premiers essais montrent un bon fonctionnement de notre système.

Mots clés : photovoltaïque; poursuite solaire ; panneaux ; rendement ; suiveur; ARDUINO UNO ; LDR ; servomoteurs ; deux axes.

Abstract :

The photovoltaic technology is the revolution of renewable energy; It is an essential energy for the future of sustainable energies.

This work presents a realization of a solar tracking system with two axes, which ensures the use of photovoltaic panels facing the sun as much as possible in order to increase the efficacy of their energy. our work in this project centered around the realization of the electronic part of The follower using the ARDUINO UNO board that receives signals from the LDRs receivers to control two servo motors on dual axis vertical and horizontal.

The first tests showed that our system is performing well.

Keywords : photovoltaic ; solar tracking ; photovoltaic panels ; efficacy ; ARDUINO UNO ; LDRs ; servo motors ; dual axis.

Listes des acronymes et abréviations

| | |
|--------------|---|
| PV | Photovoltaïque |
| ZCE | Zone de charge d'espace |
| G | Rayonnement global |
| p-n | Junction |
| MONO | Mono-cristallin |
| POLY | Poly-cristallin |
| EVA | Ethylène Acétate de Vynite |
| Cd-Te | Tellurure de Cadmium |
| CIS | Sélénure de cuivre et d'indium |
| CIGS | Sélénure de cuivre, indium et gallium |
| Np | nombres des cellules en parallèles |
| Icc | Courant de court circuit |
| Vco | Tension de circuit ouvert |
| Ipsc | Courant de court circuit pour Np |
| Vpco | Tension de circuit ouvert pour Np |
| Ns | Nombres des cellules en séries |
| Isc | Courant de court circuit pour Ns |
| Vsco | Tension de circuit ouvert pour Ns |
| Ipv | courant de court circuit |
| Vpv | Tension de circuit ouvert |
| Ns-Np | Nombres des cellules en série-parallèle |
| Rsh | Résistance Shunt |
| Rs | Résistance série |
| Isat | Courant de saturation |
| Id | Courant qui traverse la diode |
| Iph | Photo-Courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température |
| K | Constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23} \text{ j/K}$) |
| T | La température effective des cellules en Kelvin(K) |
| e | La charge de l'électron ($e=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ c}$) |

| | |
|----------------------------|--|
| n | Le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n$) |
| FF | Facteur de forme |
| Pm | puissance maximale fournie par la cellule |
| η | Le rendement |
| E | l'éclairement |
| S | Surface de la cellule |
| I_m | Courant maximale |
| V_m | Tension maximale |
| GPV | Groupe des cellules photovoltaïques |
| α | Angle d'Altitude (incidence) en (°) |
| ϕ | Latitude de lieu |
| δ | Déclinaison solaire en (°) |
| ω | Angle horaire |
| Az | Angle d'azimut en (°) |

Table des matières

| | | |
|-------------|---|---|
| I. | Résumé..... | |
| II. | Listes des acronymes et abréviations..... | |
| III. | Tables des matières | |
| IV. | Introduction générale | 1 |

Chapitre 1 : L'ENERGIE SOLAIRE

| | |
|--|-----------|
| 1.1 Introduction..... | 3 |
| 1.2 Historique de la cellule photovoltaïque..... | 4 |
| 1.3 Energie solaire photovoltaïque | 6 |
| 1.3.1 Technologie photovoltaïque (PV)..... | 6 |
| 1.3.2 Principe de fonctionnement..... | 7 |
| 1.4 Le potentiel d'énergie en Algérie..... | 7 |
| 1.4.1 Energie solaire..... | 7 |
| 1.5 Le rayonnement solaire | 9 |
| 1.5.1 Définition | 9 |
| 1.5.2 types de rayonnement..... | 10 |
| a- Le rayonnement direct | 10 |
| b- Le rayonnement diffus | 10 |
| c- Le rayonnement global | 11 |
| 1.5.3 Le rayonnement en Algérie..... | 11 |
| 1.6 La cellule photovoltaïque | 12 |
| 1.6.1 Définition | 12 |
| 1.6.2 Principe de fonctionnement | 13 |
| 1.7 Les différents types de panneaux photovoltaïques | 14 |
| 1.7.1 Les panneaux photovoltaïques monocristallins | 15 |
| 1.7.2 Les panneaux photovoltaïques poly cristallins | 16 |
| 1.7.3 Les panneaux solaires amorphes | 17 |
| 1.8 Regroupement des cellules photovoltaïques | 17 |
| 1.8.1 Cellules mise en série | 17 |
| 1.8.2 Cellules Mise en parallèle | 18 |
| 1.8.3 Regroupement (série et parallèle) | 20 |
| 1.9 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïques..... | 21 |
| 1.9.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque | 23 |

| | | |
|--------|---|----|
| 1.9.2 | Courant de court -circuit (I_{cc}) | 24 |
| 1.9.3 | Tension de circuit –ouvert (V_{CO}) | 25 |
| 1.9.4 | Puissance maximale P_m | 25 |
| 1.9.5 | Facteur de forme FF | 26 |
| 1.9.6 | Rendement énergétique | 26 |
| 1.10 | Module photovoltaïque | 27 |
| 1.11 | Caractéristique courant-tension d’un module | 28 |
| 1.12 | Les paramètres qui influent sur la caractéristique | 28 |
| 1.12.1 | Influence de l’éclairement sur un PV..... | 29 |
| 1.12.2 | Influence de la température sur un PV..... | 30 |
| 1.13 | Protection des modules photovoltaïques | 31 |
| 1.14 | Conclusion | 33 |

Chapitre 2 : LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1 | Introduction | 34 |
| 2.2 | Trajectoire solaire | 35 |
| 2.2.1 | L’angle d’Altitude ou l’élévation solaire $\alpha(^{\circ})$ | 35 |
| 2.2.2 | La déclinaison solaire $\delta (^{\circ})$ | 36 |
| 2.2.3 | Angle d’azimut Az en ($^{\circ}$)..... | 36 |
| 2.3 | Système suiveur solaire | 37 |
| 2.3.1 | Etat de l’art des suiveurs solaire..... | 37 |
| 2.3.2 | Définition..... | 38 |
| 2.3.3 | Principe de fonctionnement des suiveurs solaires..... | 39 |
| 2.3.4 | Les type de suiveur solaire..... | 39 |
| a. | Suiveur passif..... | 40 |
| b. | Suiveur actif..... | 41 |
| 2.4 | Méthodes et technique de poursuite | 42 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.4.1 | La méthode des capteurs de lumière..... | 43 |
| 2.4.2 | La méthode astronomique..... | 43 |
| 2.5 | La différence entre l'installation avec suiveur et installation fixe..... | 44 |
| 2.6 | Les moyenne de contrôle de l'augmentation d'énergie par traqueur..... | 45 |
| 2.7 | Les avantages et les inconvénients de suiveur..... | 45 |
| 2.7.1 | Avantages..... | 46 |
| 2.7.2 | Inconvénients..... | 47 |
| 2.8 | Conclusion..... | 48 |

Chapitre 3 : CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Introduction..... | 49 |
| 3.2 | Description du système de poursuite..... | 50 |
| 3.3 | Schémas synoptique..... | 51 |
| 3.4 | Outils de développement (Composants)..... | 52 |
| 3.4.1 | Présentation de la carte ARDUINO..... | 52 |
| 3.4.2 | Résistance..... | 55 |
| 3.4.3 | Capteurs LDR (résistance à la lumière)..... | 55 |
| 3.4.4 | Circuit LM2596 DC-DC..... | 56 |
| 3.4.5 | Mini panneau solaire..... | 58 |
| 3.4.6 | Mini servomoteur..... | 59 |
| 3.5 | Réalisation du dispositif..... | 61 |
| 3.5.1 | Cahier des charges..... | 62 |
| 3.5.2 | Partie programmation..... | 62 |
| a) | Programmation..... | 62 |
| b) | L'organigramme..... | 63 |
| c) | Le programme..... | 64 |
| 3.5.3 | Partie simulation (PROTEUS_ISIS)..... | 66 |
| 3.5.4 | Partie électronique..... | 67 |

| | |
|--|-----------|
| a) Branchement des LDR..... | 67 |
| b) Branchement des servomoteurs | 67 |
| c) Réalisation du circuit électrique..... | 69 |
| d) L'Alimentation..... | 69 |
| 3.5.5 Partie mécanique..... | 69 |
| a) Structure de suiveur..... | 69 |
| b) Positionnement des servomoteurs..... | 70 |
| 3.5.6 Schémas global (Général) de notre suiveur (photo de notre suiveur)..... | 72 |
| 3.6 Principe de fonctionnement du système suiveur solaire..... | 72 |
| 3.7 Conclusion..... | 74 |
| CONCLUSION GENERAL | 75 |
| ANNEX | 76 |
| BIBLIOGRAPHIES | 80 |

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : A-C BECQUEREL

Figure 1.2 : Photo de trois chercheurs américains, Chapin , Pearson et Prin

Figure 1.3 : Premier satellite américain

Figure 1.4 : Des produits fonctionnant grâce a l'énergie solaire

Figure 1.5 : Toits photovoltaïques

Figure 1.6 : Ressources solaire au monde

Figure 1.7 : La carte de l'irradiation solaire en Algérie

Figure 1.8 : Répartition du spectre solaire au-dessus de l'atmosphère terrestre

Figure 1.9 : Composantes du rayonnement solaire

Figure 1.10 : Les différentes zones énergétiques dans l'Algérie

Figure 1.11 : Centrale solaire photovoltaïque

Figure 1.12 : Principe d'une cellule solaire

Figure 1.13 : Dopage de silicium

Figure 1.14 : Structure d'un panneau photovoltaïque

Figure 1.15 : Panneau monocristallins

Figure 1.16 : Panneau poly cristallins

Figure 1.17 : Panneau amorphes

Figure 1.18 : Schéma de 3 cellules photovoltaïque associer en parallele

Figure 1.19 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de NS cellules en parallèle

Figure 1.20 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série

Figure 1.21 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de Np cellules en série

Figure 1.22 : Groupement des cellules en série- parallèle

Figure 1.23 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de Np cellules en

Figure 1.24 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV

Figure 1.25 : Caractéristique I(V) et définitions des paramètres PV

Figure 1.26 : Les courbes $I = f(V)$

Figure 1.27 : Evolution de constructions des systèmes de production PV

Figure 1.28 : Caractéristique courant-tension d'un module PV

Figure 1.29 : Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement

Figure 1.30 : Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement

Figure 1.31 : Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de température

Figure 1.32 : Caractéristique P (V) d'un module pour différentes valeurs de température

Figure 1.33: Schéma d'un module photovoltaïque

Figure 1.34 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

Chapitre 2

Figure 2.1 : Représentation latitude et longitude

Figure 2.2 : Représentation des angles Zénith, Azimut et altitude solaires

Figure 2.3 : Modèle d'un héliostat dans ses premières applications

Figure 2.4 : Champ d'héliostat -centrale solaire Thémis France

Figure 2.5 : Types de suiveurs solaires

Figure 2.6 : Suiveur solaire passif

Figure 2.7 : Suiveur mono-axial vertical et horizontal

Figure 2.8 : Orientation du suiveur double-axe

Figure 2.9 : Suiveur basé sur des capteurs de lumière

Figure 2.10 : Méthode de poursuite astronomique

Chapitre 3

Figure 3.1 : Schémas synoptique du suiveur solaire

Figure 3.2 : Carte ARDUINO UNO

Figure 3.3 : Résistance 10kh

Figure 3.4 : Capteur LDR et son circuit équivalent

Figure 3.5 : circuit LM2596 DC-DC

Figure 3.6 : Panneau solaire

Figure 3.7 : Servomoteur

Figure 3.8 : Interface du logiciel Arduino

Figure 3.9 : Organigramme principal

Figure 3.10 : Montage du système simulé sous Proteus

Figure 3.11 : Brochage des LDR à l'Arduino.

Figure 3.12 : Montage Circuit électrique des servomoteurs (Fritzig).

Figure 3.13 : Les étapes à suivre pour tester les servomoteurs

Figure 3.14 : Le programme pour tester les servomoteurs

Figure 3.15 : circuit électrique de suiveur

Figure 3.16 : Structure de suiveur

Figure 3.17 : Positionnement des servomoteurs

Figure 3.18 : Photo de notre prototype (suiveur solaire)

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Radiation solaire en Algérie

Tableau 3.1 : Caractéristique de la carte ARDUINO UNO

Tableau 3.2 : Caractéristique de capteur LDR

Tableau 3.3 : Spécifications de l'alimentation du LM2596 DC-DC

Tableau 3.4: Caractéristique de servomoteur



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Partout dans le monde, la consommation globale énergétique augmente d'une façon vertigineuse, cela affecte négativement l'environnement qui nous entoure. En effet, les sources d'énergie fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) sont utilisées de manière continuellement abusive. Ces dernières, en plus d'être extrêmement polluantes quand elles subissent un processus de combustion, possèdent des réserves limitées dans le temps. Ainsi, la communauté scientifique reconnaît aujourd'hui la responsabilité de cette surconsommation sur le réchauffement climatique qui risque d'avoir des dramatiques effets sur les équilibres physique, politique et socio-économique de notre planète, et la recherche dans le domaine des ressources d'énergie alternatives est devenue donc une question cruciale [1].

Les énergies renouvelables sont des énergies qui se restaurent assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine du temps [2].

L'énergie solaire est disponible, non polluante et gratuite, c'est pourquoi, elle est de plus en plus utilisée, comme alternatives aux combustibles, dans la production d'électricité. L'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus élevés au monde, avec une durée d'ensoleillement sur la totalité du territoire national pouvant atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et le Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays [3].

L'Algérie réserve de multitude d'investissement dans la technologie photovoltaïque et ses applications à titre d'exemple le projet de HASSI R'MEL. Ce dernier consiste à mettre à profit des concentrateurs solaires cylindro-paraboliques munis des systèmes de poursuite solaire [3].

INTRODUCTION GENERALE

Les traqueurs solaires ou suiveur solaire sont conçus et construits pour optimiser le rendement de puissance des modules de PV en s'assurant qu'ils sont inclinés vers le soleil à tout moment pendant la journée. Les multi systèmes de suiveurs solaires ont été utilisées pour une large application incluant : des cellules solaires photovoltaïques, des concentrateurs solaires et des télescopes [4].

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

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

- Le premier chapitre, dans lequel on va aborder les généralités sur l'énergie solaire photovoltaïques, le rayonnement solaire ; ainsi que le principe de fonctionnement d'un système photovoltaïques.
- Le second chapitre présentera les techniques de poursuite solaire adoptées dans l'étude ainsi que les différents systèmes de suiveur solaire.
- Le troisième chapitre, porte sur la conception d'un système de suiveur (l'étude des outils constituant notre système). En suit la réalisation matérielle et logiciel, avec la mise en marche de notre système réalisé.
- Enfin, on finalise notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

1.1 Introduction :

Il existe actuellement des énergies renouvelables, rentables et facile à exploiter [gaz, pétrole et charbon], elles sont aussi polluantes à cause du gaz émis à l'effet de serre (dioxyde de carbone, notamment) qui font partie du réchauffement planétaire. Ce dernier est considéré comme un facteur de risque qui menace de plus en plus la terre et les être vivants.

Par contre, il existe aussi des énergies non polluantes, renouvelables, négligées qui auraient été bénéfique à l'homme comme l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. De ces énergies, l'énergie solaire est la plus convenant à l'exploitation car elle est disponible au cours de l'année et a un bon rendement grâce à la technologie actuelle.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique, cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir c'est pourquoi on a décidé de l'étudier en détail, mais comment exploiter au mieux cette énergie ? Et quels sont les enjeux liés à son utilisation !

1.2 Historique de la cellule photovoltaïque

Considéré dans l'Antique comme un dieu, le soleil est aujourd'hui réduit au statut d'énergie, une énergie qu'il nous faut apprendre à capter, à transformer, à stocker..

La conversion de la lumière en électricité, appelé effet photovoltaïque, a été découverte en 1839 par un physicien français, Alexander Edmond « becquerel » (en irradiant une électrode en argent dans un électrolyte, il obtient une tension électrique [5]).

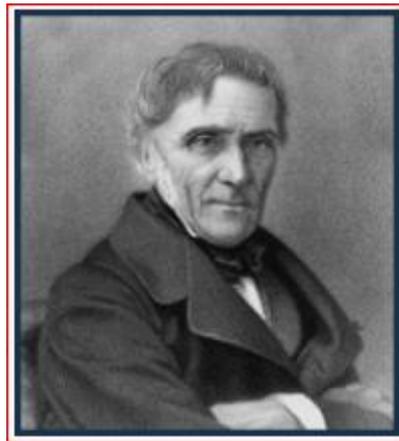


Figure 1.1. A-B BECQUEREL.

En 1975, le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans le semi-conducteur et la première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Fritts. Mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation.

Chapitre 1 L'ENERGIE SOLAIRE

Seulement, le phénomène est encore considéré comme anecdotique jusqu'à la Second Guerre Mondiale. Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium.

Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone. On entrevoit alors la possibilité de fournir de l'électricité grâce à ces cellules. Au même moment, l'industrie spatiale naissante, cherche de nouvelles solutions (autre que le procédé nucléaire) pour alimenter ses satellites [5].



Figure 1.2. Photo de trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince [5].

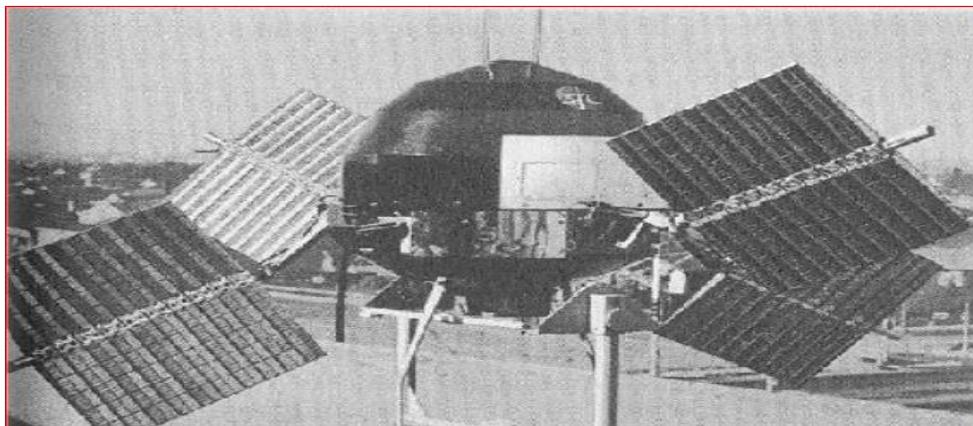


Figure 1.3. Premier satellite américain [5].

Chapitre 1 L'ENERGIE SOLAIRE

C'est en 1958, que les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace et au même moment une cellule avec un rendement de 9% est mise au point [5].

Mais il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industries investissent dans la technologie photovoltaïque. En effet des efforts ont été faits pour réduire les couts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. Et en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïque est construite à l'Université de Delaware [5].

Ainsi que au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la lumière en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. La croissance de l'industrie fut spectaculaire, et notamment à travers de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tel que : montres, calculatrice, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. En 1983 la première voiture, alimentée par énergie photovoltaïque, parcourt une distance de 4000 Km en Australie [5].



Figure 1.4. Des produits fonctionnant grâce à l'énergie solaire [5].

Chapitre 1 L'ENERGIE SOLAIRE

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau. Ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisé depuis 2001. Bien que le prix se soit peu stabilisé, la quantité de modules. Photovoltaïques expédiés chaque année cesse d'augmenter [5].



Figure 1.5. Toits photovoltaïques [5]

1.3 Energie solaire photovoltaïque

1.3.1 Technologie photovoltaïque

Le photovoltaïque (PV) tire son nom du processus de conversion de la lumière (photons), appelé effet photovoltaïque. Ce phénomène a été exploité pour la première fois en 1954 par des scientifiques de laboratoire Bell qui ont créé une cellule fonctionnelle en silicium qui génère un courant électrique lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil [6].

La technologie photovoltaïque est un moyen d'exploiter l'énergie solaire pour produire de l'électricité et de réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. Les technologies photovoltaïques (PV) présentent des avantages environnementaux distincts pour la production d'électricité par rapport aux technologies conventionnelles [7]

1.3.2 Principe de fonctionnement

Le photovoltaïque convertit directement l'énergie solaire en électricité. Ils fonctionnent sur le principe de l'effet photovoltaïque. Lorsque certains matériaux sont exposés à la lumière, ils absorbent les photons et libèrent des électrons libres. L'effet photovoltaïque est une méthode de production d'électricité à courant continu basé sur le principe de l'effet photovoltaïque.

Sur la base du principe de l'effet photovoltaïque, des cellules solaires ou des cellules photovoltaïques sont fabriqués ; ils convertissent la lumière du soleil en électricité à courant continu (CC). Mais une seule cellule ne produit pas suffisamment d'électricité. Par conséquent, un certain nombre de cellules photovoltaïques sont montées sur un cadre de support et sont électriquement connectées les unes aux autres pour former un module photovoltaïque ou un panneau solaire [8].

1.4 Le potentiel d'énergie en Algérie

1.4.1 Energie solaire

L'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire, de par sa situation géographique il dispose d'un gisement solaire très important le plus élevé au monde. Compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrée sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara [9].

Chapitre 1 L'ENERGIE SOLAIRE

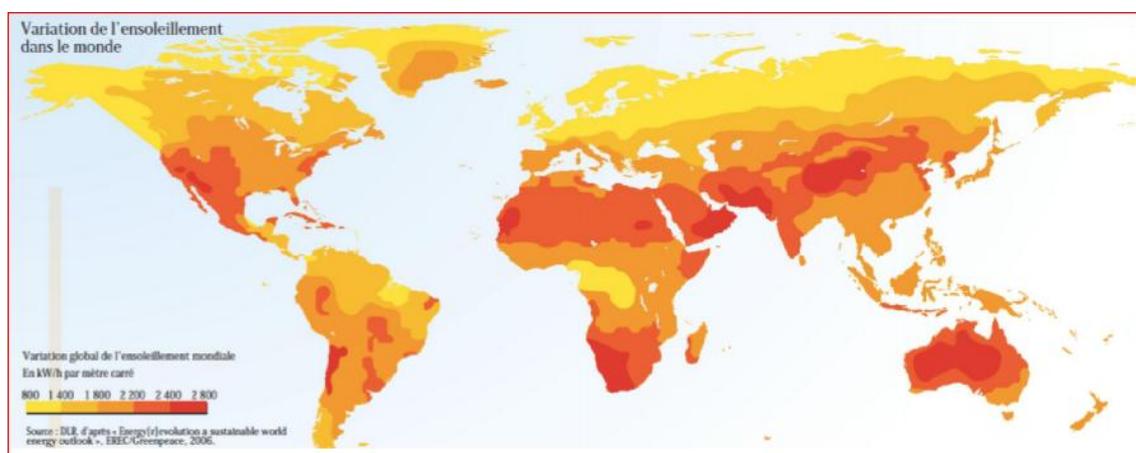


Figure 1.6. Ressources solaire au monde [10]

- L'Algérie est parmi les pays les mieux dotés en ressource solaires au monde

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1800 kWh/m²/an au Nord et 3000 kWh/m²/an au Sud du pays [11]

| Radiation solaire | Nord | Hauts-plateaux | Sahara |
|----------------------------------|------|----------------|--------|
| moyenne (kWh/m ² /an) | 1800 | 2200 | 3000 |

Tableau 1.1. Radiation solaire en Algérie [11].

- Moyenne nationale de radiation solaire : 2300 kWh/m²/an

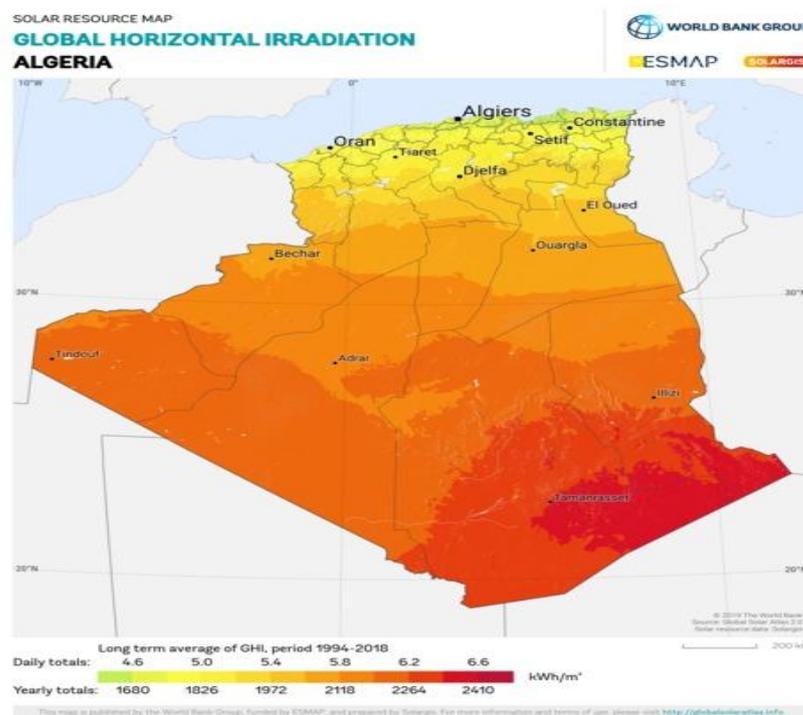


Figure 1.7. La carte de l'irradiation solaire en Algérie [12]

1.5 Le rayonnement solaire

1.5.1 Définition

Le rayonnement solaire est une énergie radiante émise par le soleil à partir d'une réaction de fusion nucléaire qui crée de l'énergie électromagnétique. Le spectre du rayonnement solaire proche de celui d'un corps noir avec température d'environ 5800k. Environ la moitié du rayonnement se trouve dans la partie visible des ondes courte du spectre électromagnétique. L'autre moitié est principalement dans la partie proche infrarouge, avec une partie dans la partie ultraviolette du spectre. Les unités de mesure sont les watts par mètre carré [13].

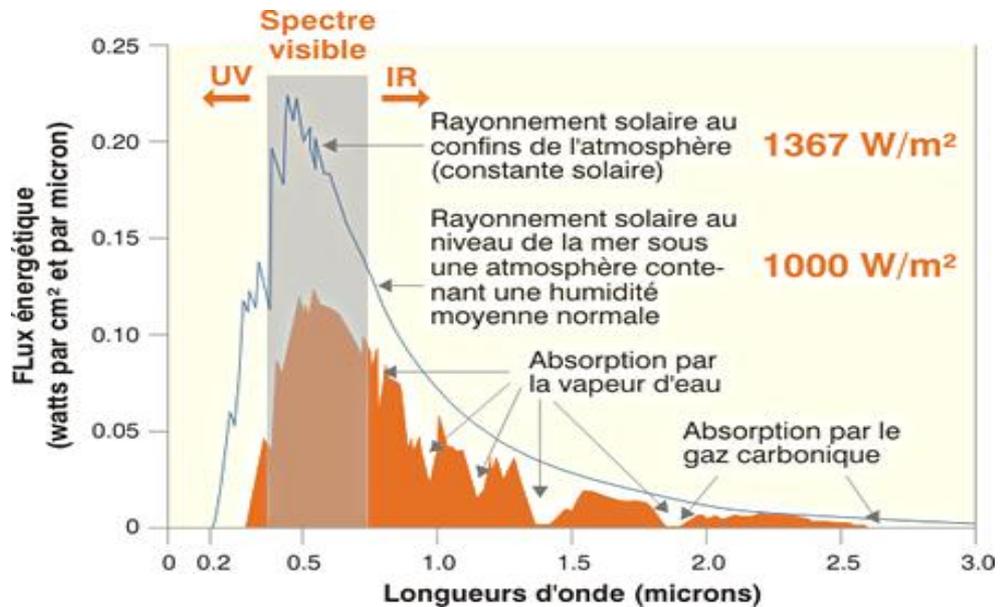


Figure 1.8. Répartition du spectre solaire au-dessus de l'atmosphère terrestre [14]

1.5.2 Types de rayonnement

a Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est défini comme un rayonnement qui n'a pas subi de diffusion dans l'atmosphère, de sorte qu'il est fixé de manière directionnelle, provenant du disque de soleil [15]

b Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement solaire atteignant la surface de la terre après avoir été diffusé à partir du faisceau solaire direct par des molécules ou des suspensoides [16].

c Le rayonnement global

Le rayonnement global est le rayonnement total à ondes courtes du ciel tombant sur une surface horizontale au sol. Il comprend à la fois le rayonnement solaire direct et le rayonnement diffus résultant de la lumière réfléchie ou diffusée [17].

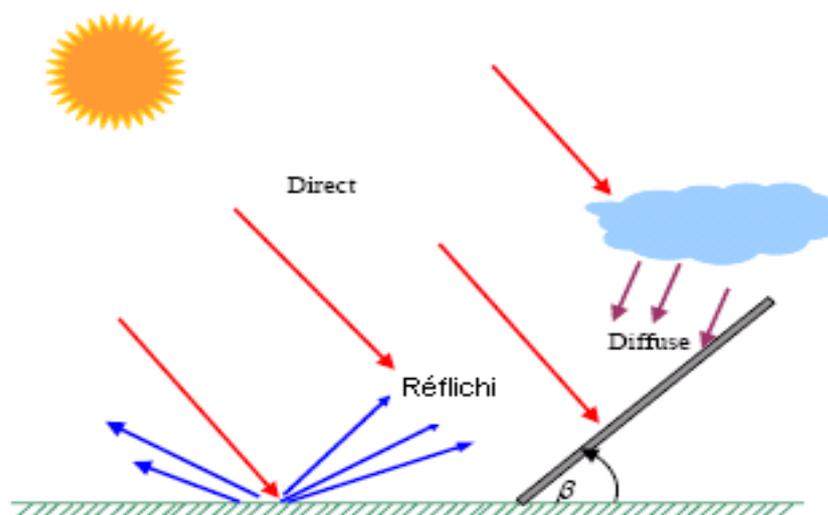


Figure 1.9. Composants du rayonnement solaire [18]

1.5.3 Le rayonnement en Algérie

L'Algérie possédant un gisement solaire important, de par son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1Kw/m². L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de Juillet) dépasse les 6Kw/m² et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500Kw/m² [19]. La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques de l'Algérie.

Chapitre 1 L'ENERGIE SOLAIRE

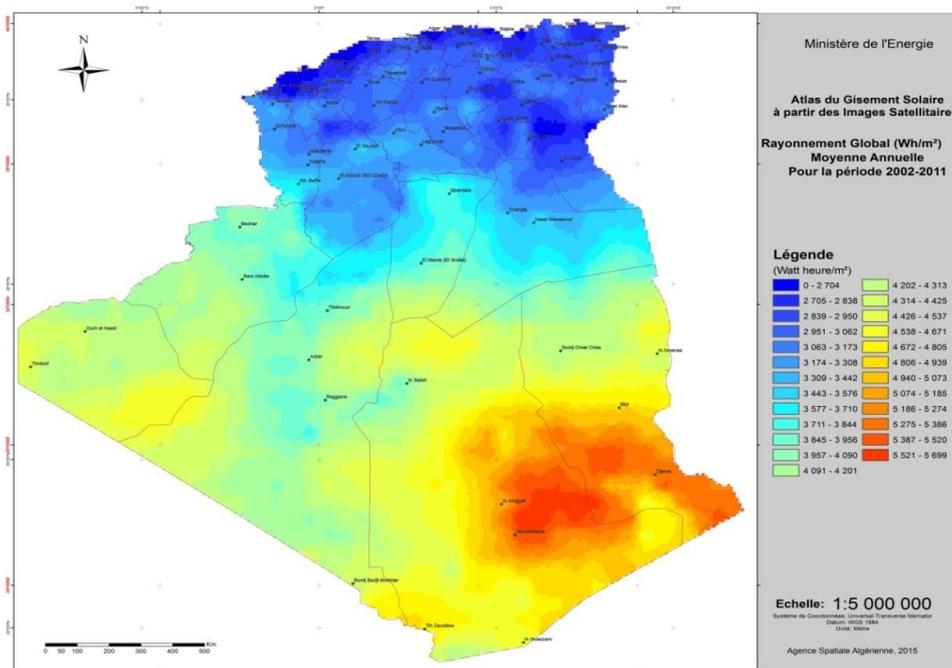


Figure 1.10. Les différentes zones énergétiques dans l'Algérie [20]

1.6 La cellule photovoltaïque

1.6.1 Définition

Une cellule photovoltaïque (PV) également connue sous le nom de cellule solaire, est un composant électronique qui génère de l'électricité lorsqu'il est exposé à des photons ou à des particules de lumière. Cette conversion s'appelle l'effet photovoltaïque, plusieurs cellules reliées entre elles pour former un module PV, par la suite plusieurs modules sont regroupés pour former une installation photovoltaïque [21]



Figure 1.11. Centrale photovoltaïque [22]

1.6.2 Principe de fonctionnement

Une cellule PV au silicium typique est composée d'une mince plaquette constituée d'une couche ultra-mince de silicium dopé au phosphore (type N) sur une couche plus épaisse de silicium dopé au bore (type P). Un champ électrique est créé près de la surface supérieure de la cellule où ces deux matériaux sont en contact, appelé la jonction PN. Lorsque la lumière du soleil frappe la surface d'une cellule photovoltaïque, ce champ électrique fournit une impulsion et une direction aux électrons stimulés par la lumière, ce qui entraîne un flux de courant lorsque la cellule solaire est connectée à une charge électrique [23].

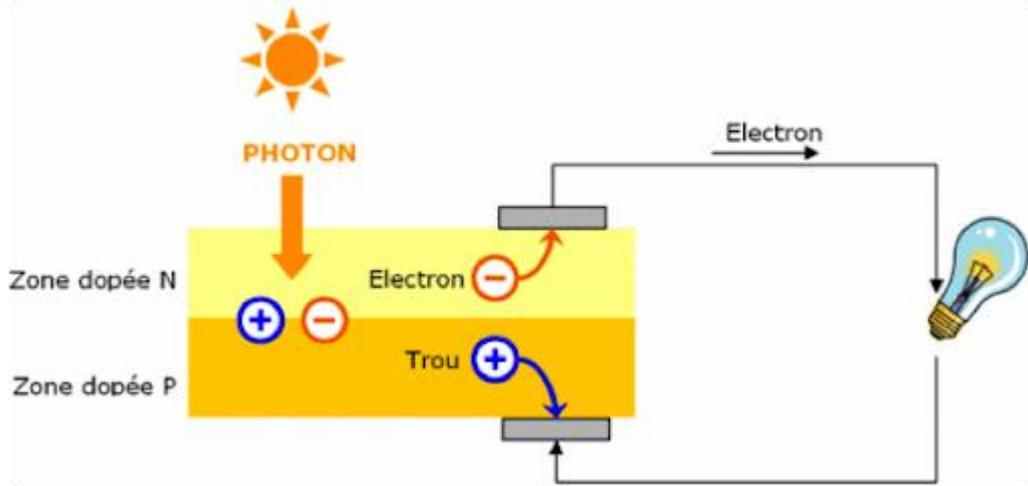


Figure 1.12. Principe une cellule solaire [24]

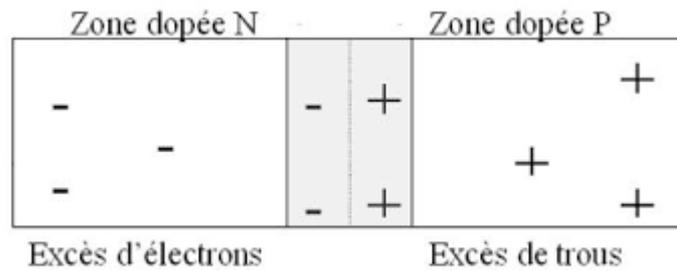


Figure 1.13. Dopage de silicium [25]

1.7 Les différents types de panneaux photovoltaïques

Les panneaux les plus courants sont généralement constitués :

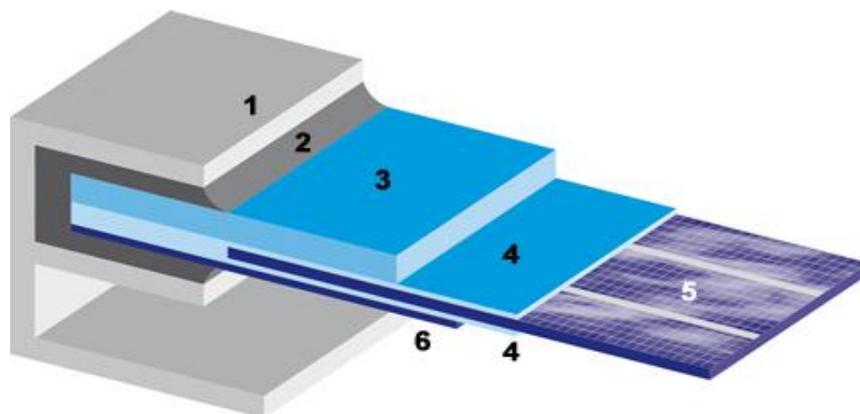


Figure 1.14. Structure d'un panneau photovoltaïque [26]

- D'un cadre de support et un joint d'étanchéité (1 et 2).
- D'une plaque de verre extra claire (favorisant la transmission lumineuse) (3).
- De deux couches d'Ethylène-Acétate de Vynile (EVA) qui enrobent les cellules assurant leur protection contre les intempéries et l'humidité (4).
- Des différents strings de cellules (5).
- D'une feuille de tedlar (ou éventuellement du verre) comme face arrière du module. Ce polymère à haute résistance aux UV et la haute température assure au module sa résistance mécanique face aux chocs (vent, transport, ...) (6).

1.7.1 Les panneaux photovoltaïques monocristallins

Dans les cellules sont issues d'un cristal de silicium. La structure du cristal est parfaite homogène ce qui lui donne sa couleur caractéristique qui est généralement noire.

Les panneaux monocristallins dits « MONO » d'une manière générale dispose d'un rendement de conversion le plus élevé [18 à 24%]. Sur un panneau MONO la production démarre légèrement plus tôt dans la journée et s'arrête légèrement plus tard dans la nuit. C'est en fait dû aux caractéristiques du cristal de silicium [27].

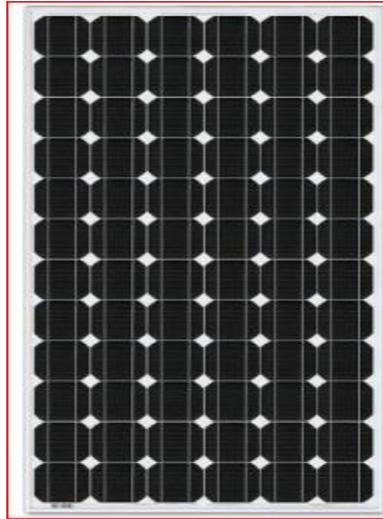


Figure 1.15. Panneau monocristallin [27].

1.7.2 Les panneaux photovoltaïques poly cristallins

Dans les cellules son composées de plusieurs cristaux, contrairement aux cellules monocristallins les cellules poly cristallins présentent pas une couleur totalement homogène qu'elle rapprochera plutôt au bleu.

Les panneaux poly cristallins dite « POLY » offrent un rendement surfacique légèrement moins élevé. Le rendement de conversion est plus faible [14 à 18%]. La production d'énergie démarrera plus tard dans la journée [27].



Figure 1.16. Panneau poly cristallin [27]

1.7.3 Les panneaux solaires amorphes

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres dites « solaires ». Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de 1 m²). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10% au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps [28].



Figure 1.17. Panneau amorphe [29]

1.8 Regroupement des cellules photovoltaïques

1.8.1 Cellules mise en série

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

Chapitre 1 L'ENERGIE SOLAIRE

Les figures (1.18 ; 1.19) montrent les caractéristiques résultantes (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice P) N_p cellules identiques [30]:

$$I_{PCC} = N_P \times I_{cc} \quad \text{Et} \quad V_{PCO} = V_{CO} \quad (1.1)$$

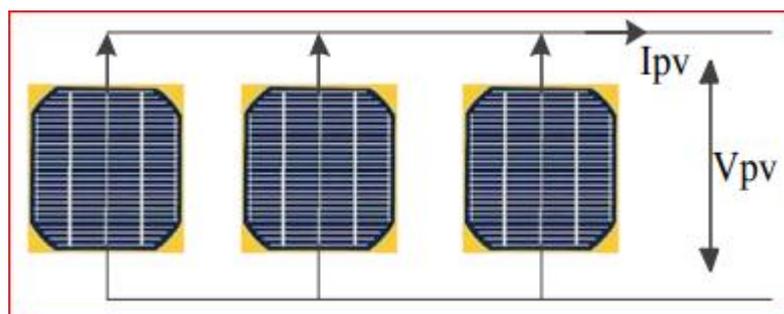
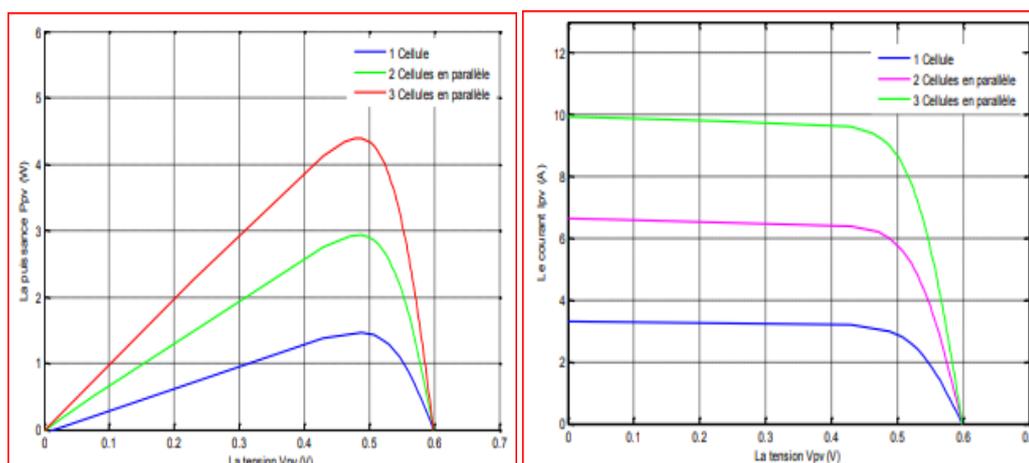


Figure 1.18. schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle [30]



A) Caractéristique P-V des cellules PV

B) Caractéristique I-V des cellules PV

Figure 1.19. Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle [30]

1.8.2 Cellules Mise en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

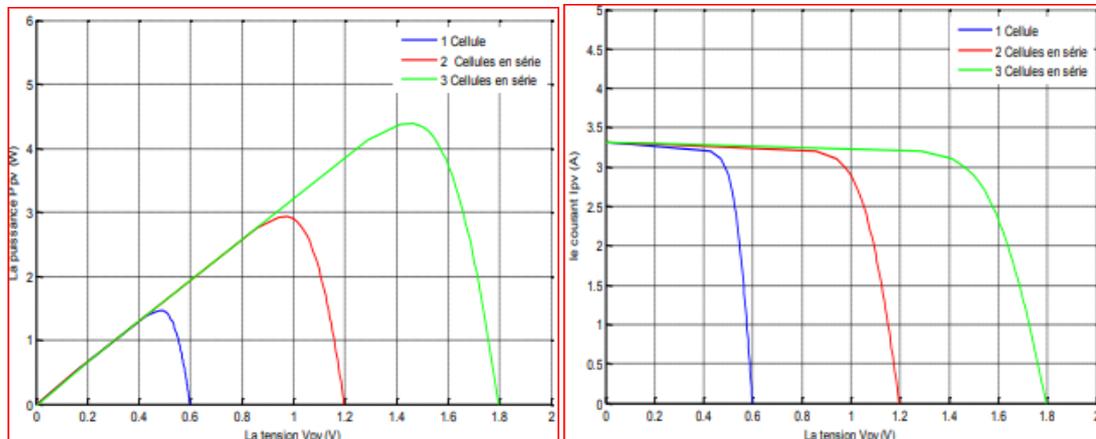
Chapitre 1 L'ENERGIE SOLAIRE

Les figures (1.20; 1.21) Montrent les caractéristiques résultantes (I_{pv} , V_{pv}) obtenues en associant en parallèle (indice p) N_p cellules identiques [30].

$$I_{SCC} = I_{CC} \quad \text{Et} \quad V_{SCO} = N_S \times V_{CO} \quad (1.2)$$



Figure 1.20. Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série [30]



A) Caractéristique P-V des cellules

B) Caractéristique I-V des cellules

Figure 1.21. Caractéristique résultantes d'un groupement de N_s cellules en série [30]

1.8.3 Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

Le groupement mixte ou hybride figure (1.22) est un assemblage de N branches de cellules photovoltaïques en parallèles, ou chaque branche est l'association de M cellules en séries. Les valeurs du circuit ouvert V_{PV} et le courant de court circuit I_{PV} délivré par ce panneau PV sont en fonction des caractéristiques des cellules élémentaires (V_{CO}, I_{CC}) [31]

$$I_{PV} = NI_{CC} \quad (1.3)$$

La puissance fournie par le module est :

$$P_{PV} = MN_{CO}I_{CC} \quad (1.4)$$

Avec V_{CO}, I_{CC} : tension de circuit ouvert et courant de court-circuit de la cellule élémentaires.

M, N : nombre de cellule en série et nombres de branche en parallèles.

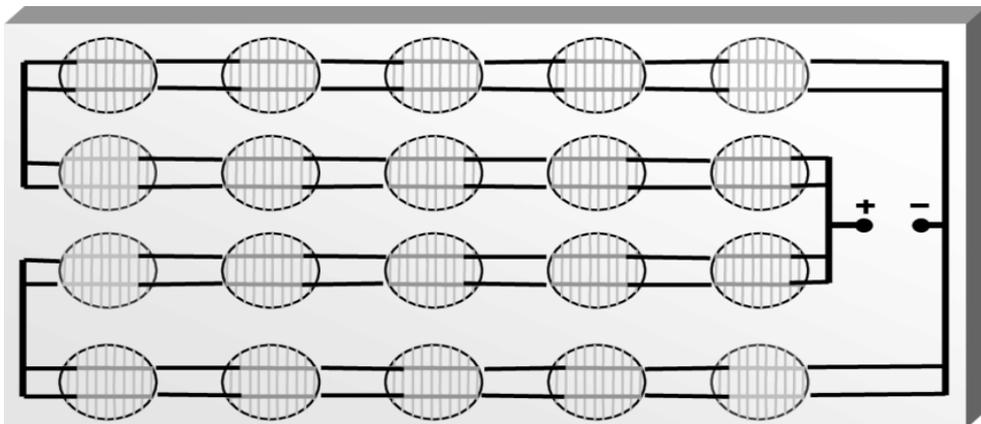


Figure 1.22. Groupement des cellules en série-parallèle [32]

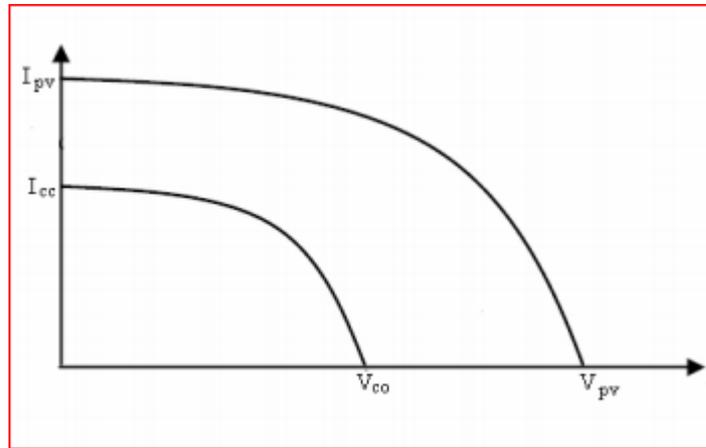


Figure 1.23. Caractéristique résultantes d'un groupement de N_s - N_p cellules en série-
parallèle [31]

1.9 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV est en fait un composant électrique bien connu l'on appelle « DIODE », composant qui laisse passer le courant électrique dans un sens (avec une chute de tension de l'ordre de 0.6 volt) et qui bloque son passage dans l'autre sens. Dans le cas de la cellule PV, on s'arroe pour que la surface de la jonction soit la grand possible pour collecter le maximum d'énergie solaire [33].

Le schéma électrique simplifié de la cellule PV et le suivant :

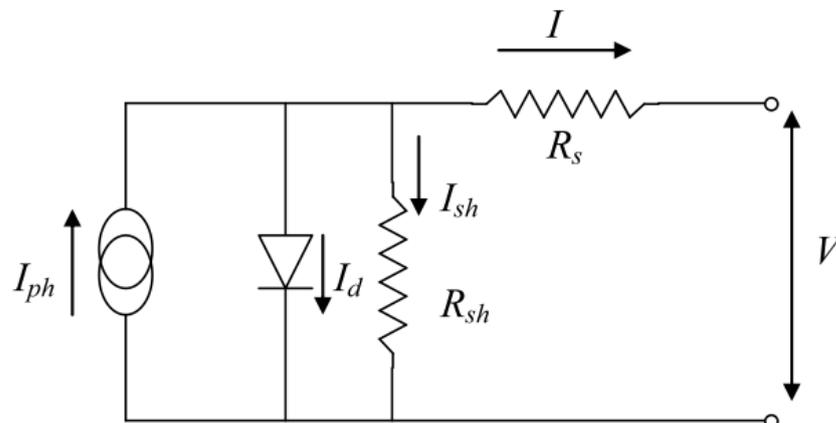


Figure 1.24. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV [34]

Chapitre 1 L'ENERGIE SOLAIRE

On reconnaît le symbole de la diode traversé par le courant I_d , en parallèle se trouve le générateur de courant I_{CC} qui correspond au flux d'électrons généré par le flux de photons de la lumière au sien de la jonction de la diode. En parallèle à la diode, se trouve la résistance R_{sh} (résistance shunt) qui correspond aux pertes directs à travers la jonction et en série vers l'utilisation V_{PV} et I_{PV} , se trouve la résistance R_s (résistance série) correspondant entre autre aux pertes joules dans les conducteur [33].

Aux deux bornes de la photopile PV, l'énergie électrique se récupère sous forme d'une tension V_{PV} et d'un courant I_{PV} .

L'équation entre V_{PV} et I_{PV} est suivante :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(V_{PV} + (I_{PV} \cdot R_s))}{nKT} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{PV} + (I_{PV} \cdot R_s)}{R_s} \right) \quad (1.5)$$

I_{sat} : Est le courant de saturation,

K : La constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K),

T : la température effective des cellules en Kelvin (K),

e : la charge de l'électron ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C),

n : Le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n$),

I_{PV} : Le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,

V_{PV} : La tension aux bornes de cette même cellule,

I_{ph} : Le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit),

R_{sh} : La résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,

R_s : La résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexion. I_d : Le courant qui traverse la diode.

Chapitre 1 L'ENERGIE SOLAIRE

- Les courbes caractéristiques de la cellule solaire IV montrent les caractéristiques de courant et de tension d'une cellule, d'un module ou d'un réseau photovoltaïque particulier, donnant une description détaillée de sa capacité et de son efficacité de conversion d'énergie solaire. Connaître les caractéristiques électriques IV d'une cellule solaire ou d'un panneau est essentiel pour déterminer les performances de sortie et l'efficacité solaire de l'appareil [33].

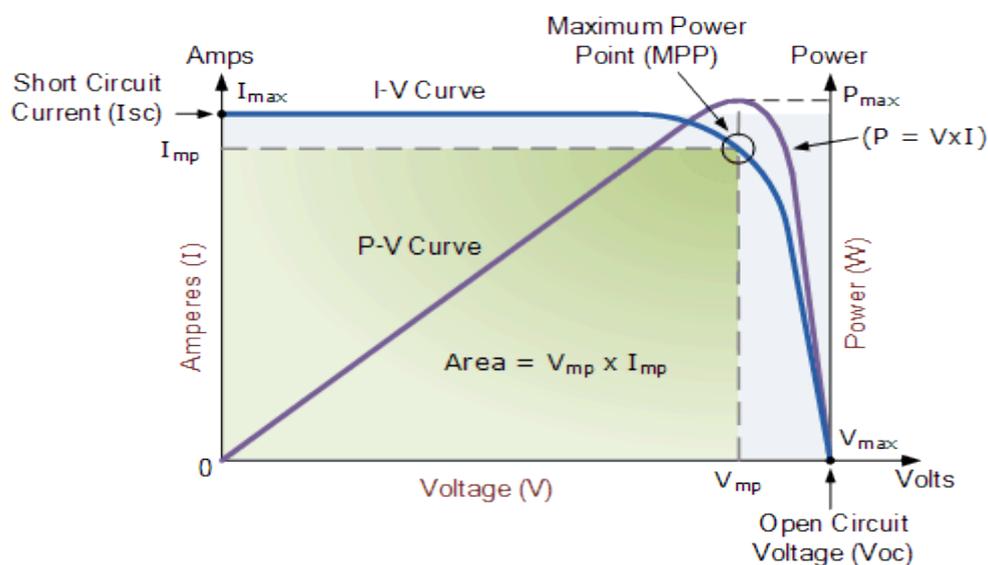


Figure 1.25. Caractéristique de la cellule PV [35]

1.9.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes de courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert. Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données. En effet, le fonctionnement des cellules PV dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule.

A partir de la caractéristique sous éclairement de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule [36].

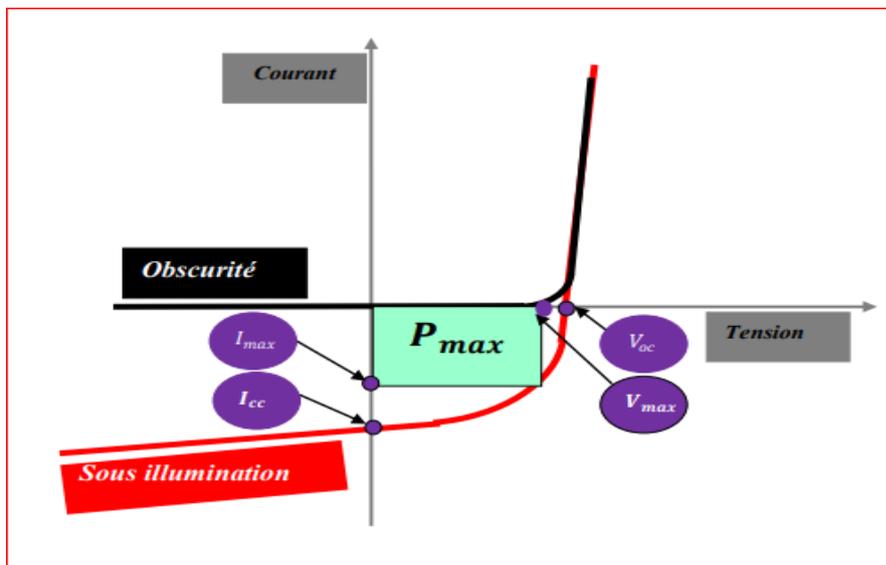


Figure 1.26. Caractéristiques $I(V)$ et définition des paramètres PV [37].

1.9.2 Courant de court -circuit (I_{cc})

Le courant de court-circuit est le courant traversant la cellule solaire lorsque la tension aux bornes de la cellule solaire est nulle, c'est-à-dire lorsque la cellule solaire est court-circuitée [38]

Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie) le courant I_{cc} se confond avec le photo-courant I_{ph} . Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.5), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{V_{PV} + I_{cc} \cdot R_s}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{cc} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

Pour la plupart des cellules (dans la résistance série est faible), on peut négliger

le terme $I_{sat} \left(\frac{e^{(I_{PV} \cdot R_s)}{nKT}} - 1 \right)$ devant I_{ph} (1.7)

1.9.3 Tension de circuit –ouvert (V_{CO})

La tension de circuit ouvert est la tension maximale disponible à partir d'une cellule solaire, et cela se produit à un courant nul. La tension en circuit ouvert correspond à la quantité de polarisation directe sur la cellule solaire due à la polarisation de la jonction de cette dernière avec le courant généré par la lumière [39].

Elle est obtenue à partir l'équation suivante :

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sa}} + 1 \right] \quad (1.8)$$

$$V_T = \frac{nKT}{e} \quad (1.9)$$

Si la résistance série est nulle et celle parallèle est infinie l'expression de la tension de court circuit ouvert sera :

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right] \quad (1.10)$$

1.9.4 Puissance maximale P_m

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit $V \cdot I$ est maximum. Si V_m et I_m sont la tension et le courant pour les quelles on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de coté V_m et I_m qu'on peut inscrire sous la courbe $I(V)$ [40] (figure 1.28)

$$P_m = I_m \times V_m \quad (1.11)$$

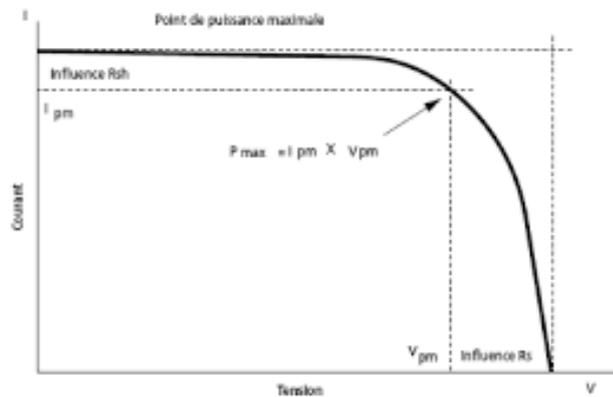


Figure 1.27. Les courbes $I=f(V)$ [40]

1.9.5 Facteur de forme FF

Le facteur de forme est égal au rapport de la puissance maximale au produit $I_{cc} \times V_{co}$, ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins carrée de la caractéristique I-V de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale a 1, la puissance P_m sera égal à $I_{cc} \times V_{co}$. Généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85 [41]

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} = \frac{P_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (1.12)$$

1.9.6 Rendement énergétique

Le rendement d'une cellule ou module photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique produite par cette cellule ou module (puissance débitée au point de puissance maximale MPPT) et l'énergie lumineuse reçue sur la surface correspondante [42].

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (1.13)$$

$$\eta = FF \times V_{co} \times \frac{I_{cc}}{E \times S} \quad (1.14)$$

S : la surface de la cellule

E : l'éclairement, le rendement énergétique s'écrit,

FF : Facteur de forme.

P_m : puissance maximale fournie par la cellule.

1.10 Module photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge, les modules ont généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leurs environnements et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module PV. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière,..) peuvent endommager les cellules de façon permanente [43].

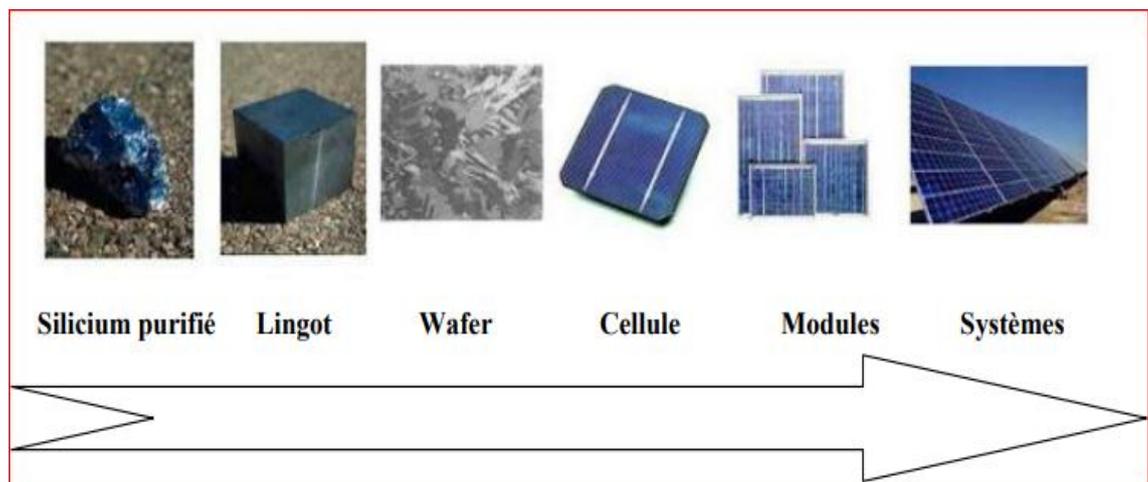


Figure 1.28. Evolution de conversion des systèmes de production PV [43].

1.11 Caractéristique courant-tension d'un module

Le profile de la caractéristique courant-tension d'un module est le même que celui d'une cellule PV [44].

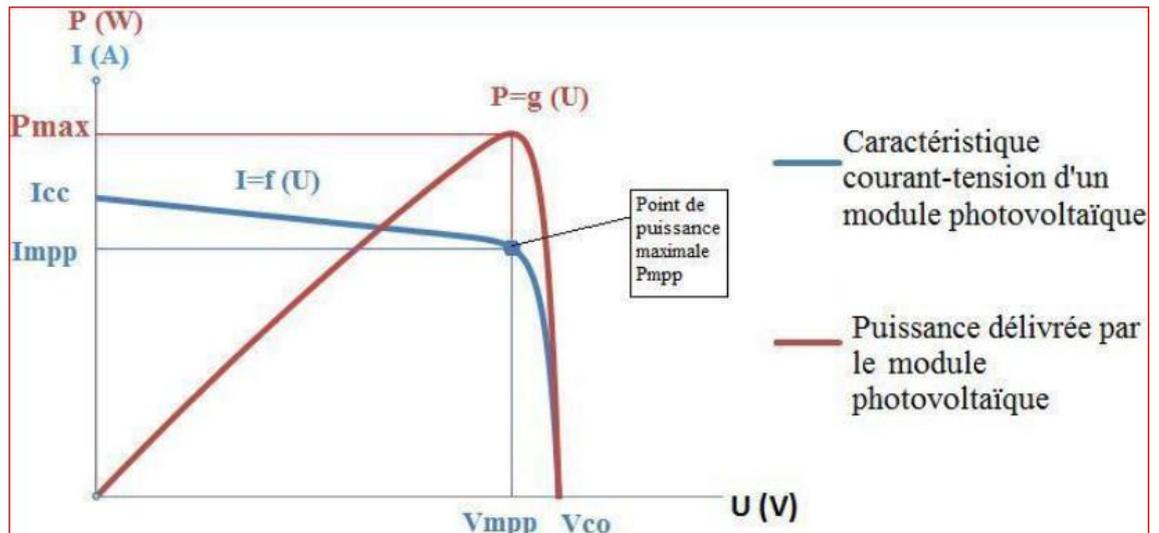


Figure 1.29. Caractéristique courant-tension d'un module PV [44]

CC (Court-Circuit) = SC (short circuit)

CO (Circuit Ouvert) = OC (open circuit)

mpp = maximum power point (point de puissance maximale)

1.12 Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$:

Influence de l'éclairement et de la température :

L'éclairement et la température modifient la caractéristique I-V de la cellule solaire, pas dans sa forme générale mais pour les valeurs I_{cc} , V_{co} , I_m et V_m :

1.12.1 Influence de l'éclairement sur un PV

Les caractéristiques des figures (1.30) et (1.31) montrent bien la variation du courant et de la puissance d'un module PV en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur le graphe, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. Le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. De même, la tension de circuit ouvert V_{co} varie très peu [45].

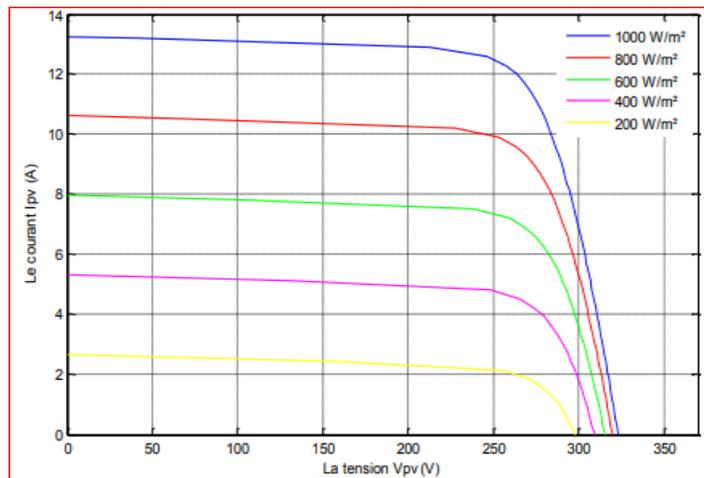


Figure 1.30. Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes valeur de l'éclairement [46]

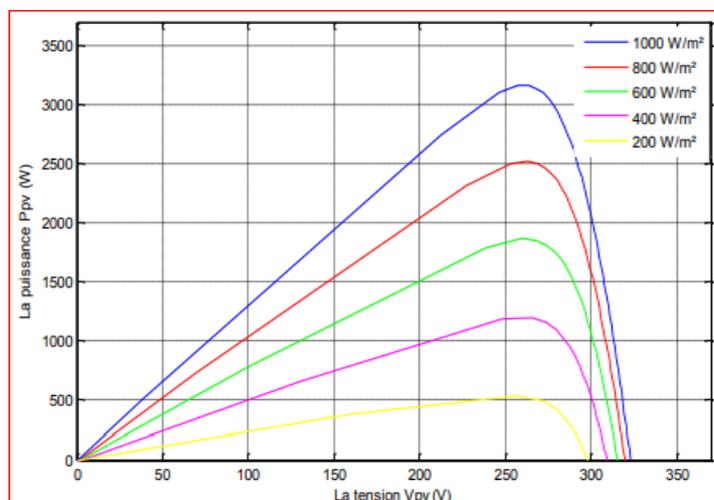


Figure 1.31. Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeur de l'éclairement [46]

1.12.2 Influence de la température sur un PV

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La figure (1.32) montre l'influence de la température, on observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court-circuit I_{cc} , en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert V_{co} .

L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension (V_m) et un léger accroissement du courant (I_m) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale (P_m) [47] figure (1.33)

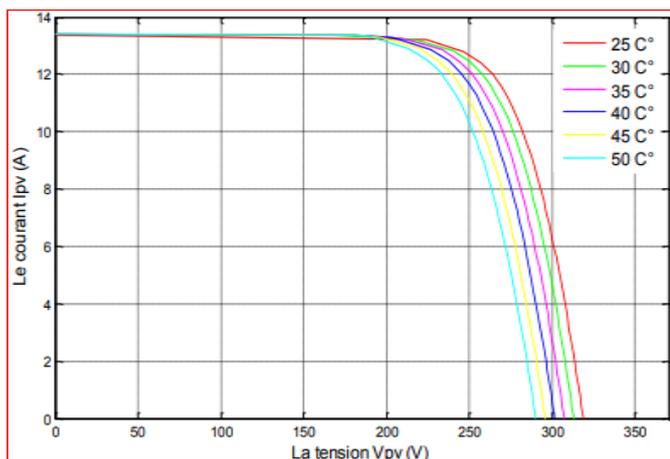


Figure 1.32. Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes valeur de température [46]

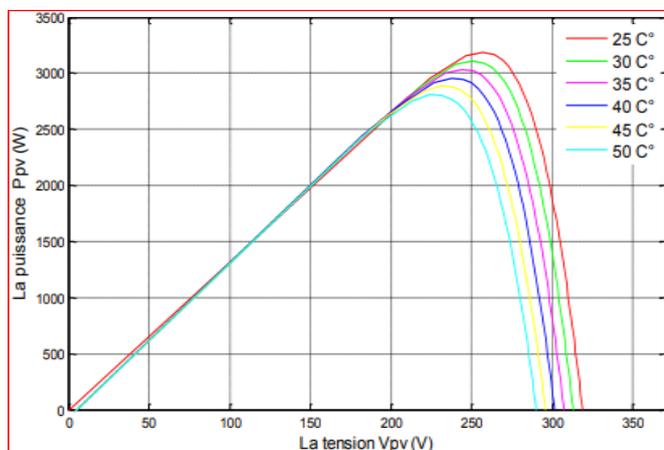


Figure 1.33. Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeur de température [46]

1.13 Protection des modules photovoltaïques

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation PV destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et en panneaux parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles, figure (1.34).

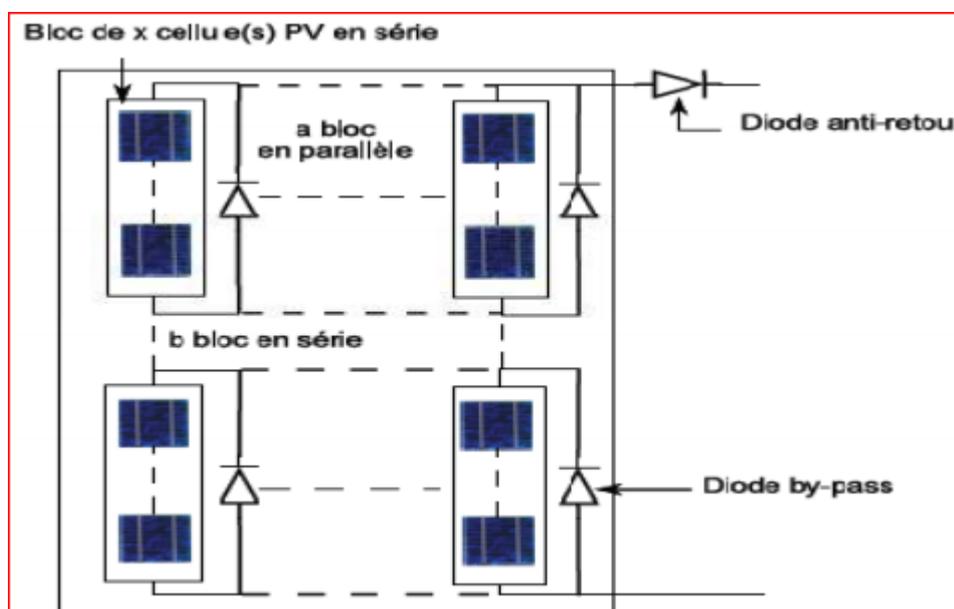


Figure 1.34. Protections d'un module PV [48]

La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les générateur PV. Ce phénomène peut apparaitre lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairage n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré dans la figure (1.35), par la

Chapitre 1 L'ENERGIE SOLAIRE

perte d'une partie de la protection d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance [48].

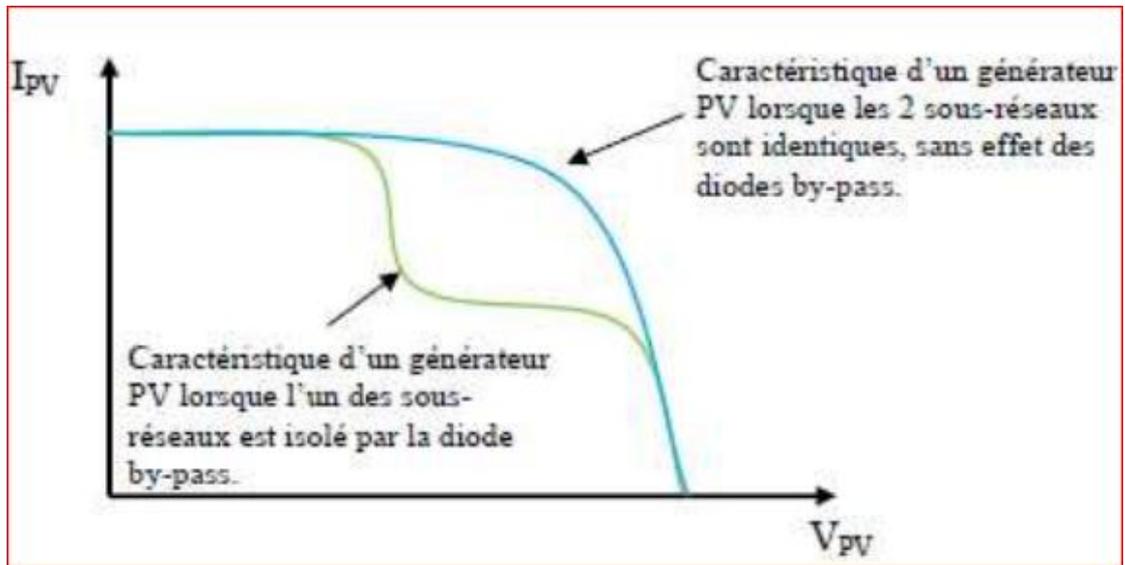


Figure 1.35. Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV [48]

1.14 Conclusion :

Dans ce chapitre on a abordé une description sur l'énergie solaire photovoltaïque qui est considéré comme une source la plus répandue et connue parmi les sources d'énergies renouvelables, et pour mieux comprendre le principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque on a expliqué les éléments de ce système (cellule, panneaux, module...)

Aujourd'hui le photovoltaïque connaît un grand développement dans le domaine des énergies renouvelable.

Dans le chapitre qui suit on va aborder les méthodes de poursuite qui peuvent être programmé et implémentes pour tester l'efficacité de notre système solaire.

2.1 Introduction

On sait que la puissance et le sens des rayonnements solaires varie en permanence en raison de la rotation terrestre et de la composition de l'atmosphère.

D'où les cellules des modules PV à montage fixe ne peuvent transformer qu'une fraction de l'énergie lumineuse émise par le soleil en énergie électrique.

C'est pourquoi les systèmes qui nous intéressent le plus sont des systèmes de suiveur solaire « ou trackers solaires » à dispositifs mobiles qui permettent de maintenir l'orientation des modules photovoltaïques vers le soleil. Ces systèmes assurent une production électrique maximale.

2.2 Trajectoire solaire

L'énergie solaire exposée sur une surface hors atmosphère est régie uniquement par des lois astronomiques et géométriques. Ces lois faisant intervenir la latitude du lieu, la déclinaison solaire, l'heure du jour et l'orientation de la surface réceptrice. La position du soleil dépend du temps solaire est des jours de l'année, elle est exprimée par différents angles [49].

2.2.1 L'angle d'Altitude ou l'élévation solaire $\alpha(^{\circ})$

Est défini comme étant l'angle entre le rayon central du soleil et le plan horizontal (figure 2.1)

Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\alpha = \text{Arcsin}(\sin\varphi * \sin\delta + \cos\varphi * \cos\delta * \cos\omega) \quad (2.1)$$

Avec :

ω : Latitude de lieu.

δ : Déclinaison solaire.

ω : Angle horaire.

Ou :

- La latitude est représentée par une valeur angulaire. Elle représente l'angle d'inclinaison, par au plan de l'équateur, de la demi-droite allant du centre de la terre et passant par le lieu géographique considéré. Cet angle, s'étendant 0° à l'équateur à 90° aux pôles.
- La longitude est une valeur angulaire aussi, expression du positionnement est-ouest d'un point sur terre, dont la référence est le méridien de Greenwich (avec une étendue de -180° (180° Ouest) à $+180^{\circ}$ (180° Est) [49].

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

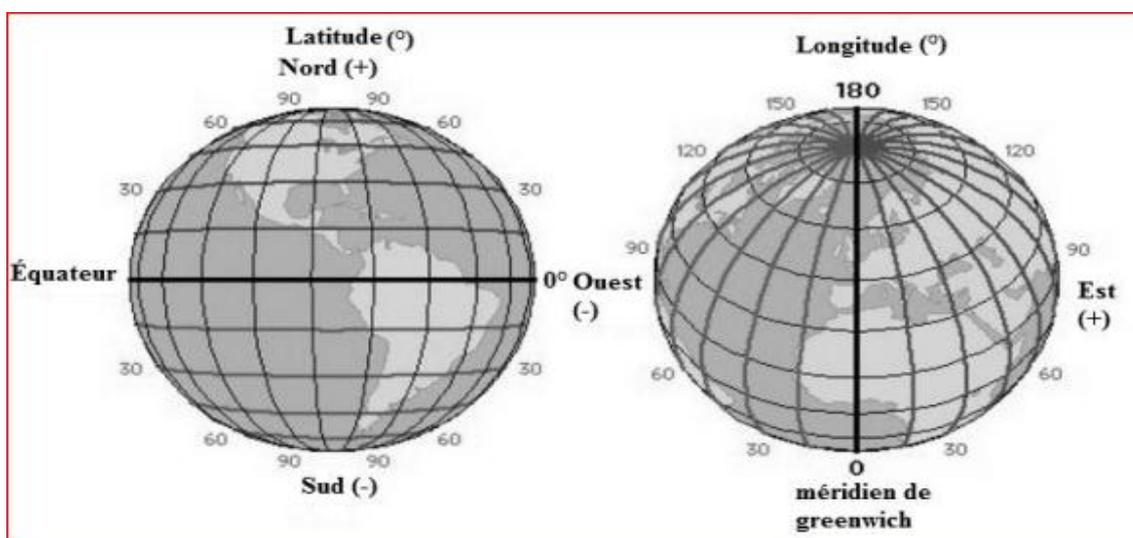


Figure 2.1. Représentation de latitude et longitude [49]

2.2.2 La déclinaison solaire $\delta(^{\circ})$

Est l'angle entre la direction du centre du disque solaire mesurée à partir du centre de la terre et le plan équatorial. La déclinaison est une fonction du temps qui varie continuellement [50].

2.2.3 Angle d'Azimut A_Z en ($^{\circ}$)

On désigne par AZIMUT l'angle A_z entre le nord local de la station et le vecteur u ou encore entre le plan méridien de la station et le plan P défini précédemment.

Cette angle est mesuré positivement entre 0° et 360° dans le sens horaire autour de la verticale locale [51], l'angle azimut solaire est donné par la relation :

$$A_Z = \text{Arcsin}(\sin\omega * \cos\delta \div \cos\alpha) \quad (2.2)$$

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

L'héliostat est également utilisé dans les centrales solaires ou plusieurs héliostats, appelés un champ d'héliostats. Ce dernier repère le mouvement du soleil en convergeant les rayons lumineux vers un même point, concentrant ainsi la lumière incidente en employant des miroirs de réflexion, tout au long de la journée. Ce principe se rencontre dans diverses installations utilisant l'énergie solaire, notamment les centrales solaires à concentration appelés champs d'héliostats. Un exemple en France est la centrale solaire Thémis qui, après avoir fonctionné de 1983 à 1986, fait l'objet d'une nouvelle expérimentation depuis 2007 [53].



Figure 1.4. Champ d'héliostat – centrale solaire Thémis en France

2.3.2 Définition

Les suiveurs solaires s'orientent vers le soleil pour exploiter davantage la lumière du soleil. Les trackers solaires sont positionnés et fixés aux panneaux solaires. Selon le type de trackers obtenus et installés, la plage d'installation variera.

L'idée est de pouvoir incliner les panneaux solaires dans le sens où le soleil se déplace tout au long de la journée et, par conséquent, tout au long de l'année au fur et à mesure que les saisons et le temps changent. La fonctionnalité est simple : plus les panneaux PV orientés directement vers le soleil, plus la puissance peut être générée [54]. En effet, un suiveur solaire peut augmenter le rendement d'un panneau PV jusqu'à 40% de plus qu'un panneau fixe.

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

2.3.3 Principe de fonctionnement des suiveurs solaires

Le suiveur solaire permet de pivoter le panneau solaire selon un ou deux axes 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 différents 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'avance des périodes [55].

Le suiveur solaire se place en dessous du panneau ce qui va permettre de déplacer suivant les deux axes.

2.3.4 Les type de suiveur solaire

On distingue principalement deux grandes familles de suiveurs solaires : les passifs, et les actifs qui comportent les suiveurs mono-axe et double axes (figure 2.5)

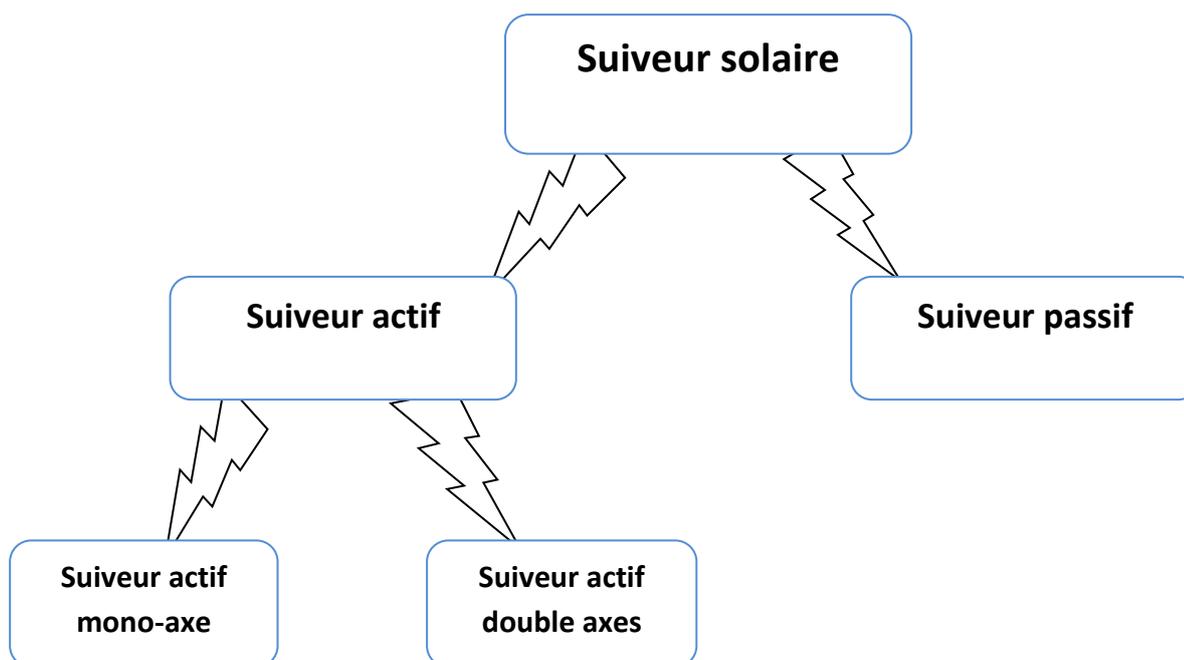


Figure 2.5. Types de suiveurs solaires

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

a Suiveur passif

Les suiveurs passifs suivront également le soleil, mais ils le feront sans nécessiter aucune source d'énergie externe, la chaleur du soleil est utilisée pour provoquer l'expansion d'une masse fixe de matière, par exemple un gaz d'ébullition. L'expansion provoque un mouvement mécanique d'un actionneur. Une paire ou plus d'actionneurs sont positionnés de sorte qu'ils se dilatent de manière différentielle en fonction de l'orientation du dispositif de suivi de charge utile par rapport au soleil. Expansion différentielle amène le tracker à se rapprocher de la direction du soleil. Il est maintenu manuellement dans une position presque verticale avec une fixation automatique la nuit, de sorte qu'à l'aube, lorsqu'il reçoit suffisamment d'énergie différentielle, il se met en position et continue à suivre [56].

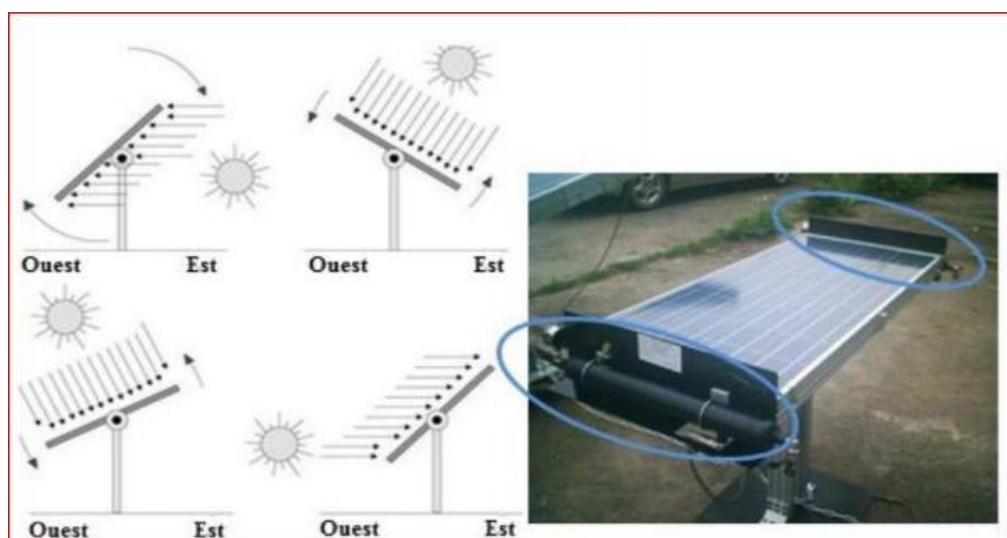


Figure 2.6. Suiveur solaire passif [56]

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

b **Suiveur actif**

Un suiveur actif utilise 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 de cette famille : les suiveurs mono-axe et double axes.

L'avantage de suiveur actif par rapport au suiveur passif c'est qu'il représente une meilleure précision de suivi et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les ajuster [57].

- **Suiveur solaire mono-axe**

Un suiveur solaire à un seul axe utilise un support de panneau PV incliné et un moteur électrique pour déplacer le panneau sur une trajectoire approximative par rapport à la position du soleil. L'axe de rotation peut être horizontal ou verticale pour une amélioration de la production de 27% à 32% par rapport à un panneau fixe [58].

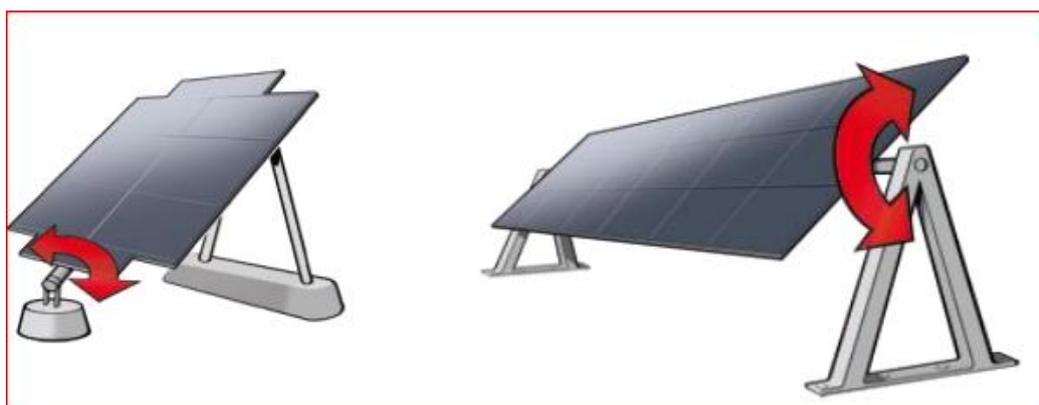


Figure 2.7. Suiveur mono-axial verticale et horizontal

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

- **Suiveur solaire double axes**

Pour suivre le soleil dans deux directions que sont élévation et l'azimut, un prototype de suivi à deux axes est développé pour capturer le maximum de rayons solaires en suivant le mouvement du soleil dans quatre directions différentes, ce qui donne un rendement supérieur que les suiveurs mono-axial avec un pourcentage de croisement de 30% à 40% par rapport à la production du module fixe [59].

Ce type de suiveur nécessite la mise en place de deux moteurs.



Figure 2.8. Orientation du suiveur solaire double axes

2.4 Méthodes de poursuite solaire

La technologie des systèmes de poursuites actuels est différente d'un concepteur à un autre. Il existe deux grandes méthodes pour assurer le suivi.

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

2.4.1 La méthode des capteurs de lumière

Cette méthode est basée sur des capteurs de lumière ou photorésistance pour déterminer la position du soleil à tout moment, permettant ainsi un suivi instantané et notamment une orientation optimale du panneau figure 2.9. Dans ce type de techniques, la poursuite s'effectue indépendamment de la zone dans laquelle le système sera situé [60].

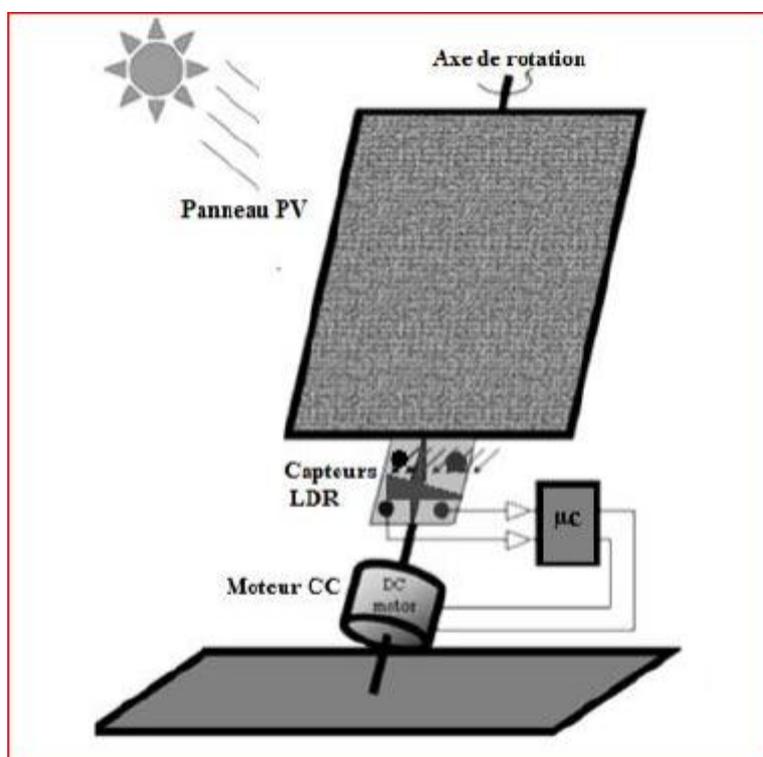


Figure 2.9. Suiveur basé sur des capteurs de lumière [60]

2.4.2 La méthode astronomique

Cette méthode repose sur le calcul de la position du soleil en se basant sur les équations géométrique et astronomiques prédéfinies. Le système nécessite comme entrées lors de l'installation, la latitude et longitude du site, la date du jour et l'heure [60].

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

2.5 La différence entre l'installation avec suiveur et l'installation fixe

- Augmentation de la productivité énergétique des panneaux :

Les suiveurs solaires peuvent absorber un maximum de lumière solaire tout au long de la journée, ils produisent de 30 à 40% de plus que des installations de même tailles et de même puissances installées sur des toits dans des conditions optimale.

- La meilleure rentabilité :

Le bon rendement du coté financier est lié forcément à la bonne productivité énergétique c'est pour cela, une installation équipée d'un système de poursuite solaire peut augmenter le taux de son rendement de 30 à 40% par rapport à une installation fixe qui augmente à son tour les bénéfices financiers.

La figure (2.10) représente le rendement d'une installation fixe et installation avec suiveur « bi-axial et mono-axial » [61]

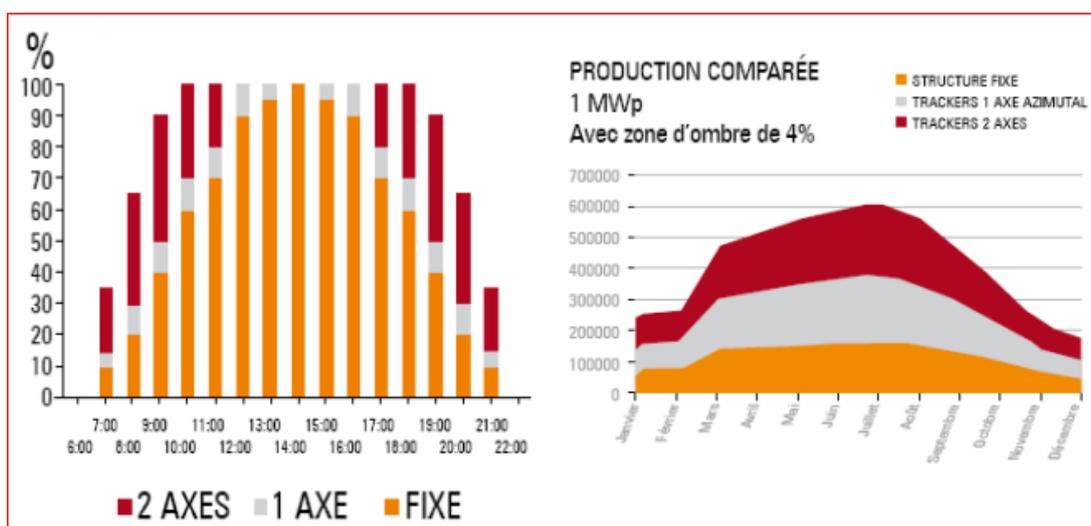


Figure 2.10. Comparaison de production électrique

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

2.6 Les moyennes de contrôle de l'augmentation d'énergie par traqueur

Le gain d'un Traqueur est différent à chaque installation, Il existe plusieurs moyenne pour contrôler le niveau de la production d'électricité pour un Traqueur solaire, on distingue plusieurs facteur [62] :

- La latitude du site d'installation.
- L'ensoleillement et la climatologie du site.
- La course angulaire de suivi solaire.
- La fréquence de positionnement.
- La densité de puissance installée et le facteur d'ombre induit.
- Les gains (non comptabilisés) de repli par temps de neige qui peuvent être très importants

II.7 Les avantages et les inconvénients de suiveur

Les suiveurs solaires gagnent en popularité, mais tout le monde ne comprend pas les avantages et les inconvénients potentiels du système. Les solutions de suivi de panneaux solaire constituent une technologie plus avancée pour le montage de panneaux photovoltaïques. Les montures fixes, qui maintiennent les panneaux dans une position fixe, peuvent compromettre leur productivité lorsque le soleil passe à un angle plus optimal. En contrepartie, les suiveurs solaires se déplacent automatiquement pour « suivre » la progression du soleil dans le ciel, maximisant ainsi la production.

Il s'agit d'un système fantastique pour la production de l'énergie, mais il convient de garder à l'esprit quelques considérations avant d'en adopter un, pour un chantier particulier [63].

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

II.7.1 Avantages :

Les traqueurs produisent plus d'électricité que leurs homologues fixe en raison de l'exposition directe accrue aux rayons solaire. Cette augmentation peut atteindre 10 à 25% en fonction de la localisation géographique de système de suivi.

Il existe de nombreux types de suiveurs solaires, tels que les suivis à un axe et à deux axes, qui peuvent tous convenir parfaitement à un chantier unique. La taille de l'installation, les conditions météorologiques locales, le degré de latitude et les exigences électriques sont tous des facteurs importants pouvant influencer sur le type de suivi solaire le mieux adapté a une installation solaire spécifique.

Les suiveurs solaires génèrent plus d'électricité dans à peu près le même espace que celui requis pour les systèmes à inclinaison fixe, ce qui en fait l'outil idéal pour optimiser l'utilisation des sols.

Dans certains Etats, certains services publics proposent des plans de tarification en fonction de la durée d'utilisation de l'énergie solaire, ce qui signifie qu'ils achèteront à un taux plus élevé l'énergie générée pendant les heures de pointe de la journée. Dans ce cas, il est avantageux de générer une plus grande quantité d'électricité. L'utilisation de système de suivi permet de maximiser les gains d'énergie pendant ces périodes de pointe.

Les progrès de technologie et de la fiabilité des composants électroniques et mécanique ont considérablement réduit les problèmes de maintenance à long terme des systèmes de suivi [63].

Chapitre 2 LE SYSTEME SUIVEUR SOLAIRE

II.7.2 Inconvénients :

Les suiveurs solaires sont légèrement plus chers que leurs homologues fixes. En raison de la technologie plus complexe et des pièces mobiles nécessaires à leur fonctionnement. Cela représente généralement une augmentation de 0.08 à 0.10 USD / W, en fonction de l'emplacement du projet.

Même avec les progrès en matière de fiabilité, la maintenance nécessite généralement plus de maintenance qu'un rack fixe traditionnel, sachant que la qualité du suiveur solaire puisse jouer un rôle dans la quantité et la fréquence de cette maintenance.

Les trackers sont des systèmes plus complexes que les rackings fixe. Cela signifie généralement que l'avantage de préparation du site est nécessaire, y compris des tranchées supplémentaires de câblage et un nivellement supplémentaire.

Les projets de suivi à axe unique nécessitent également une attention supplémentaire sur la stabilité des entreprises. En ce qui concerne le financement de projet, ces systèmes sont plus complexes, ils sont donc considérés comme présentant d'un risque plus élevé du point de vue des financiers.

Les suiveurs solaires sont généralement conçus pour les climats avec peu ou pas de neige, ce qui en fait une solution plus viable dans les climats les plus chauds. Le rayonnement fixe s'adapte plus facilement aux conditions environnementales difficiles que les systèmes de suivi.

Les systèmes de suivi fixes offrent une plus grande adaptabilité sur le terrain que les systèmes de suivi à axe unique. Les systèmes fixe peuvent généralement accueillir jusqu'à 20% de pentes dans la direction est/ouest, tandis que les systèmes de suivi offrent généralement moins de pente, généralement autour de 10% dans la direction nord/sud [63]

II.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'un système suiveur solaire, ainsi que les différents types et les méthodes de poursuite qui permettent d'optimiser les performances d'un panneau solaire classique.

Globalement, les suiveurs solaires sont des installations très efficaces et conviennent parfaitement aux grands et aux petits projets, étant donnée l'emplacement et les conditions du site.

L'étape suivante consiste à donner une étude détaillée des composants constituant notre système de commande, ainsi que les étapes pour faire la réalisation pratique de système de poursuite.

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons réaliser un panneau solaire intelligent qui suit automatiquement le mouvement du soleil durant la journée. Ce système assure une augmentation optimale de rendement du panneau solaire.

Ce chapitre contient généralement deux parties, la première est consacrée pour la présentation et l'étude des différents outils utilisés dans la réalisation de notre système suiveur solaire, ainsi le logiciel utilisée « ARDUINO ».

Après avoir décrit la partie matérielle, nous allons passer à la deuxième partie qui est la réalisation de notre système de poursuite. Pour un fonctionnement réussi de notre système, cette réalisation comporte quatre parties principales :

- Partie programmation ;
- Partie simulation ;
- Partie électronique ;
- Partie mécanique ;

3.2 Description du système de poursuite :

Notre système de poursuite contrôle le mouvement des capteurs solaire on utilisant un programme informatique. Le module est orienté en deux axes pour suivre automatiquement le soleil sur une trajectoire bien définie grâce à des équations astronomiques traduite en programme sur un microcontrôleur Arduino. Notre système de commande est schématisé par la figure (3.1)

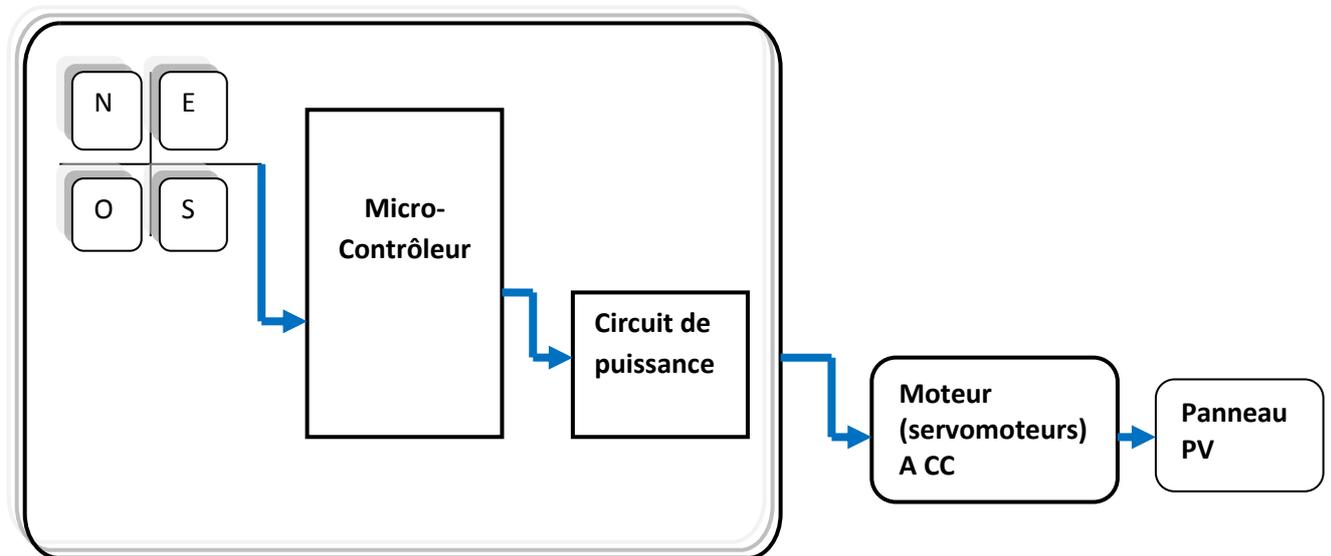
La réalisation d'un suiveur solaire avec circuit Arduino se base principalement sur un automate capable de suivre une source lumineuse en s'orientant de façon optimale en direction vers des rayons lumineux.

Les mouvements de rotations se produisant selon deux axes (vertical et horizontal), on utilise donc deux moteurs commandés par la carte Arduino (le microcontrôleur).

La méthode utilisée est comparable à celle de l'asservissement. Le panneau solaire est équipé de quatre capteurs photosensibles et il s'oriente en fonction de la luminosité reçue par chaque capteur. Le programme compare cette luminosité et ajuste la position lorsqu'il détecte une différence. Par exemple, si le capteur du haut capte plus de lumière que celui du bas, le programme va détecter cette différence et va orienter le panneau vers le haut pour compenser. Ca sera le même cas pour les capteurs gauche et droite.

La programmation de la carte Arduino est nécessaire pour que le montage fonctionne en utilisant l'accès USB du PC, le code a été téléversé sur la carte Arduino auparavant.

3.3 Schémas synoptique



Carte de commande de suiveur solaire

Figure III.1 : Schémas synoptique du suiveur solaire

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

3.4 Outils de développement

Les composants sont à base électronique, Chaque élément est caractérisé selon les conditions d'utilisation.

3.4.1 Présentation de la carte ARDUINO

La carte Arduino est très simple à utiliser, elle est programmable et se connecte directement à un ordinateur sous OS Windows, Mac ou Linux.

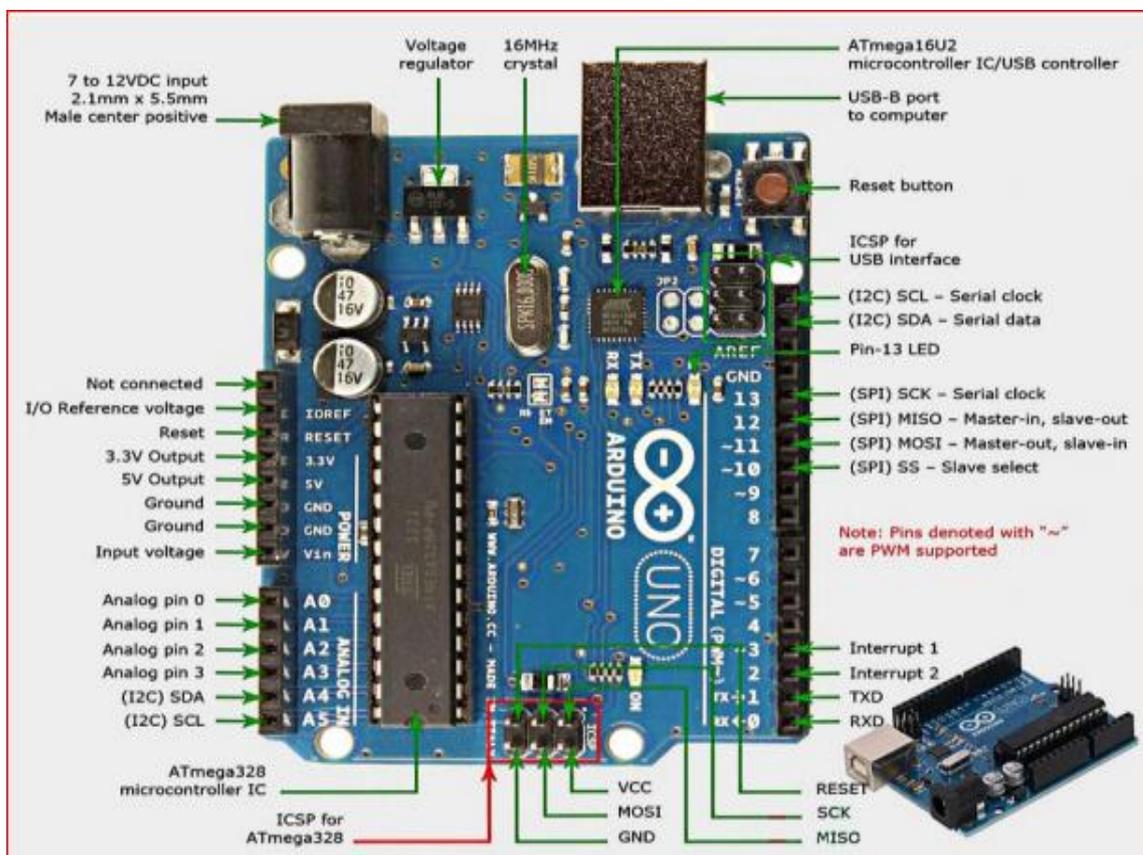


Figure 3.2. Carte ARDUINO UNO [64]

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

- ✓ Les caractéristiques de la carte ARDUINO UNO

| Catégorie | Valeur |
|-------------------------------------|--|
| Microcontrôleur | ATmega 328 |
| Fréquence d'horloge | 16 MHz |
| Tension de service | 5V |
| Tension d'entrée (recommandée) | 7 – 12V |
| Tension d'entrée (limites) | 6 – 20V |
| Ports numériques | 14 entrées et sorties (6 sorties commutables en MLI) |
| Ports analogiques | 6 entrées analogiques |
| Courant max. par broche d'E/S (C.C) | 40mA |
| Courant max. par broche 3.3 V | 50 mA |
| Mémoire | 32 Ko Flash, 2 Ko SRAM, 1 Ko EEPROM |
| Chargeur d'amorçage | 0.5 Ko (en mémoire Flash) |
| Interface | USB |
| Dimensions | 6.86 Cm × 5.3 Cm |
| Prix (approximatif) | 24 € |

Tableau 3.1. Caractéristiques de la carte ARDUINO UNO [65]

- ✓ **Le microcontrôleur :**

Un microcontrôleur ATMEGA 328T-PU est un petit processeur informatique relié à des entrées et des sorties numériques (0 ou 1) ou analogiques (tension variable). Il est capable de mémoriser et d'exécuter un programme visant à interpréter les entrées pour agir sur les sorties. Il se programme en général à l'aide d'un ordinateur mais peut fonctionner de manière autonome. Ils sont en général programmés en C/C++ et nécessitent des connaissances approfondies en électronique. Mais des différences peuvent apparaître pour des fonctions plus complexes.

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

✓ Alimentation électrique

Pour que la carte fonctionne elle a besoin d'une alimentation. Le microcontrôleur fonctionnant sous 5V, la carte peut être alimentée en 5V par le port USB ou bien par une alimentation externe qui est comprise entre 7V et 12V. Cette tension doit être continue et peut par exemple être fournie par une pile 9V. Un régulateur se charge ensuite de réduire la tension à 5V pour le bon fonctionnement de la carte. Pas de danger de tout griller. Il faut seulement respecter l'intervalle de 7V à 15V (même si le régulateur peut supporter plus, pas la peine de le retrancher dans ses limites) [66].

✓ Entrées/sorties

C'est par ces connexions que le microcontrôleur est relié au monde extérieur.

Une carte Arduino standard est dotée de :

- 6 entrées analogiques.
- 14 entrées/sorties numériques dont 6 peuvent assurer une sortie PWM

Les entrées analogiques permettent de mesurer une tension variable (entre 0 et 5 V) qui peut provenir des capteurs ou d'interfaces divers (potentiomètres, etc.). Les entrées/sorties numériques reçoivent ou envoient des signaux « 0 » ou « 1 » traduits par 0 ou 5 V.

On désigne le comportement de ces connecteurs (entrée ou sortie) en général dans l'initialisation du programme mais on peut le changer dans le corps du programme [67].

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

3.4.2 Résistance

La résistance est un composant de base, Sa principale fonction est de réduire l'intensité du courant.

Quatre résistances de 10 k Ω sont utilisées afin de protéger les entrées de la carte d'interface.

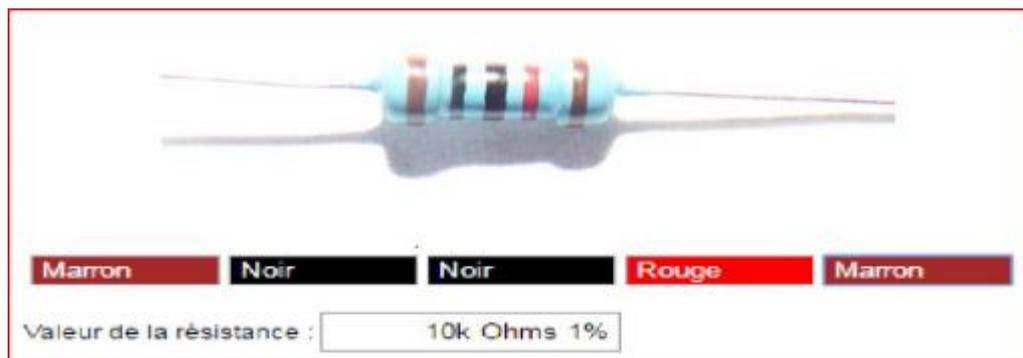


Figure 3.3. Résistance 10 KOhms

3.4.3 Capteurs LDR (résistance à la lumière)

Une photorésistance est un composant dont la valeur en ohms dépend de la lumière à laquelle il est exposé (Résistance dépend de la lumière). En effet, sa résistance varie en fonction du flux lumineux incident, elle est inversement proportionnelle à la lumière reçue. Le choix s'est porté sur cette dernière vu que son temps de réponse est beaucoup plus court par rapport à la photodiode.

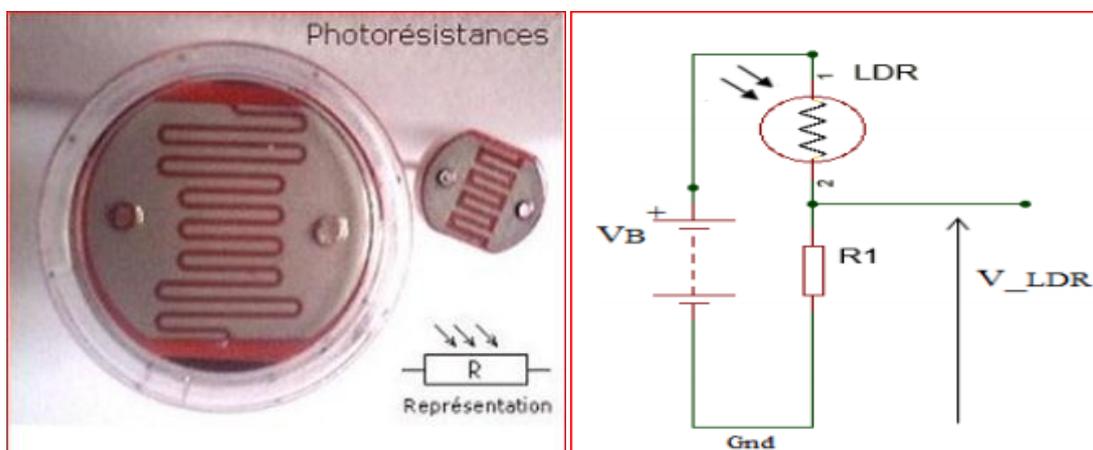


Figure 3.4. Capteur LDR et son circuit équivalent

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

✓ Caractéristiques

| Catégorie | Valeur |
|--|--------------------------|
| Modèle | GL5528 |
| Tension maximale | 150V, DC |
| Puissance maximale | 100mW |
| Température de fonctionnement | -30°C ~ +70°C |
| Pic spectral | 540nm |
| Résistance lumineuse (10Lux) (K Ω) | 10 - 20 |
| Résistance foncée | 1 M Ω |
| Temps de réponse | 20ms (Rise), 30ms (Down) |

Tableau 3.2. Caractéristiques de capteur LDR

3.4.4 Le circuit LM2596 DC-DC :

Est un régulateur de commutation abaisseur (Buck), capable de piloter une charge 3-A avec une excellente régulation de ligne et de charge. Ces appareils sont disponibles avec des tensions de sortie fixes de 3.3 V, 5V, 12V et une version de sortie réglable. La série LM2596 fonctionne à une fréquence de commutation de 150 KHz, permettant ainsi des composants de filtre de plus petite taille que ce qui serait nécessaire avec des régulateurs de commutation de fréquence inférieure [68].

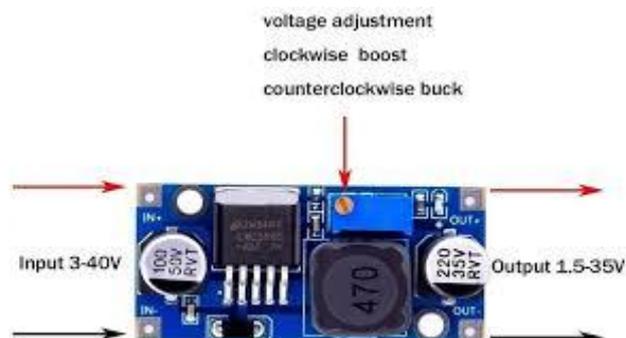


Figure 3.5. Circuit LM2596 [69]

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

✓ Caractéristiques

| Catégorie | Valeur |
|---------------------------------------|--|
| Efficacité de conversion | 92% (la plus élevé) |
| Fréquence de commutation | 150KHz |
| Ondulation de sortie | 30mA9maximum |
| Régulation de charge et de tension | $\pm 0.5\%$, $\pm 0.5\%$ |
| Vitesse de réponse dynamique | 5%200uS |
| Tension d'entrée | 4.75-35V |
| Tension de sortie | 1.25-26V (réglable) |
| Courant de sortie | Le courant nominal est 2A, maximum 3A |
| Redresseur | Rectification non synchrone |
| Propriétés du module | Module abaisseur non isolé (Buck) |
| Protection contre les courts-circuits | Limitation de courant, depuis la récupération |
| Température de fonctionnement | Qualité industrielle (-40 à +85) (puissance de sortie 10W) |

Tableau 3.3. Spécifications de l'alimentation du LM2596 DC-DC

3.4.5 Mini panneau solaire

Le panneau solaire est destiné à récupérer l'énergie du rayonnement solaire pour la transformer en énergie électrique.



Figure 3.6. Panneau solaire

- ✓ Caractéristique du panneau
 - Taux de conversion élevé, rendement élevé
 - Excellent effet de lumière faible
 - Puissance : 1.1W
 - Tension : 6V
 - Matériau : Silicium poly-cristallin
 - Faible cout

3.4.6 Mini servomoteur

Un servomoteur est un système qui a pour but de produire un mouvement précis en réponse à une commande externe, C'est un actionneur (système produisant une action) qui mélange l'électronique, la mécanique et l'automatique [70]. Un servomoteur est composé :

- D'un moteur à courant continu
- D'un axe de rotation
- Un capteur de position de l'angle d'orientation de l'axe (très souvent un potentiomètre)
- Une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu, Un servomoteur est capable d'attendre des positions prédéterminées dans les instructions qui lui ont été données, puis de les maintenir. Le servomoteur a l'avantage d'être asservi en position angulaire, cela signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera la consigne d'instruction que nous lui avons envoyée à l'entrée [71].

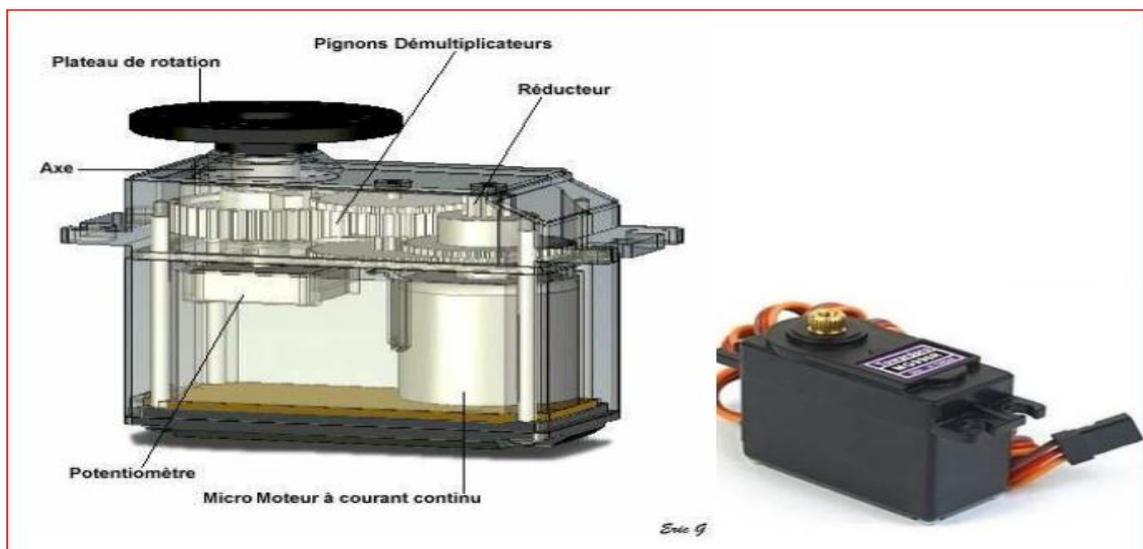


Figure 3.7. Servomoteur

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

✓ Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement interne d'un servomoteur est assez basique. Un petit circuit électronique permet de contrôler un moteur à courant continu en fonction de la position d'un potentiomètre intégré au servomoteur.

La sortie du moteur à courant continu est reliée mécaniquement à une série d'engrenages qui augmente la force (le couple) du servomoteur en réduisant la vitesse de rotation de celui-ci. Quand le moteur tourne, les engrenages s'animent, le bras bouge et entraîne avec lui le potentiomètre. Le circuit électronique ajuste continuellement la vitesse du moteur pour que le potentiomètre (et par extension le bras) reste toujours au même endroit [72].

✓ Les caractéristiques du Servomoteur sont les suivantes :

| Nombre de broches | 3 broches | |
|------------------------|------------------------|----------|
| | Marron | Masse |
| | Rouge | Vcc |
| | Orange | Commande |
| Dimensions | 22*11.5*27 mm | |
| Poids | 9 g | |
| Tension d'alimentation | 4.8v à 6v | |
| Vitesse | 0.12 s /60 ° sous 4.8v | |
| Couple | 1.2 Kg/ cm sous 4.8v | |
| Amplitude | 0 à 180° | |

Tableau 3.4. Caractéristiques de servomoteur

3.5 Réalisation du dispositif

3.5.1 Cahier des charges

L'asservissement de notre suiveur solaire sera alimenté par la carte ARDUINIO (5v) cette dernière sera alimenté par PC (sortie USB) qu'il est sensé maintenir en charge

« Dans le cas réel on remplace l'alimentation via le PC par une batterie, cette dernière peut être rechargé par le panneau solaire »

Il faudra limiter au maximum les déplacements (lors d'un passage du nuage devant le soleil) en augmentant le délai d'exécution d'interaction au niveau de la programmation.

3.5.2 Partie programmation

a) Programmation

La carte Arduino UNO est une carte programmable, elle peut être programmée avec le logiciel Arduino. Il suffit de sélectionner "Arduino UNO" dans le menu Outils > type de carte.

Afin d'injecter du code dans le microcontrôleur, un logiciel de programmation des cartes Arduino, fait en langage Java et libre en plus d'être multiplateforme, sert comme éditeur et compilateur.

Le langage de programmation utilisé pour citer et éditer le code que l'on va injecter est le C++.

La figure 3.8 représente l'interface du logiciel Arduino.

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

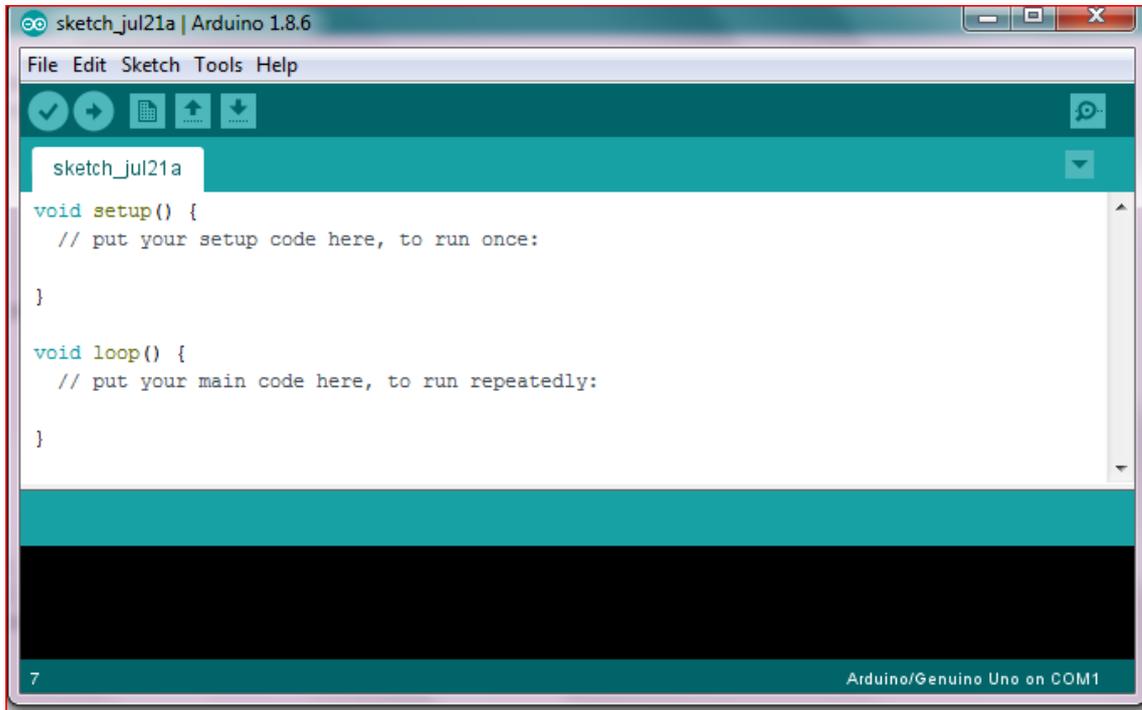


Figure 3.8. Interface du logiciel Arduino

b) L'organigramme

L'organigramme principal comporte quatre étapes essentielles, illustré dans la figure qui suit :

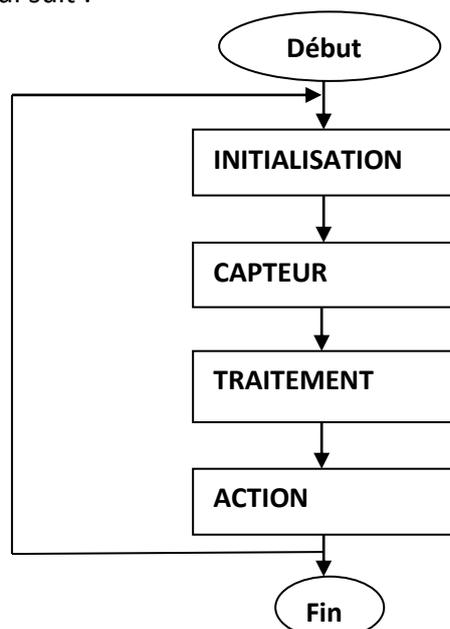


Figure 3.9. Organigramme principal

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

c) Le programme a injecté :

Le programme servant de commande de notre système, qui sera embarqué dans le microcontrôleur ATMEGA 328 est donné ci-dessous:

```
#include<Servo.h>// bibliothèque du servomoteur
Servo myservo1; // servomoteur qui control le mouvement vertical
Servo myservo2; // servomoteur qui control le mouvement horizontal
int pos1 = 90; // position initial servo1
int pos2 = 180; // position initial servo2
int sens1 = A0; // LDR 1
int sens2 = A1; //LDR 2
int sens3 = A2; // LDR 3
int sens4 = A3; //LDR 4
inttolerance = 4; // introduction de la tolérance qui va nous permettre de
stabilise notre servo a une position fixe.
void setup()
{
Serial.begin(9600);
myservo1.attach(8); // attache le servo1 au pin 8
myservo2.attach(3); // attache le servo2 au pin 3
pinMode(sens1, INPUT); // LDR1 est en entrée
pinMode(sens2, INPUT); // LDR2 est en entrée
pinMode(sens3, INPUT); // LDR3 est en entrée
pinMode(sens4, INPUT); // LDR4 est en entrée
myservo1.write(pos1); //place le servo1 a sa position initial
myservo2.write(pos2); //place le servo2 a sa position initial
delay(2000); // 2 seconds delay pour marquée la position initial
}
void loop()
{
int val1 = analogRead(sens1); // lire la valeur de sens1
int val2 = analogRead(sens2); // lire la valeur de sens2
int val3 = analogRead(sens3); // lire la valeur de sens3
int val4 = analogRead(sens4); // lire la valeur de sens4

Serial.println(val1); // afficher la valeur de val1
Serial.println(val2); // afficher la valeur de val2
Serial.println(val3); // afficher la valeur de val3
```

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

```
Serial.println(val4); // afficher la valeur de val4

if ((abs(val1 - val2) <= tolerance) || (abs(val3 - val4) <= tolerance))

    {
        //ne ne fait rien si la différence reste dans la limite toléré

    }

else {
    if(val1 > val2)
        { pos1 = --pos1;}
    if(val1 < val2)
        {pos1 = ++pos1;}
    if(val3 > val4)
        { pos2 = --pos2;}
    if(val3 < val4)
        { pos2= ++pos2;}
    }

if(pos1 > 175) { pos1 = 175; } // limité la rotation a 175
if(pos1 < 5) { pos1 = 5; } // limité la rotation a 5
if(pos2 > 175) { pos2 = 175; } // limité la rotation a 175
if(pos2 < 5) { pos2 = 5; } // limité la rotation a 5

myservo1.write(pos1); // donner la nouvelle pos du servo1
myservo2.write(pos2); // donner la nouvelle pos du servo2
delay(30); // un delay qui fixe la vitesse
}
```

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

3.5.3 Partie simulation (PROTEUS_ISIS)

La simulation de notre montage globale a été faite à l'aide du logiciel PROTEUS_ISIS qui permet de tester et récupérer en temps réel les résultats de la simulation. La figure (3.10) illustre le montage simulé

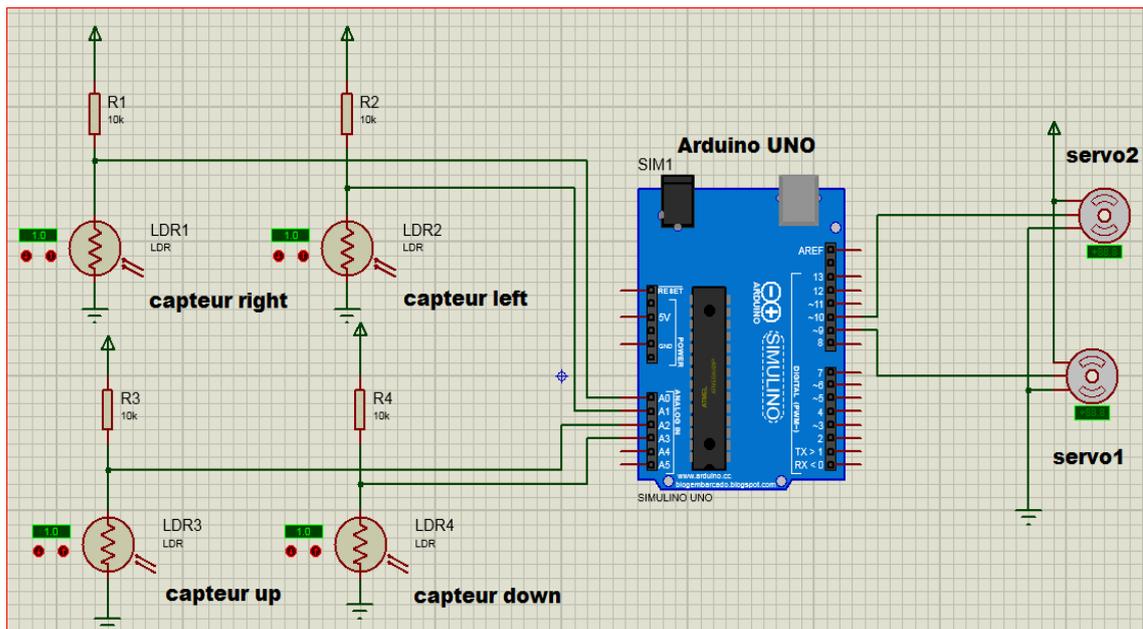


Figure 3.10. Montage du système simulé sous PROTEUS-ISIS

La simulation s'effectue quant en envoi le programme de la simulation vers la carte ARDUINO UNO du logiciel, selon le programme si en fait une variation au niveau des valeurs des LDRs lors de la simulation, en reçoit une (consigne) valeur qui représente la différence du calculé entre eux. Cette valeur provoque une action qui est un ordre d'Arduino vers les servomoteurs qui consiste à faire une rotation on deux axes vertical et horizontal.

3.5.4 Partie électronique

a) Branchement des LDR

Le montage des LDR dans notre système suiveur

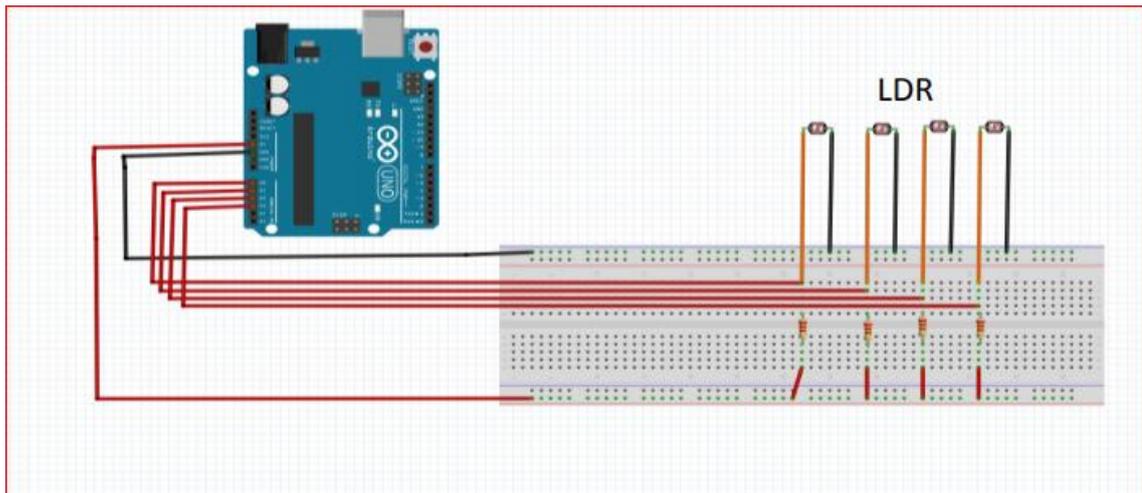


Figure 3.11. Brochage des LDR à l'Arduino.

b) Branchement des servomoteurs

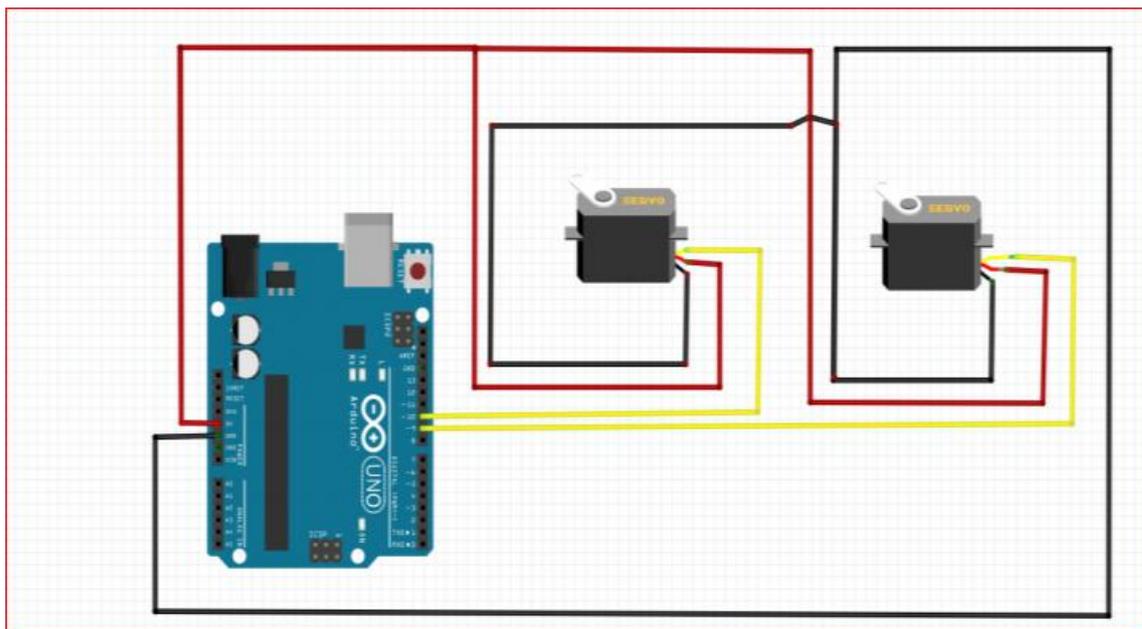


Figure 3.12. Montage Circuit électrique des servomoteurs (Fritzg).

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

- Pour tester le fonctionnement des servomoteurs

On injecte le programme de teste qui se situe dans la bibliothèque des exemples
Arduino>Fichier > Exemples>Servo>Sweep

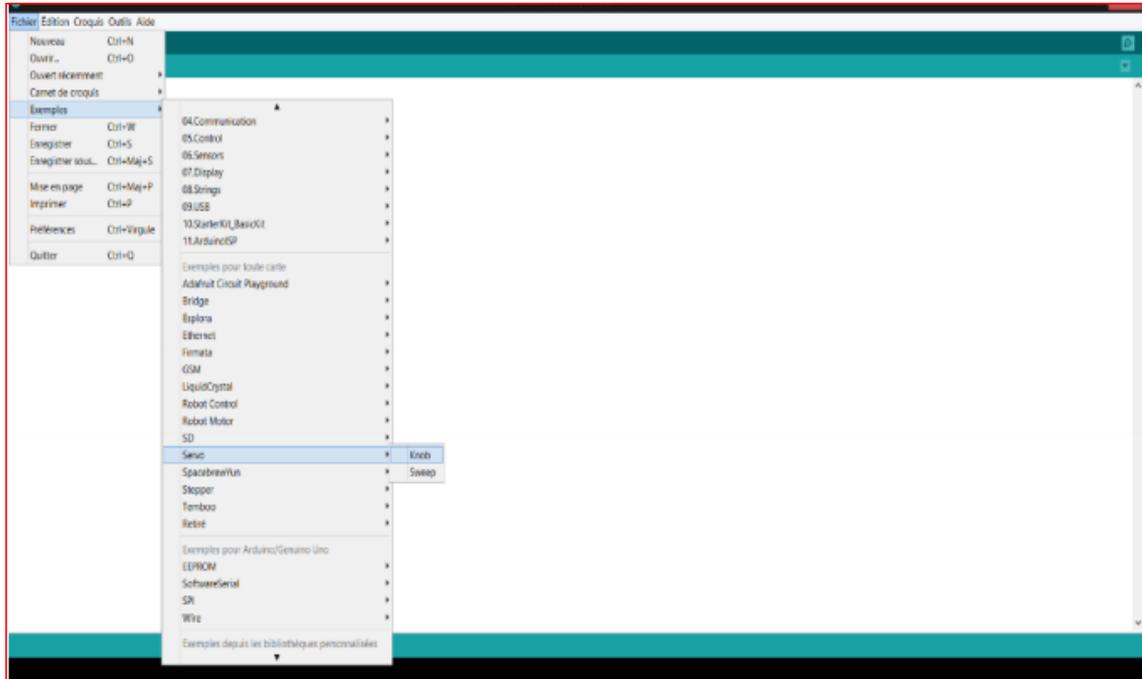


Figure 3.13. Les étapes à suivre pour tester les servomoteurs

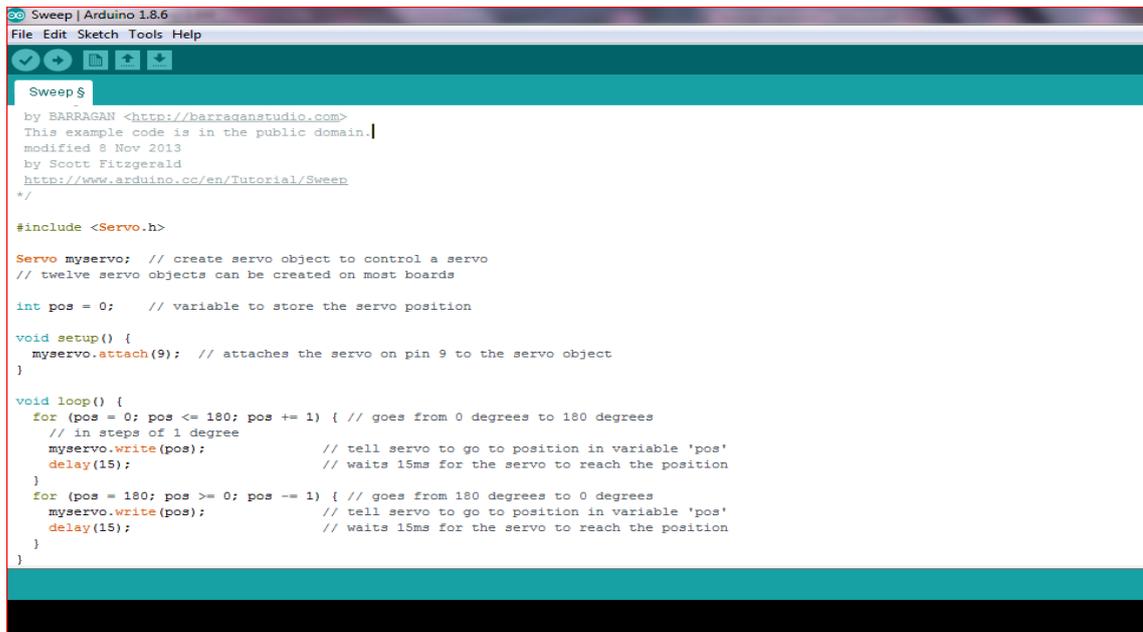


Figure 3.14. Le programme pour tester les servomoteurs

c) Réalisation du circuit électrique

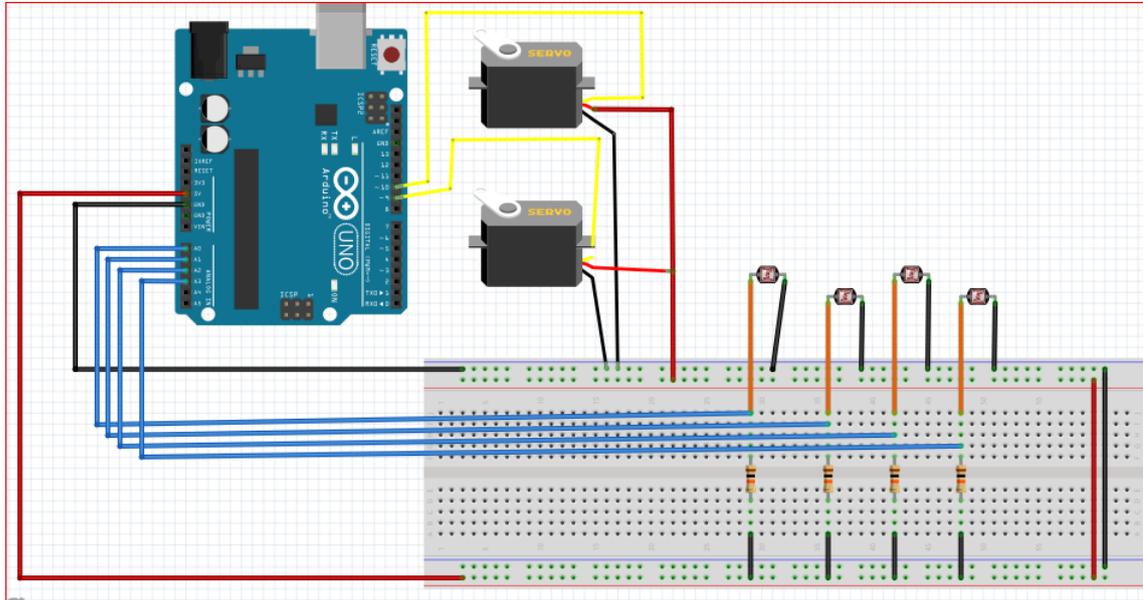


Figure 3.15 : circuit électrique de suiveur

d) L'Alimentation

Notre système est alimenté à la base avec le câble USB qui peut être branché à une extension d'alimentation USB de 5v-1A en utilisant des batteries externes ou PC.

3.5.5 Partie mécanique

a) Structure de suiveur

Pour réaliser notre suiveur solaire, on a choisi de construire une structure en bois commençant par le châssis (qui porte plaque d'essai, carte Arduino, régulateur LM2596 DC-DC), ou on fixe au milieu un support qui a les servomoteurs et on place en dessus un cadre porteur du panneau et des LDRs.

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

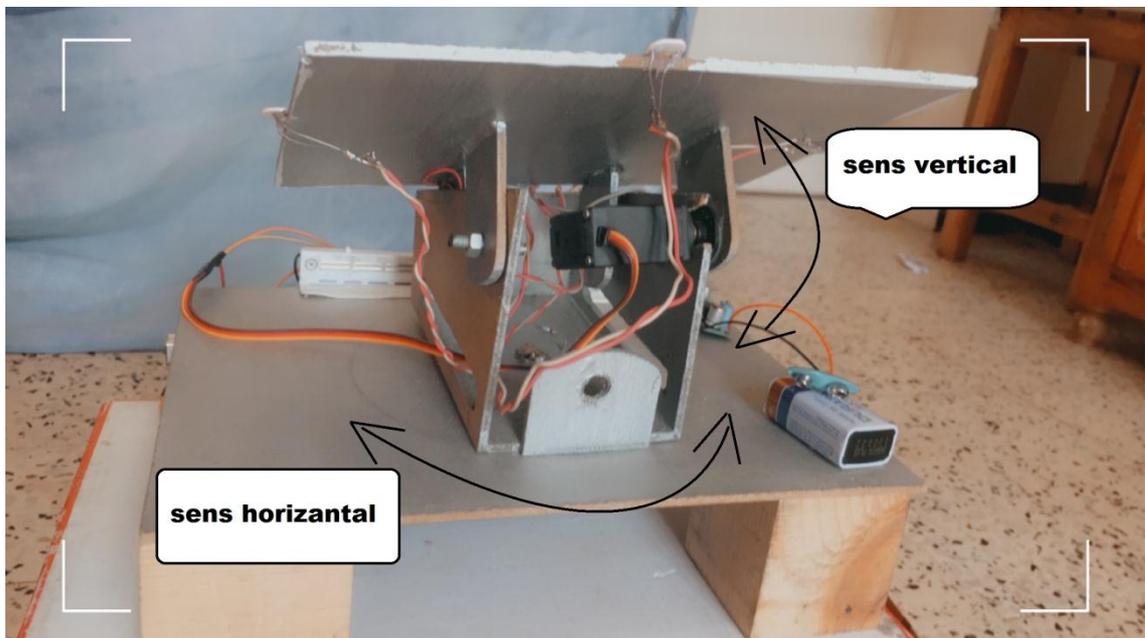
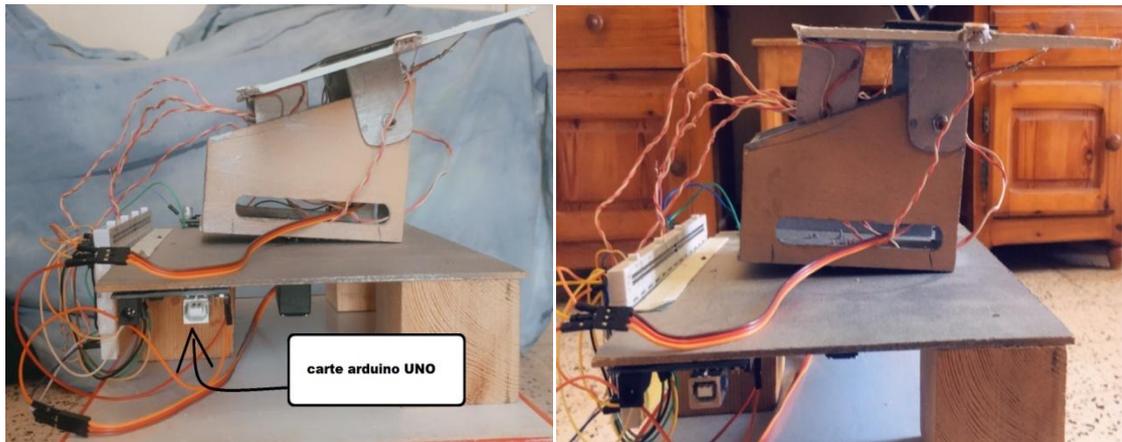


Figure 3.16. Structure de suiveur

b) Positionnement des servomoteurs

Le positionnement des servomoteurs est simple : ils sont montés de sorte à assurer les deux mouvements vertical et horizontal, la figure 3.17 montre le positionnement des deux actionneurs de notre système.

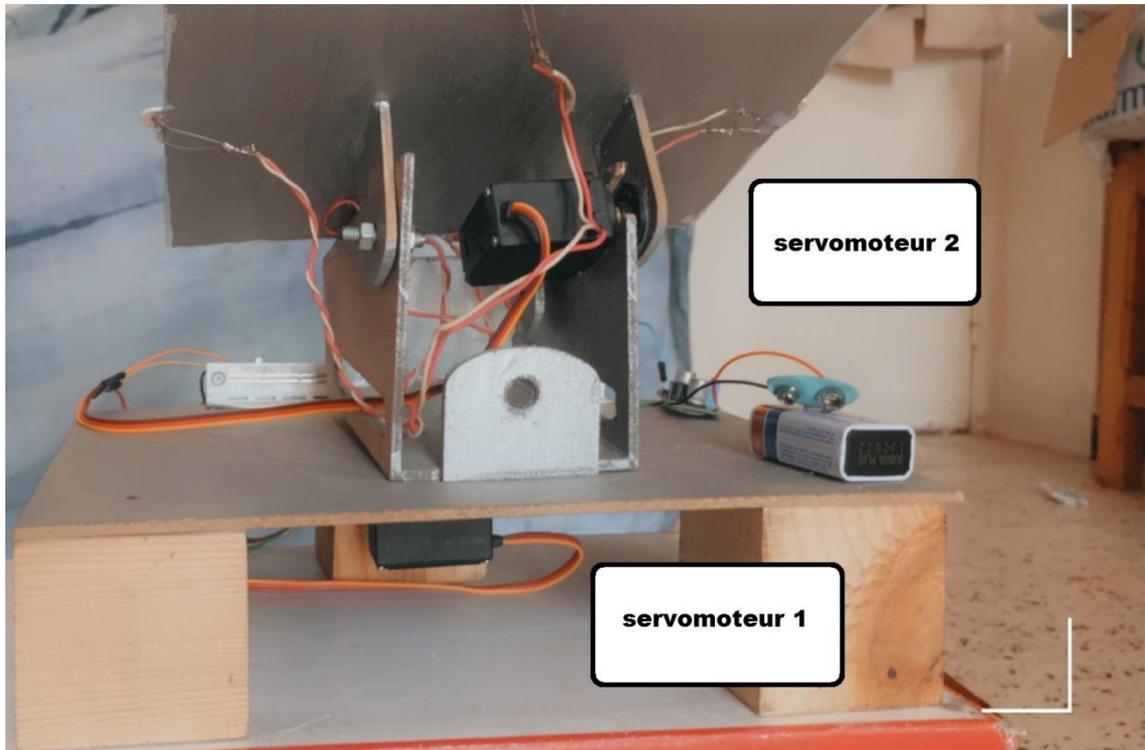


Figure 3.17. Positionnement des servomoteurs

3.5.6 Schémas global (Général) de notre suiveur (photo de notre suiveur)



Figure 3.18. Photo de notre prototype (suiveur solaire)

3.6 Principe de fonctionnement du système suiveur solaire

Le système vise à orienter en temps réel les capteurs vers le soleil pour placer le panneau dans une position optimale par rapport à l'incidence du rayonnement solaire (perpendiculaire au rayonnement si possible) ; car tout au long de la journée et de l'année, la position du soleil varie constamment et d'une manière différente selon l'altitude et l'azimut (d'Est en Ouest à mesure de l'avancée de la journée, en hauteur selon la saison à l'avancée de la journée).

Le principe consiste à remarquer que la lumière reçue par les photorésistances est identique dès que le capteur est orienté dans l'axe de la lumière. Il faut donc mesurer la lumière reçue par chaque photorésistance en mesurant la tension à leurs bornes. Cette mesure est réalisée grâce à la connexion des ports pins A0 à A4 de la carte Arduino.

Chapitre 3 CONCEPTION ET REALISATION DE SUIVEUR SOLAIRE

Nous avons choisis l'utilisation de photorésistances écartées l'une de l'autre et déterminer l'orientation du soleil en calculant la différence d'éclairage, si par exemple la LDR haute reçoit plus de lumière que la LDR bas donc le servomoteur d'azimut va tourner en direction de haute pour égaliser tout ça dans l'axe vertical.

Le même principe s'applique sur l'axe horizontal.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la construction de notre prototype constituer d'un système de suiveur solaire commandé par un microcontrôleur « carte ARDUINO ».

Après le passage par les différentes étapes de développement Ce prototype a fonctionné correctement, il suit la trajectoire du soleil et il déclenche automatiquement.

Pour conclure, on peut dire que on à réussi à réaliser l'objectif principal de ce projet, soit monté et faire fonctionner un suiveur solaire, s'adaptant aux trajectoires de soleil afin d'en récupérer le maximum possible d'énergie et augmenter le rendement de panneau PV.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce rapport porte sur « l'étude et la réalisation d'un suiveur solaire double axes à base d'une carte ARDUINI UNO » en utilisant des composants électroniques à savoir des LDRs, des servomoteurs gérés par un microcontrôleur ATMEGA.

Le but de travail réside dans la mise en oeuvre d'une solution technique permettant de transformer un panneau PV fixe en un panneau PV mobile afin d'améliorer son rendement.

Notre solution consiste à associer un système suiveur solaire qui assure la poursuite du soleil durant la journée grâce aux capteurs LDR et les deux servomoteurs.

La première partie de notre projet consiste d'étudier le système photovoltaïque et leur principe de fonctionnement

Dans la deuxième partie nous avons identifié le système suiveur, ainsi que les différents types des systèmes de poursuite.

La dernière partie consiste la programmation et la réalisation du notre suiveur solaire.

Ce projet de fin d'études était pour moi l'occasion précieuse de faire multidisciplinaire, associant l'instrumentation, l'électronique, l'automatique, la mécanique, la programmation et les énergies renouvelable. Il m'apporté de nouvelles connaissances dans le domaine de l'énergie solaire qui est en plein essor.

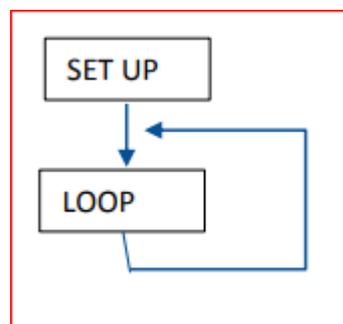
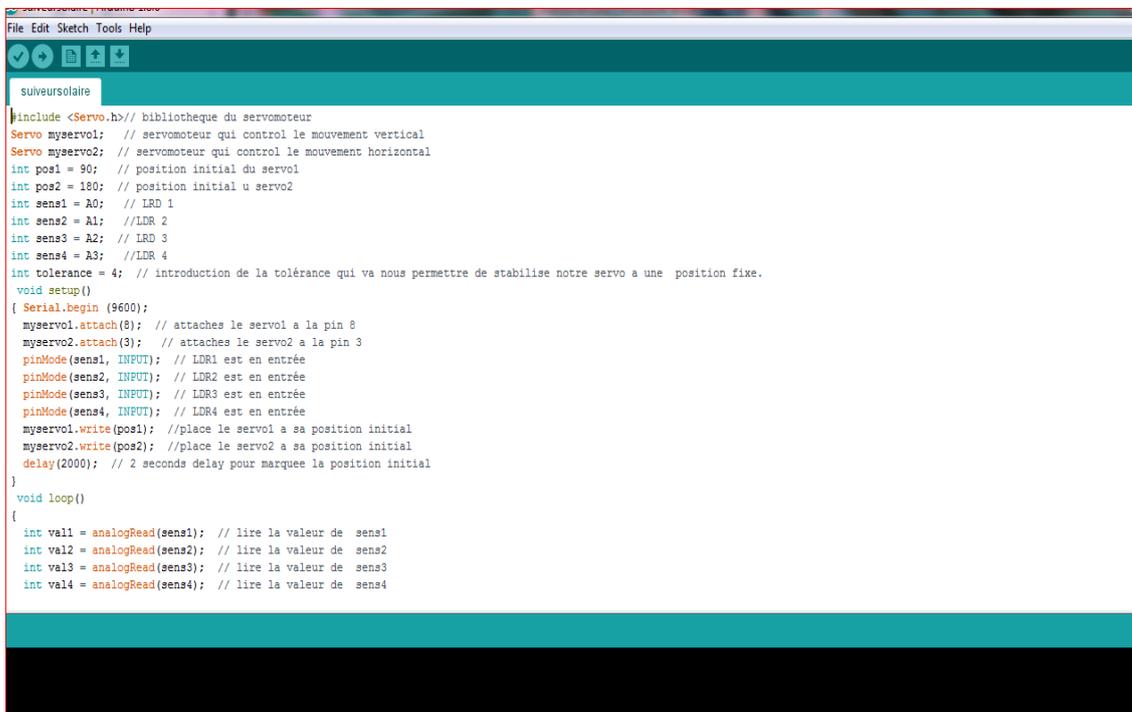
En perspective, je souhaite améliorer le système en lui rajoutant des systèmes de protection contre le changement brusque du climat et qu'il soit autonome à 100%, telle que un système de refroidissement.

.Logiciel utilisé

❖ 1. Arduino

Langage proche du C.

- Programme structuré :
- Une section « setup » 1 seule exécution après R à Z ;
- Une section « loop » exécuté indéfiniment en boucle.
- De très nombreuses librairies logicielles disponibles.

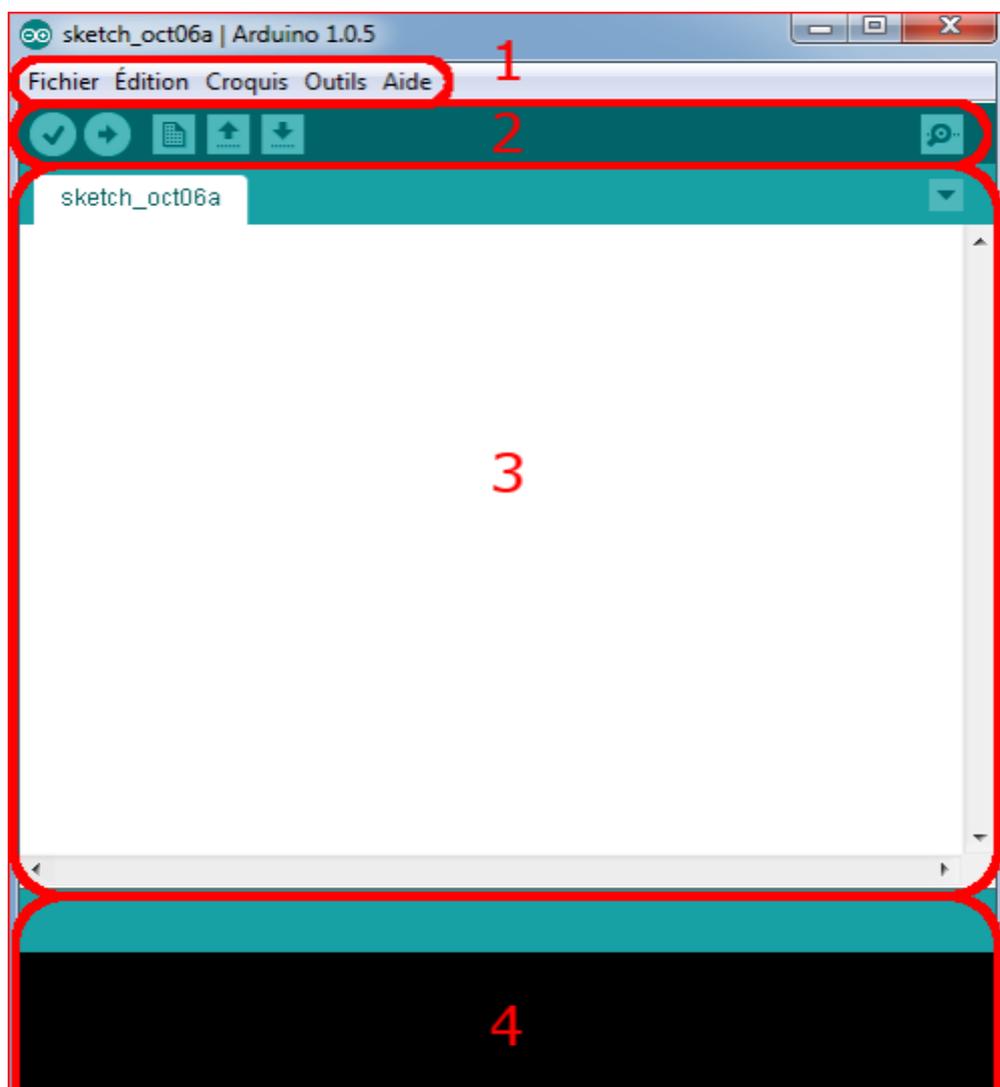
```

suiweursolaire

#include <Servo.h> // bibliotheque du servomoteur
Servo myservo1; // servomoteur qui control le mouvement vertical
Servo myservo2; // servomoteur qui control le mouvement horizontal
int pos1 = 90; // position initial du servo1
int pos2 = 180; // position initial u servo2
int sens1 = A0; // LDR 1
int sens2 = A1; //LDR 2
int sens3 = A2; // LDR 3
int sens4 = A3; //LDR 4
int tolerance = 4; // introduction de la tolérance qui va nous permettre de stabilise notre servo a une position fixe.
void setup()
{
  Serial.begin (9600);
  myservo1.attach(8); // attache le servo1 a la pin 8
  myservo2.attach(3); // attache le servo2 a la pin 3
  pinMode(sens1, INPUT); // LDR1 est en entrée
  pinMode(sens2, INPUT); // LDR2 est en entrée
  pinMode(sens3, INPUT); // LDR3 est en entrée
  pinMode(sens4, INPUT); // LDR4 est en entrée
  myservo1.write(pos1); //place le servo1 a sa position initial
  myservo2.write(pos2); //place le servo2 a sa position initial
  delay(2000); // 2 seconds delay pour marquee la position initial
}
void loop()
{
  int val1 = analogRead(sens1); // lire la valeur de sens1
  int val2 = analogRead(sens2); // lire la valeur de sens2
  int val3 = analogRead(sens3); // lire la valeur de sens3
  int val4 = analogRead(sens4); // lire la valeur de sens4
}
  
```

Interface de logiciel ARDUINO

✓ Présentation de l'interface ARDUINO



L'interface de l'IDE Arduino en détail

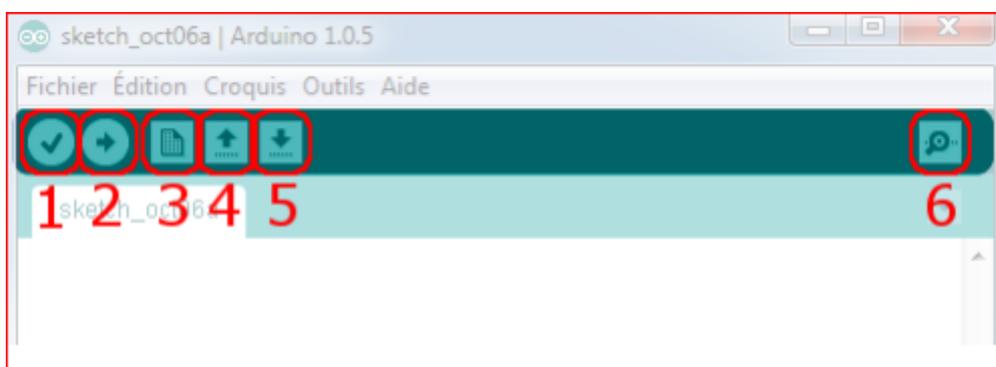
➤ Correspondance

- Le cadre numéro 1 : ce sont les options de configuration du logiciel
- Le cadre numéro 2 : il contient les boutons qui vont nous servir lorsque l'on va programmer nos cartes.

- Le cadre numéro 3 : ce bloc va contenir le programme que nous allons créer
- Le cadre numéro 4 : celui-ci est important, car il va nous aider à corriger les fautes dans notre programme.

➤ Les boutons

Voyons à présent à quoi servent les boutons, encadrés en rouge et numérotés par le chiffre 2 dans la figure précédente.



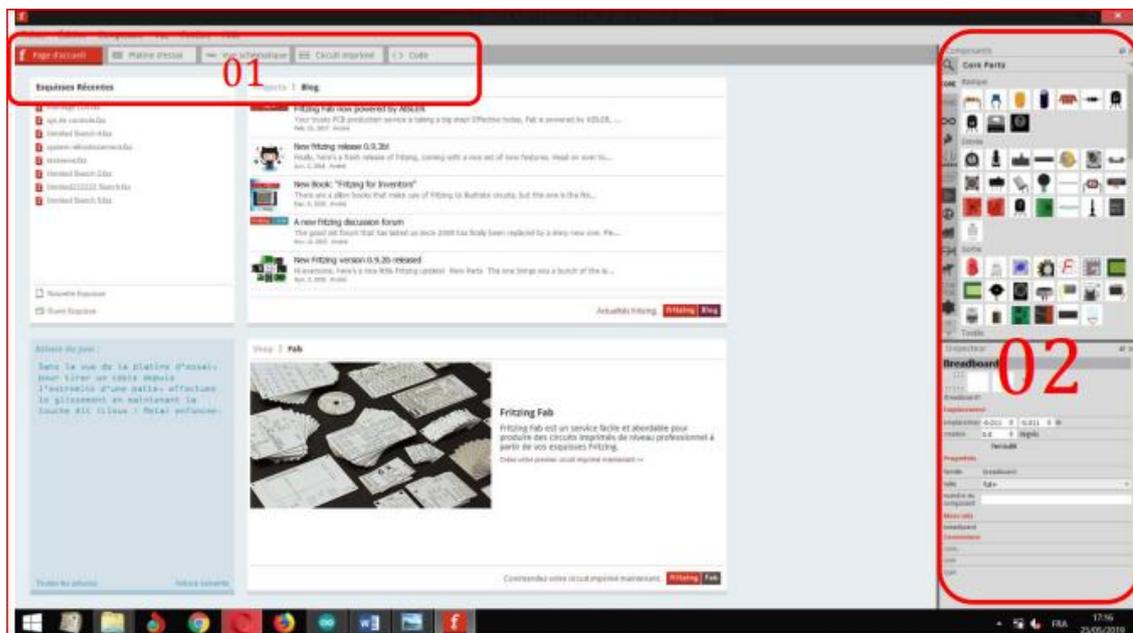
La barre d'outils

- Bouton 1 : Ce bouton permet de vérifier le programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans le programme.
- Bouton 2 : Charge (téléverse) le programme dans la carte Arduino.
- Bouton 3 : Crée un nouveau fichier.
- Bouton 4 : Ouvre un fichier.
- Bouton 5 : Enregistre le fichier.
- Bouton 6 : Ouvre le moniteur série

❖ 2. Fritzing

C'est logiciel très simple sert a réalisé des montages électrique

Présentation de logiciel



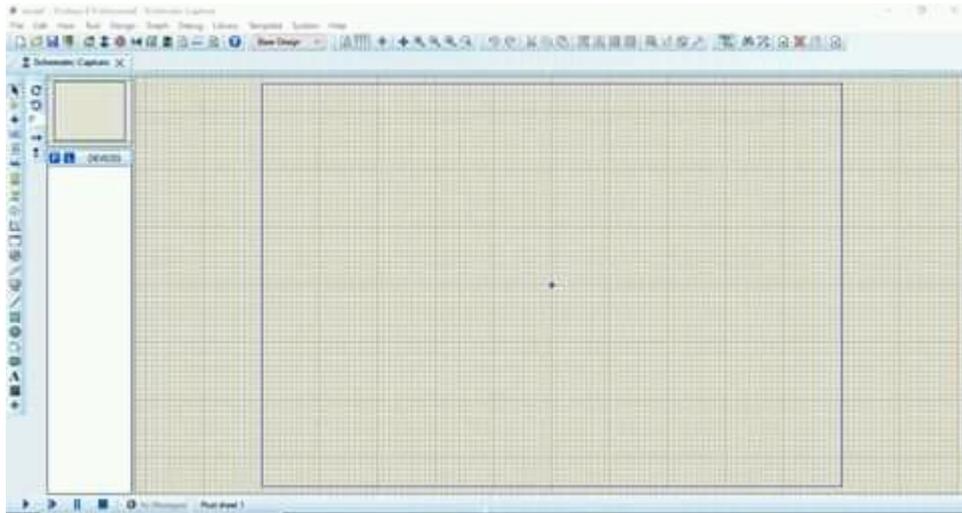
Présentation de logiciel

Correspondance :

- 01 : barre d'outils composé de « platine d'essai », « vue schématique », « circuit imprimé », « code ».
- 0.2 : liste des composants.

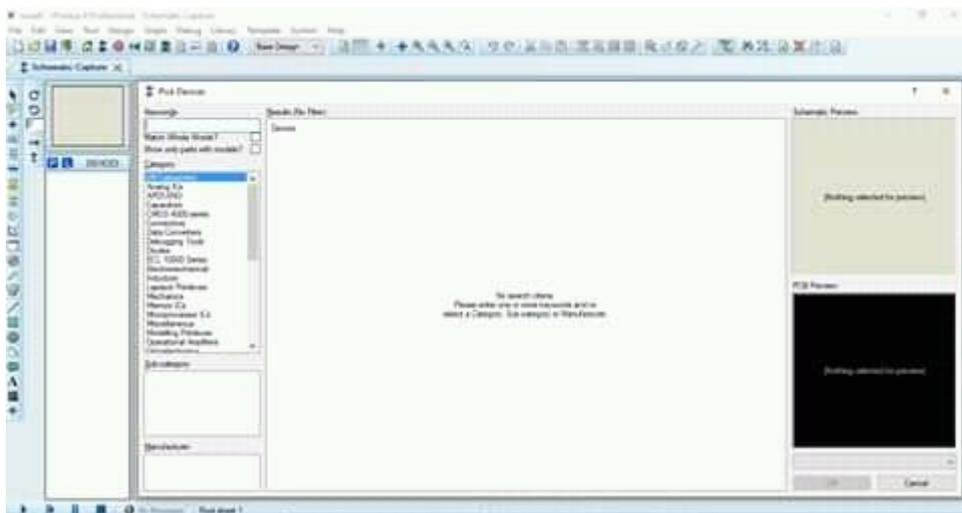
❖ 3. Proteus 8 Professional

Est une suite logiciel destinée à l'électronique, les logiciels incluent dans proteus Professional permettent a la CAO (construction assistée par ordinateur) dans le domaine électronique.



Interface de logiciel proteus 8 Professional

La fenêtre ou ce trouve les composants



Bibliographies

- [1] KADRI IBTISSEM : 'Etude, Conception et réalisation d'un suiveur de soleil', Mémoire de master énergétique et énergie renouvelables, Université BekrBelkaid Tlemcen, 25 juin 2018.
- [2] ARAFA KADDOURI : 'Conception et réalisation d'un suiveur solaire à deux axes', Mémoire de PFE Ingénieur d'Etat en Système électronique & Télécommunications', Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 29 juin 2015.
- [3] MEKKI WALID BADR-EDDINE et MOHAMMED ABDELKADER WALID : ' Conception et réalisation d'un panneau solaire à base d'Arduino', Mémoire de PFE Master Instrumentation Electronique, Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2018/2019.
- [4] Boughoufala Mohamed : 'Conception et réalisation d'un système de suiveur solaire pour des systèmes photovoltaïques ', Mémoire de PFE Magister en électronique, Université MOHAMED BOUDIAF d'Oron U.S.T.O, 08/02/2011.
- [5] <http://tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellulephotovltaique/historique-dela-cellule-photovoltaique.html>
- [6] www.nrel.gov/resarch/re-photovoltaic.html.
- [7] www.sciencedirect.com/topics/engineering/photovoltaic-technology
- [8] www.electricaleasy.com/2015/solar-power-system-does-it-work.html | ?m=1
- [9] Halouane Assia : 'Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque', Mémoire de PFE Master Génie Mécanique, Energétique et Environnement, Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, 2016/2017.
- [10] Dr. EL Amin KOUDRI BOUDJELTHIA CDER, 'Energie renouvelables : un moteur principal du développement durable en Algérie', centre de développement des énergies renouvelables CDER.
- [11] https://www.google.com/url?q=https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/DE/Publikationen/Praesentationen/2016/160216-iv-algerien-10-creg.pdf%3F_blob%3DpublicationFile%26v%3D7&sa=U&ved=2ahUKewjTkpvY1YbsAhVRRBoKHYSyDzMQFjAAegQIAxAB&usg=AOvVaw1TXOznVigpl1kbwag-8c4w
- [12] https://www.wikiwand.com/fr/%C3%89nergie_en_Alg%C3%A9rie
- [13] www.sciencedirect.com/topics/engineering/direct-radiation
- [14] www.google.comsearchq=spectre+solaire&rlz

Bibliographies

- [15] www.sciencedirect.com/topics/engineering/direct-radiation
- [16] www.solarmango.com/solar/-mango-dictionary/diffuse-radiation/
- [17] www.pik-postdam.de/output/climate-weather-postdam/climate-diagrams/global-radiation
- [18] <http://www.memoireonline.com/03/20/11730/tracker-solaire-a-deux-axes.html>
- [19] National Renewable Energy Laboratory (NREL) 2013 International Renewable Energy Conference.
- [20] www.google.com/search?q=les+diff%C3%A9rents+zones+%C3%A9nerg%C3%A9tiques+dans+l%27alg%C3%A9rie&rlz=1C
- [21] <https://www.planete-energies.com/en/medias/close/how-does-photovoltaic-cell-work>
- [22] https://www.google.com/search?q=central+photovoltaique&client=ms-android-huawei&sxsrf=ALeKk02yJRvJaT2Me0FPVMU_DBDI0xQyTw:1600365375100&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiR7cXN4fDrAhVGeMAKHQPsAWkQ_AUICCGB&biw=320&bih=452&biw=320&bih=452&biw=320&bih=452
- [23] http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/basics/how_pv_cells_work.htm
- [24] http://www.arcobelsprl.be/photovolt/effet_photovoltaique.html
- [25] http://www.photovoltaique.guidenr.fr/l_5_dopage-silicium-photovoltaique.php
- [26] www.energieplus-lestie.be
- [27] <http://www.myshop-solaire.com>
- [28] YACINE Fouad : 'ETUDE DES NOUVELLES GENERATIONS DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUE', Mémoire de Magister en Physique Rayonnement et Matière, Université des Science et technologie D'Oron Mohamed Boudiaf, 2010/2011.
- [29] <https://www.cdiscount.com/bricolage/chauffage/panneau-solaire-amorphe-45w-12v1255x645x38mm/f-16612-auc4016138663938.html>
- [30] M. SLAMA Fateh : 'Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique', Mémoire de Magister en Electrotechnique, Réseau Electrique, Université FERHAT ABBAS-SETIF UFAS.
- [31] Mounya Zennou et Guamit Fouzia : 'ETUDE PAR SIMULATION DE LA METHODE P&O POUR UN PANNEAU PHOTOVOLTAIQUE', Mémoire de Master en Commande Electrique, Université BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2019.
- [32] https://www.researchgate.net/figure/Module-PV-en-groupement-serie-parallele-des-cellules_fig1_282574116

Bibliographies

- [33] <http://www.labri.fr/travaux/Helios/resources.pdf>
- [34] https://www.researchgate.net/figure/1-schema-equivalent-dune-cellule-PV-Modele-a-une-diode_fig5_320494826
- [35] www.researchgate.net/figure/1-schema-equivalent-dune-cellule-PV-Modele-a-une-diode_fig5_320494826
- [36] https://www.google.com/url?q=http://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/10/Ahmed-Behalil-Mohc%25C3%25A8ne-Bouakka-Khayreddine.pdf&sa=U&ved=2ahUKEwiG9_aGsKjsAhUICWMBHUxyBAkQFjANegQIBRAB&usg=AOvVaw019tzb6VntzaSX9HvDTy3v
- [37] Mancer Mansouri : 'Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (ALGaAs/GaAs)', Mémoire de Magister en Physique des Matériaux, Université Mohamed Khider – Biskra, 04/07/2012.
- [38] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/short-circuit-current>
- [39] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage>
- [40] https://www.memoireonline.com/05/09/2066/m_Les-pompe-solaires--Dimensionnement-dune-station-de-pompage-en-zone-maracher0.html
- [41] DJESSAZ Zahira, 'EXTRACTION DES PARAMETRES PHYSIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE A DEUX EXPONENTIELS PAR LA METHODE DE SALGORITHMME GENETIQUES', Magistère en Energétique et mécanique des fluide, Université Ferhat Abbas SETIF UFAS.
- [42] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/rendement-et-puissance-crete-des-cellules-photovoltaiques/>
- [43] BELOUADAH Omar Farouk : 'Etude et simulation d'une cellule photovoltaïque à base des semi-conducteurs III-V', Mémoire de Master Académique, Université MOHAMED BOUDIAF – M'SILA, 2016/2017.
- [44] Assia ZERDOUDI et Rachid CHENNI : 'ETUDE DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES SUR UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE ', Science & Technologie A-N°41, Juin 2015, 19-24, Université des frères Mentouri de Constantine 2014/2015
- [45] Abdelkarim GHEZAL : ' ASPECTS TECHNIQUES DES PROJETS SOLAIRES PV RACCORDES AU RESEAU',
- [46] Dr. BELAID LALOUNI Sofia, Maitre de conférences, classe B : 'Coure Energie solaire photovoltaïque ', Université A.MIRA de BEJAIA, p18, 2014/2015.

Bibliographies

[47] SALAHEDDINE BENSELEM : ' Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires ', Mémoire de Magister Energétique et Mécanique des Fluides, Université FERHAT ABBAS - SETIF ,06/01/2011.

[48] HELALI KAMELIA : 'Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative' Mémoire de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE Machines Electriques, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 25 / 06 / 20012.

[49] BELKEBIR KATIA et CHAABI SIHAM : ' Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil à Base d'une Carte Arduino UNO ', Mémoire De Fin d'Études De MASTER PROFESSIONNEL Génie Électrique Électronique Industrielles, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2016/2017.

[50] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-declination>

[51] <https://mecaspa.cannes-aero-patrimoine.net/PROJETS/localisation/localisation.htm>

[52] Thomas B. Greenslade, Jr., « Heliostats », Jules-Célestin Jamin — « Cours de physique de l'École polytechnique. Tome 3 - Fasc. 2 » Gauthier-Villars et fils (Paris) - 1885-1906

[53] <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9liostat> 'Practical Solar - Technology- février 2008'.

<https://fr.m.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9liostat>

[54] <https://ilovemysolar.com/what-are-solar-trackers/>

[55] BOUDJELKHA Ammar et GUESSOUMI Farid : 'Commande d'un panneau solaire à l'aide d'un microcontrôleur ATMEGA', Mémoire de MASTER ACADEMIQUE Système de Télécommunications, Université Echahid HAMMA Lakhdar d'El-Oued, 2017/2018.

[56] https://thesolarstore.com/active-passive-trackers-c-23_28.html

[57] Benmohammadi Zahra : 'Etude, conception et réalisation d'une commande d'un suiveur solaire', Mémoire de projet de fin d'étude, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, juin 2014.

[58] <https://sinovoltaics.com/centre-d'apprentissage/csp/trackers-actifs-et-trackers-passifs>

[59] IHAJ Arabiya et ZENGUILA Karima : 'Etude et réalisation d'un suiveur solaire photovoltaïque', MEMOIRE DE MASTER PHYSIQUE ENERGÉTIQUE, UNIVERSITE d'ADRAR, Mai 2016.

[60] <https://www.google.com/url?q=https://googleweblight.com/i%3Fu%3Dhttps://www.hilariipublisher.com/open-access/process-of-development-a-dual-axis-solar-tracking-prototype-2229-8711-1000189.pdf%26grqid%3Dj7qOuRK3%26s%3D1%26hl%3Dfr->

Bibliographies

[DZ%26geid%3D1096&sa=U&ved=2ahUKEwi9x-](#)

[CN_vXrAhWH0eAKHXhGAmAQFnoECA8QAg&usg=AOvVaw2st62oUWPcnBRPVZHdmKsl](#)

[60] SINI BOUKROUT Abd El Raouf, LAMRI Mohamed Lamine : 'Etude et conception d'un suiveur du soleil pour un générateur photovoltaïque', Mémoire de Master Académique en Electromécanique et systèmes de commande, Université A. M. OULHADJ – Bouira, 2016/2017.

[61] Brahim Rida et Souiou Abderraouf : mémoire fin d'étude réalisation d'un suiveur solaire base de PIC 2013/2014.

[62] https://www.google.com/url?q=http://pmb-int.cuniv-aintemouchent.dz/opac_css/doc_num.php%3Fexplnum_id%3D2222&sa=U&ved=2ahUKEwip2KSU66rsAhVZCWMBHWDUAIYQFjACegQICBAB&usg=AOvVaw06qiZNKgkafAwpycj2OSQf

[63] <http://m.dsnsolar.com/info/advantage-and../>

[64] https://www.google.com/search?q=carte+Arduino+uno&client=ms-android-huawei&sxsrf=ALeKk01grEznPV0nUwbkcl_1AhZM7dz0_Q:1601295532815&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjHqKfb6ovsAhXQqqQKHU7iDSYQ_AUICCgB&biw=320&bih=452#&biw=320&bih=452

[65] Erik Bartmen, LE GRAND LIVRE D'ARDUINO ; 2^{eme} édition. 05/07/2020.

[66] Astalavven, Eskimon et Olyet ; Arduino pour bien commencer en électronique et en programmation.05/07/2020.

https://www.google.com/url?q=http://www.multimedialab.be/doc/erg/2018-2019/Arduino/Le_grand_livre_d_Arduino_Erik_Bartmann_Eyrolles_2018/Le_grand_livre_d_Arduino_Erik_Bartmann_Eyrolles_2018.pdf&sa=U&ved=2ahUKEwj4pNiV7arsAhUZBWMBHfbWBToQFjAAegQICbAB&usg=AOvVaw3AfiNnLyGSralDiEcaRIUx

[67] Erik Bartmen, LE GRAND LIVRE D'ARDUINO ; 3^{eme} édition.05/07/2020.

https://www.google.com/url?q=https://googleweblight.com/sp%3Fu%3Dhttps://www.eyrolles.com/Sciences/Livre/le-grand-livre-d-arduino-9782212674880/%26grqid%3DKONHJSI4%26s%3D1%26hl%3Dfr-DZ&sa=U&ved=2ahUKEwj_evp_N7KrsAhUIAmMBHevXBRgQFjAAegQIBRAB&usg=AOvVaw0rHTNW3RGFKdts2DFq0VbS

[68] https://www.google.com/url?q=https://googleweblight.com/sp%3Fu%3Dhttps://www.rhydolabz.com/miscellaneous-smps-power-supplies-c-205_210/lm2596-step-down-module-dcdc-buck-converter-power-supply-p-2310.html%26grqid%3DAIgoT7nh%26s%3D1%26hl%3Dfr-DZ&sa=U&ved=2ahUKEwj_iez99KXsAhWj8uAKHTfzCREQFnoECAkQAg&usg=AOvVaw0VNVXwU9-KkFt0VPb3dXU1

[69] <https://robu.in/product/lm2596s-dc-dc-buck-converter-power-supply/>

Bibliographies

[70]https://www.google.com/url?q=https://googleweblight.com/sp%3Fu%3Dhttps://www.axeindustries.com/details.php/id/7556%26grqid%3Db0zB8EH5%26s%3D1%26hl%3Dfr-DZ&sa=U&ved=2ahUKEwjlf2r66XsAhUI5eAKHVT-BxYQFnoECAoQAg&usg=AOvVaw1a9_NCBaJeK7eeCaRiW2it

[71]https://www.google.com/url?q=https://googleweblight.com/sp%3Fu%3Dhttps://www.laragus.fr/dictionnaire/moteur-energie/servomoteur-9864401.html%26grqid%3DHoM3X_uS%26s%3D1%26hl%3Dfr-DZ&sa=U&ved=2ahUKEwiopZjO76XsAhUV8uAKHRBECgoQFnoECAcQAg&usg=AOvVaw3tYnFvKshS1FAd26rNuetL

[72]https://www.google.com/url?q=https://googleweblight.com/sp%3Fu%3Dhttps://www.car-netdumaker.net/articles/controler-un-servomoteur-avec-une-carte-arduino-genuino/%26grqid%3DfhJFeFxA%26s%3D1%26hl%3Dfr-DZ&sa=U&ved=2ahUKEwj8wfSd8KXsAhXi0eAKHYBeAQ4QFnoECAYQBA&usg=AOvVaw12_Ahj6qBWO9d-gRVcZM8C