



Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : **Automatique**

Spécialité : **Automatique**

Par : Mr TALEBAHMED Mustapha

Et Mr BOUABDELLI Bachir

Thème

**Etude, conception et
réalisation d'un suiveur solaire
à base d'une carte Arduino**

Soutenu publiquement le : 21/06/2018

Devant le jury :

| | | | |
|------------------------------|-------|----------------|------------------|
| HACENE Nacer | M.A.A | Univ. Ghardaïa | Président |
| ALLALI Mohammed | M.A.A | Univ. Ghardaïa | Examineur |
| BOUARROUDJ Noureddine | M.R.A | URAER Ghardaïa | Examineur |
| BAKKAR Belgacem | M.A.A | Univ. Ghardaïa | Encadreur |

Année universitaire 2017/2018

REMERCIEMENT

Nos premiers remerciements à notre dieu ALLAH le tout puissant, qui nous a guidé a terminer ce travail.

Mes plus chaleureux et sincères remerciements vont à notre encadreur Mr. BEKKAR BELKACEM, tout d'abord pour nous 'avoir proposé ce sujet et pour son qualités pédagogiques, Un remerciement particulier pour sa disponibilité, et ces conseils fructueux, en cherchant toujours à atteindre la rigueur scientifique.

Nous tenons à remercier Mr BOUHADDA YUCEF directeur de recherche à l'unité de recherche appliquée en énergie renouvelable (UREAR) pour son accueil et son aide.

Nous remercions aussi tous les membres de Jury, d'avoir accepté d'élaborer et juger ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudes également à tous nos professeurs pour leurs efforts fournis et la qualité d'enseignements.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements aux personnes qui ont eu confiance en nous, qui nous ont apporté leur aide et soutien et qui ont contribué à l'élaboration de ce projet de fin d'études.



Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

A nos chers parents.

*A la mémoire du père de Bachir que dieu le
tout puissant l'accueille dans son vaste
paradis.*

*A nos petites familles qui nous ont toujours
soutenus*

A nos frères

A nos sœurs.

A nos amis.

A toute les proches et les collègues

A tous les gens que nous connaissons.

Résumé

Pour le but de conserver l'énergie non renouvelable et d'exploiter le maximum d'**énergie solaire** exercée sur notre région ; nous avons choisis notre thème qui consiste à étudier et réaliser un **suiveur de panneau solaire a double axes**.

Nous avons touché par cette étude les étapes de développement de l'exploitation de l'énergie solaire.

Cette étude nous a permet de connaitre le degré d'importance d'exploiter cette énergie et de minimiser les couts de gain d'énergie surtout pour le future par l'utilisation des suiveurs intelligents (commandés a double axe).

La réalisation de ce projet nous a donnée la chance de savoir commander tel procédèa l'aide de la carte **Arduino**.

MOTS CLES :

Carte Arduino ; Energie renouvelable ; Energie solaire et Suiveur à double axe.

ملخص:

بهدف الحفاظ على الطاقة غير المتجددة و الاستغلال الأمثل للطاقة الشمسية المتوفرة بكثرة في منطقتنا ، وقع اختيارنا على هذا الموضوع و الذي يعالج دراسة و انجاز متتبع الألواح الشمسية.

تطرقنا في هذه الدراسة إلى مراحل تطور استغلال الطاقة الشمسية.

هذه الدراسة أمكنتنا من معرفة درجة أهمية استغلال هذه الطاقة، وتقليل تكاليف توفير الطاقة، خاصة في المستقبل ، عن طريق استعمال المتتبع ذو المحورين . انجاز هذا المشروع أعطانا أيضا فرصة معرفة كيفية التحكم في الآليات بواسطة بطاقة الأردوينو.

كلمات مفتاحية :

بطاقة الأردوينو ، الطاقة المتجددة ، الطاقة الشمسية ، متتبع ذو محورين

Table des matières

| | |
|--|------|
| Remerciements | i |
| Résumé | ii |
| les mots clés..... | iii |
| Table des matières | iii |
| Liste des figures..... | vii |
| Liste des tableaux | viii |
| Liste des abréviations | ix |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I : l'état de l'art | 3 |
| I.1.Introduction..... | 3 |
| I.2. les énergies renouvelables..... | 3 |
| I.3.historique de l'énergie solaire..... | 4 |
| I.3.1.l'évolution de l'utilisation des énergie renouvelable..... | 5 |
| I.3.2.l'énergie solaire en Algérie..... | 5 |
| I.3.3. l'énergie solaire photovoltaïque..... | 6 |
| I.3.3.1. premiers utilisation sur terre..... | 7 |
| I.3.3.2. le progrès des photovoltaïques jusqu'à nos jours..... | 7 |
| I.4. la cellule photovoltaïques | 8 |
| I.4.1. la définition..... | 8 |
| I.4.2. le fonctionnement de la cellule..... | 9 |
| a- l'absorbation..... | 10 |
| b- le transfert de l'énergie lumineuse en électron..... | 10 |
| c- la collecte des charges..... | 11 |
| c-1. les semi-conducteurs..... | 11 |

| | |
|--|----|
| c-2. ledopage et la jonction PN..... | 11 |
| I.5. le rendement des panneaux solaires..... | 14 |
| I.5.1. les types des cellules composant des panneaux solaires..... | 14 |
| I.5.2. la puissance de l'installation photovoltaïque..... | 14 |
| I.5.3. la surface des panneaux photovoltaïques..... | 15 |
| I.5.4. l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires..... | 15 |
| I.6. gisement solaire | 16 |
| I.7. les différents systèmes de suiveur solaire | 17 |
| I.7.1. le suiveur solaire passif..... | 17 |
| I.7.2. le suiveur solaire actifs..... | 18 |
| I.7.2.1. le suiveur mono-axe..... | 18 |
| I.7.2.2. le suiveur à double axe..... | 18 |
| I.8. conclusion..... | 19 |
| Chapitre II. Les techniques de poursuites des panneaux solaires..... | 20 |
| II.1. introduction..... | 20 |
| II.2. Méthode Astronomique..... | 22 |
| II.2.1. mouvement de la terre..... | 23 |
| a- révolution au tour du soleil..... | 23 |
| b- rotation sur elle-même..... | 23 |
| c- conséquences..... | 23 |
| II.2.2. position du soleil..... | 24 |
| II.2.2.1. les coordonnées horizontales..... | 25 |
| a- la déclinaison du soleil..... | 26 |
| b- l'angle horaire du soleil..... | 26 |
| II.2.3. orientation d'un plan..... | 26 |
| II.2.3.1. angle d'incidence sur un plan..... | 26 |

| | |
|--|----|
| II.3. Méthode automatique..... | 27 |
| II.3.1. Les suiveurs mono-axe..... | 27 |
| II.3.2. Les suiveurs a doubles axe..... | 27 |
| II.3.3. Intérêt des panneaux solaires mobiles par rapport aux panneaux fixes..... | 28 |
| II.4. Conclusion..... | 28 |
| Chapitre III. Réalisation d'un suiveur a double axe commandé par la carte Arduino..... | 29 |
| III.1. Introduction :..... | 29 |
| III.2. Description du prototype (partie mécanique):..... | 29 |
| III.3. Description de la partie électronique..... | 30 |
| III.3.1. Circuit de la commande | 30 |
| III.3.1.1. Description de la carte Arduino le cœur de la partie commande | 30 |
| III.3.1.1.1.Définition | 30 |
| III.3.1.1.2. Caractéristiques de la carte Arduino | 31 |
| III.3.1.2. Les servomoteurs..... | 32 |
| III.3.1.2.1. Définition | 32 |
| III.3.1.2.2. Fonctionnement | 32 |
| III.3.1.3. Capteur LDR :..... | 34 |
| III.3.1.3.1.Définition | 34 |
| III.3.1.3.2. Principe de fonctionnement..... | 35 |
| III.3.1.4.Le montage du matériel utilisé..... | 35 |
| III.3.2. Description de la partie programmation | 37 |
| III.3.2.1. L'interface de programmation utilisé | 37 |
| III.3.2.2. l'Organigramme utilisé pour la programmation | 39 |
| III.4. Test et problèmes rencontrés | 40 |
| III.5. Conclusion..... | 41 |
| Annexe | 42 |

Liste des figures :

| | |
|---|-----------|
| <i>Fig.I.1 : Utilisation de l'énergie solaire en Algérie.....</i> | <i>6</i> |
| <i>Fig.I.2 :Structure de la cellule photovoltaïque</i> | <i>9</i> |
| <i>Fig.I.3 :Cellule au silicium multicristallin.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Figure 1.4 : Caractéristiques électriques des cellules.....</i> | <i>13</i> |
| <i>Fig.1.5 : Carte solaire algérienne.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Fig. I.6 : Les types des suiveurs solaires.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Fig.I.7 : Des modèles des suiveurs passifs.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Fig. I.8 : Des modèles des suiveurs actif mono- axe.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Fig.I.9 : Des modèles des suiveurs actifs à double axe.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Fig.II.1. Panneau photovoltaïque avec suiveur à double axe.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Fig.II.2 : Description de l'angle Azimut.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Fig.II.3 : Description de l'angle de l'élévation.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Fig II.4 :Algorithme de la Méthode de poursuite astronomique.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Fig.II.5 :Mouvement de la terre autour du soleil.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Fig.II.6 : Position du soleil en coordonnées horizontales.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Fig.II.7 : Algorithme de la Méthode de poursuite active.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Fig.II.8 :Diagramme de comparaison entre la production avec un suiveur et la production avec un système fixe</i> | <i>28</i> |
| <i>Fig.III.1 :Prototype du projet de suiveur à double axe.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Fig.III.2 :La carte Ardouino uno utilisée pour ce projet.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Fig.III.3. Le servomoteur utilisé pour ce projet type SG90.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Fig III.4. Fiche de commande du servomoteur.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Fig.III.5. La conversion des signaux numériques en impulsions.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Fig.III.6: Capteur LDR.....</i> | <i>34</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Fig.III.7. Schéma du câblage du servomoteur avec la carte Arduino.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Fig.III.8. Schéma du câblage de la partie commande.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Fig III.9. Les étapes de programmation en Arduino.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Fig.III.10.Interface de programmation Arduino</i> | <i>38</i> |
| <i>Fig III. L'organigramme suivi pour la commande.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Fig .a.1 .Photo de système réalisé</i> | |
| <i>Fig a.2. le programme utilisé pour ce projet</i> | |

Liste des tableaux :

Tableau I.1. Potentiel solaire en Algérie.....16

Tableau III.1 caractéristiques des composants de la carte Arduino.....31

Tableau III.2 caractéristiques dimensionnelles et spécifiques du servomoteur SG90.....33

Liste des abréviations

P.V : photo voltaïque.

LDR : Light Dependent Resistor ou résistance dépendant de la lumière

CAN : convertisseur analogique numérique

La jonction P.N : c'est la jonction entre le pôle positif et le pôle négatif

MLI : Modulation en Largeurs d'Impulsions.

DIGITAL IN : entrée numérique

Mg : la moyenne des tensions en gauche

Md : la moyenne des tensions en droite

Mh : la moyenne des tensions en haut

Mb : la moyenne des tensions en bas

ε : la différence des tensions admissible

Introduction générale

Durant les dernières années ; tout les payés ont choisi de développer l'utilisation de l'énergie renouvelable à cause des prévisions de l'épuisement des énergies fossiles (non renouvelables tel que : le pétrole ; le gaz ; le charbon...) [10]

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous [10], demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente.

Pour que l'Algérie préserve ces biens énergétiques actuelles (pétrole et gaz), le payé a opté pour le développement de l'exploitation de l'énergie solaire [11].

C'est une énergie propre qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil, est disponible partout dans le monde, gratuit et inépuisable.

L'un des plus grands gisements solaires au monde, l'Algérie enregistre une durée d'insolation comprise entre 1.700 et 3.900 heures avec une énergie moyenne reçue au m² de 5 kWh ; Il est a remarquer qu'en Europe, l'irradiation solaire annuelle globale horizontale (IGH) varie de 0.8 kWh/m² à environ 1. 8 kWh/m² seulement [10].

Afin de concrétiser son programme d'exploitation de l'énergie solaire, l'Algérie a commencé par la construction des centrales photovoltaïques mixte, d'une capacité de 150 mégawatts [10].

Le programme national de développement des énergies renouvelables prévoit la production d'ici à 2030 de 22.000 MW d'électricité de source renouvelable, notamment solaire et éolienne, destinée au marché intérieur, en plus de 10.000 MW supplémentaires à exporter, rappelle-t-on. Ce qui correspond à 27% de la production globale d'électricité d'ici 2030 et le double de la capacité actuelle du parc national de production d'électricité [10].

L'un des solutions d'augmenter la capacité des ces centrales est d'améliorer le rendement des panneaux solaires par l'installation des suiveurs,

Notre projet a pour but d'étudier la conception et la réalisation d'un suiveur commandé par une carte Arduino, cette commande nous a permet d'avoir le maximum d'ensolienent du panneau solaire en suivant l'axe.

Pour atteindre notre objectif, on a opté pour structurer notre mémoire par trois chapitres peuvent être définis comme suivant :

Le premier chapitre : on va donner un état de l'art sur l'énergie renouvelable, son historique et les différents types des panneaux solaires.

Le deuxième chapitre : dans ce chapitre, nous s'essayons de montrer les techniques de poursuite existantes dans l'industrie actuelle.

Le troisième chapitre : on le consacrera pour définir les matériels utilisés pour cette réalisation aussi comment la commander.

Enfin, nous concluons ce manuscrit par une discussion des différents résultats obtenus.

Chapitre 1 : L'état de l'art

I.1. Introduction

Afin de savoir comment l'homme a commencé d'exploiter l'énergie solaire on a commencé dans ce chapitre 1 par les définitions de l'énergie renouvelable et spécialement l'énergie solaire son historique au monde et au pays jusqu'à l'utilisation actuelle.

I.2. Les énergies renouvelables

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

Les énergies renouvelables proviennent de deux grandes sources naturelles :

- le Soleil (à l'origine du cycle de l'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux)
- la Terre (qui dégage de la chaleur).

Surnommées « énergies propres » ou « énergies vertes », leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables.

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente.

C'est une énergie propre qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil, est disponible partout dans le monde, gratuite et inépuisable.

Le rayonnement lumineux qui arrive du Soleil peut fournir de l'énergie pour les besoins humains. En effet, la surface du globe reçoit annuellement de l'énergie solaire ayant une puissance allant de 85 à 290 W/m². Et cette énergie est infinie car elle est entretenue par les réactions nucléaires qui ont lieu dans le soleil. Bien que la ressource ait toujours existé, son utilisation est assez récente dans l'histoire de l'humanité [8].

I.3. Historique de l'énergie solaire :

On voit apparaître les premières réalisations technologiques solaires au 19^{ème} siècle mais c'est véritablement pendant la deuxième partie du 20^{ème} siècle que l'énergie solaire commence à apparaître comme une source d'énergie importante, particulièrement avec le développement du photovoltaïque. C'est dans le cadre de la course à l'espace entre Américains et Russes que la R&D dans cette énergie fait un bond. Puis peu à peu, à partir des années 70, l'énergie photovoltaïque prends place dans l'industrie terrestre. L'histoire de l'énergie solaire ne peut se comprendre sans tenir compte de celles des énergies concurrentes (principalement les combustibles fossiles) et des contraintes économiques auxquelles elle est soumise.

Dès 1840, le risque d'un épuisement des stocks de charbons fait débat. Pour certains, l'expansion massive de l'industrie du charbon couplé à la demande croissante en énergie et la généralisation du libre-échange met en périls les réservoirs de combustibles. Par ailleurs, l'économiste anglais Stanley Jevons met en avant le paradoxe que plus l'efficacité des technologies augmente, plus la consommation totale de carburant augmente également et donc conduit à un épuisement des ressources [8].

L'utilisation de l'énergie solaire prend aussi place dans les logiques impérialistes françaises dans le cadre de la colonisation en Algérie. Afin de renforcer cette colonisation, le gouvernement français tient à exploiter de nouveaux territoires (264 villages créés ou agrandis entre 1871 et 1880, 401000 hectares de terres à cultiver) et il doit répondre à la question de la production énergétique dans ces territoires qui manquent de combustibles fossiles et sont peu desservis par des routes ou des voies ferrées. L'utilisation de ressources renouvelables comme le soleil se présente donc comme une alternative et en 1877, Mouchot est financé de 10000 francs pour réaliser une mission scientifique en Algérie. Celui-ci avait notamment annoncé que si le climat de l'Europe n'était pas forcément le plus adéquat à une utilisation de l'énergie solaire, les régions aux climats intertropicales où les rayons du soleil sont plus présents et plus puissants, comme l'Algérie, seraient beaucoup plus intéressante pour installer des installations solaires. Mouchot améliore les rendements de ses machines à Alger lors d'une 2^{ème} mission en Algérie en 1879. Il est même financé de 5000 francs pour construire un réflecteur solaire pour représenter l'Algérie à l'exposition universelle de Paris de 1878. Sa machine est saluée par le public, le jury et par la presse [8].

Suite à ce succès, l'associé de Mouchot, Abel Pifre, multiplie les démonstrations et les déclarations où il met en avant les possibilités qu'apportent les machines de Mouchot ainsi que sa vision du futur où il voit le solaire prendre une place importante dans le système énergétique européen. Mais en dépit de l'enthousiasme du public, les machines solaires peinent à être efficaces dans la pratique. Leur coût trop élevé et leur rendement très faible combiné à l'apparition d'énergies combustibles peu coûteuses entraînent peu à peu la disqualification de la trajectoire énergétique solaire. L'utilisation de l'énergie solaire est alors considérée comme irréaliste et pénètre dans l'espace de la littérature utopiste [8].

I.3.1.Évolution de l'utilisation de l'énergie solaire :

Les panneaux photovoltaïques trouvent leur première application dans le cadre de la course à l'espace. L'armée américaine veut les utiliser dans le cadre d'un projet secret : les **satellites**. La Navy, qui s'est vu donné la responsabilité d'envoyer le premier satellite américain, équipe son satellite, le **Vanguard**, d'une batterie électrochimique et des **panneaux solaires**. Il est lancé le 17 mars 1958. Alors que la batterie s'épuise en 1 semaine environ, les cellules solaires continuent à produire de l'électricité pendant des semaines. Malgré ce succès, la **Nasa** refuse de voir le photovoltaïque comme une solution suffisamment efficace pour les satellites. Cependant, des cellules solaires encore plus efficaces sont réalisées et vers la fin des années 60, l'énergie solaire est considérée comme la principale source d'énergie pour les satellites. Dans le cadre de course à l'espace [8].

I.3.2. Énergie solaire en Algérie

Le 9 décembre 2011, la société algérienne de l'électricité et du gaz **Sonelgaz** et **Desertec IndustryInitiative** ont signé à Bruxelles un accord de coopération visant au renforcement des échanges d'expertise technique, à l'examen des voies et moyens pour l'accès aux marchés extérieurs et à la promotion commune du développement des énergies renouvelables en Algérie et à l'international.



Fig.I.1.utilisation de l'énergie solaire en Algérie[11].

Pour que l'Algérie préserve les réserves énergétiques actuelles (pétrole et gaz), le pays a opté pour le développement et l'exploitation de l'**énergie solaire**. Afin de concrétiser son programme d'exploitation de l'énergie solaire, l'Algérie a chargé la **Sonelgaz** de construire la **centrale électrique mixte de Hassi R'Mel**, mise en service en 2011 à Tilghemt dans la **wilaya de laghouat** dans le sud du pays, d'une capacité de 150 mégawatts (30 MW solaire thermodynamique + 120 MW gaz). C'est la société New Energy Algeria (NEA), qui est chargée du secteur des énergies nouvelles et renouvelables.

La première usine privée algérienne de fabrication de panneaux solaires est opérationnelle à partir du mois de mars 2012 avec un taux d'intégration nationale de 90 %.

I.3.3. Energie Solaire Photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron. Outre les avantages liés au faible coût de maintenance des systèmes photovoltaïques, cette énergie répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux [10].

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie non polluante. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture.

I.3.3.1. Premières utilisations sur terre

Pendant plusieurs années, le photovoltaïque reste cantonné au domaine de l'industrie spatiale en vue du coût extrêmement élevé des cellules solaire en silicium. Il est aussi utilisé par des agences gouvernementales qui ont beaucoup de moyens. Cependant à partir de 1973 et le **premier choc pétrolier**, la nécessité de trouver de nouvelles sources pour la production d'énergie relança l'intérêt pour cette technologie. C'est au début des années 70 que les **cellules photovoltaïques** sont pour la première fois produites à large échelle sur terre. En 1973, la Solar Power Corporation, compagnie fondée par le docteur Elliot Berman et financée par Exxon, commence à produire des cellules solaires ayant un coût de 20\$ par watt. La première industrie à s'intéresser au photovoltaïque est l'**industrie du pétrole**. Ceux-ci en ont besoin pour alimenter des lumières signalétiques sur les sites d'extraction mais également pour combattre la corrosion dans les tuyaux, ce qui se fait par l'utilisation de petites quantités d'électricité. L'utilisation du photovoltaïque prends également un sens économiquement pour les **garde-côtes**. En effet, l'utilisation de batteries non rechargeables pour alimenter les bouées les obligent à dépenser des milliers de dollars pour changer les batteries. Après des années de bataille avec ses supérieurs, le lieutenant Lloyd Lomer parvient en 1977 à obtenir du gouvernement un programme photovoltaïque pour équiper ces appareils. Le photovoltaïque prouve également son utilité dans les chemins de fer dans les années 70. En effet, les appareils permettant la sécurité sur les voies nécessitent un peu d'électricité et acheminer de l'électricité sur de longues distances coûte cher. C'est ainsi que plusieurs compagnies de chemins de fer se convertissent au photovoltaïque [8].

I.3.3.2. Le progrès des photovoltaïques jusqu'à nos jours

Dans les années 70 et 80, les programmes de recherches gouvernementaux en Amérique, en Europe et au Japon ont l'idée de construire des grandes centrales solaires. Mais un ingénieur Suisse, Markus Real, met en avant l'idée qu'il serait beaucoup plus économique que chaque particulier ait ses propres panneaux solaires. Il arrive à prouver son idée en faisant installer des panneaux solaires sur 333 toits à Zurich. Son opération est un succès et depuis plusieurs gouvernements financent des plans énergétiques pour inciter leurs citoyens à installer des panneaux solaires sur leur toit. On peut penser notamment au 1000-Dächer-Programm en Allemagne, lancé entre 1990 et 1995.

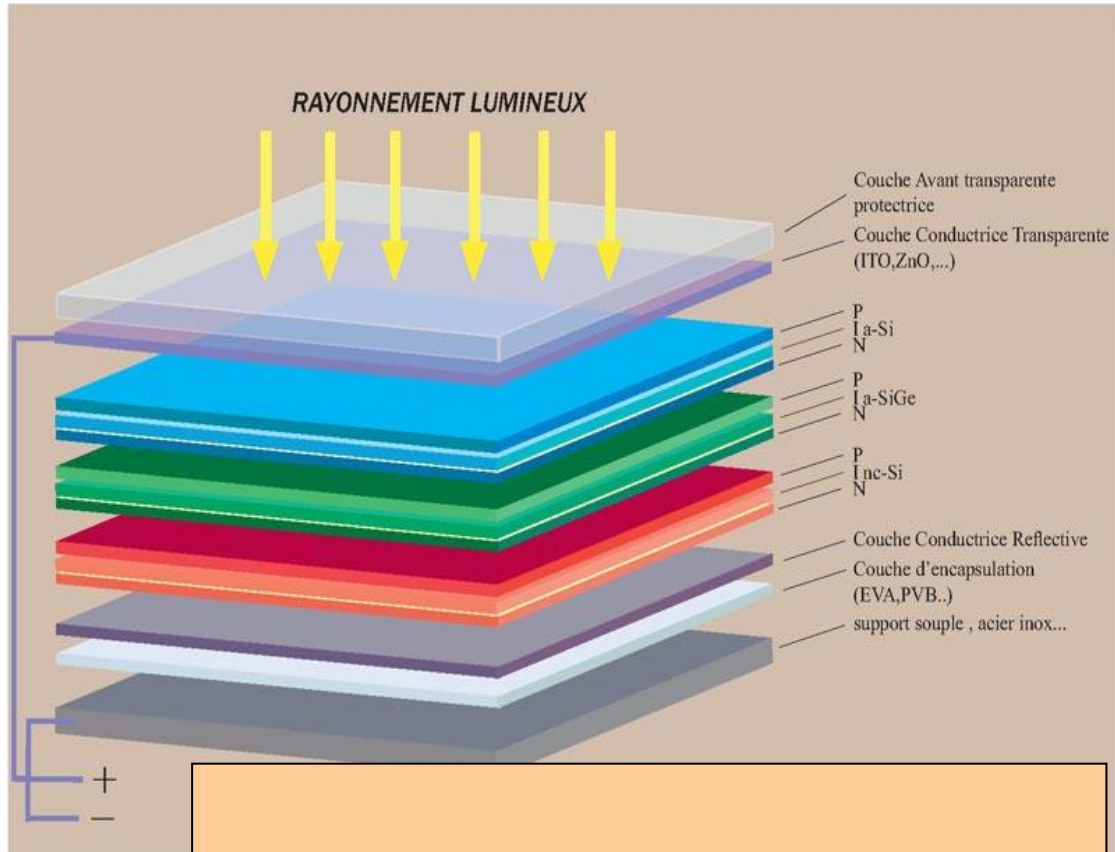
Au début du XXIème siècle, l'électricité produite à partir du photovoltaïque coûte 25\$ par kilowatt. Cela revient donc moins cher d'utiliser l'énergie solaire que d'installer des fils électriques sur des kilomètres pour alimenter des appareils nécessitant peu d'énergie. En revanche, cela reste beaucoup plus cher que l'électricité produite par les combustibles fossiles. La recherche s'axe donc sur la nécessité de produire des cellules solaires beaucoup moins cher pour que le solaire soit plus compétitif que les combustibles fossiles dont les ressources s'épuisent et dont la combustion entraîne le réchauffement global de la planète. En effet, l'apparition grandissante dans les consciences du danger que peut causer le **réchauffement climatique** place l'énergie solaire comme une alternative de plus en plus sérieuse aux énergies fossiles. En 2009, la production énergétique mondiale due au photovoltaïque est de 10.66 GW. Les cellules solaires majoritairement produites sont celles à base de silicium mono et polycristallins avec un coût de production de 1.5 \$ par watt mais des progrès sont également fait dans le domaine des cellules solaire à couche mince qui coûtent 0.76 \$ par watt et atteignent un rendement d'environ 20%. Aujourd'hui la R&D du photovoltaïque s'intéresse à la possibilité de produire des cellules solaires à partir de **matériaux organiques** qui auraient l'avantages d'être beaucoup moins cher et plus flexibles que les cellules à base de silicium. En 2013, on parvient à avoir des rendements de presque 9% avec des **cellules organiques** à base de polymère. Mais la difficulté de production de ces matériaux entraîne la recherche dans le solaire vers la possibilité de construire des cellules solaires à partir de molécules organiques simples. C'est ce que parviennent à faire les chercheurs en réalisant une cellule solaire à base d'une molécule dont la synthèse présente d'excellent rendements en masse et dont la conversion en électricité atteint les 4% [8].

I.4.La cellule photovoltaïque

I.4.1. La définition

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et autre du coeur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle -) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle +) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la

cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante.



- Fig.I.2. structure de la cellule photovoltaïque [12].

I.6.2. Le fonctionnement de la cellule

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est le suivant : les « **grains** » de lumière qu'on appelle **photons**, en pénétrant très légèrement dans le **silicium**, déplacent quelques électrons du métal.

Le métal semi-conducteur ne permettant le déplacement des électrons que dans un sens, les électrons déplacés par la lumière doivent passer par le circuit extérieur pour revenir à leur place, ce qui engendre un courant. Les cellules produisent de l'électricité chaque jour même si le ciel est nuageux : dans ce cas, le rendement est simplement moins élevé. **Les cellules sont assemblées sous forme de panneaux photovoltaïques**, panneaux qui sont encastrés sur ou dans la toiture des habitations. La fabrication complexe demande une excellente maîtrise technique pour assurer dans la durée le meilleur rendement. L'assemblage de ces cellules solaires reliées les unes aux autres forme un **module solaire** (panneau solaire ou panneau photovoltaïque).

a- L'absorption de la lumière dans le matériau

La lumière est composée de photons. Les photons sont des éléments capables de traverser la lumière et de la pénétrer. Plus généralement un rayon lumineux qui arrive sur un objet peut subir trois événements optiques:

-la réflexion: la lumière est renvoyée par la surface de l'objet

-la transmission: la lumière traverse l'objet

-l'absorption: la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est alors restituée sous une autre forme

b- Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, (de charge 1.6×10^{-19}) charges négatives élémentaires contenues dans la matière semi-conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau et un ensemble d'électrons gravitant autour.

Ce sont les électrons des couches électroniques périphériques qui vont absorber l'énergie des photons, ce qui les libère de l'attraction électrostatique (et gravitationnelle) du noyau de l'atome.

L'énergie d'un photon d'un certain rayonnement est donnée par une relation simple puisqu'elle est proportionnelle à la fréquence du rayonnement utilisée. La constante universelle qui lie ces deux grandeurs est " h ", la constante de Planck.

La constante de Planck a pour unité la fraction de l'énergie sur un temps, c'est-à-dire le Joule-seconde (J.s). Sa valeur, dans le système international d'unités, est :

$$h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.}$$

On a donc la formule: $E = h \cdot f$

L'effet photoélectrique est donc l'émission d'électrons par un métal quand il est exposé à des radiations lumineuses, on doit son explication à Einstein, lui-même inspiré par Maxwell. Les électrons libérés sont en suite susceptibles de produire un courant électrique.

c- La collecte des charges

c-1. Les semi conducteurs

- L'énergie lumineuse des rayons solaire est transformée en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électron et l'autre un déficit d'électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.
- La conductivité électrique désigne la capacité d'un corps à conduire un courant électrique lorsqu'une tension lui est appliquée.
 - On peut classer les matériaux selon trois types :
 - les isolants, comme le verre qui ne conduisent pas le courant
 - les conducteurs, principalement les métaux, qui conduisent le courant
 - les semi-conducteurs dont la conductance varie en fonction de facteurs
- Un matériau semi conducteur est un matériau à l'état solide ou liquide, qui conduit l'électricité à température ambiante, mais moins aisément qu'un métal conducteur.

Exemples des semi conducteurs:

- Silicium
- Germanium
- Arséniure de gallium

c.2. Le dopage et la jonction P.N.

Il peut être illustré par l'exemple suivant, qui présente le cas d'une cellule au silicium :

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence supérieure dans la classification périodique, c'est à dire qui possède plus d'électrons sur sa couche de valence que le silicium. Le silicium possède 4 électrons sur sa couche de valence : on peut donc utiliser des éléments de la colonne de l'oxygène, par exemple le Phosphore P. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons supérieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type N.

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence inférieure au silicium. Il peut s'agir de Bore B. Cette couche possédera donc en

moyenne une quantité d'électrons inférieure une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type P.

Lorsqu'on met ces deux semi-conducteurs en contact (de manière à ce qu'il puisse y avoir conduction), on crée une jonction PN, qui doit permettre le passage des électrons entre les deux plaques. Cependant, dans le cas d'une cellule photovoltaïque, le gap du semi-conducteur de type N est calculé de manière à ce que le courant ne puisse pas s'établir seul : il faut qu'il y ait un apport d'énergie, sous forme d'un photon de lumière, pour qu'un électron de la couche N soit arraché et vienne se placer dans la couche P, créant ainsi une modification de la répartition de la charge globale dans l'édifice.

Deux électrodes sont placées, l'une au niveau de la couche supérieure et l'autre au niveau de la couche inférieure : une différence de potentiel électronique et un courant électrique sont créés.



Fig.I.3. cellule au silicium multicristallin [12].

L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité.

Pour modifier les propriétés conductrices du silicium on y introduit des traces d'un autre élément appelé impureté: c'est le dopage.

Le silicium est traité d'une certaine manière, on dit dopé, cette technique permet au silicium de jouer le rôle d'une diode, c'est-à-dire que les électrons ne pourront "passer"

que dans un unique sens.

La technique de dopage d'un semi-conducteur consiste à lui ajouter des impuretés, c'est-à-dire des éléments ayant un nombre différent d'électrons de valence. Les électrons porteurs de charge, générés par la lumière du soleil, sont partiellement perdus dans le volume du silicium à cause de la présence d'impuretés résiduelles (atomes de fer, titane...). Les chercheurs développent donc des procédés permettant de piéger ces atomes dans des zones inactives.

Les atomes du matériau de dopage, ou dopant (donneurs ou accepteurs d'électrons), et ceux du silicium ont un nombre différent d'électrons périphériques.

Le dopage produit ainsi des particules électriques chargées positivement (type P) ou négativement (type N).

Or le déplacement d'électrons, créé par l'énergie des photons, est synonyme de production d'électricité. Une tension se crée alors en présence de lumière aux bornes de la cellule. Si l'on ferme le circuit à l'aide de n'importe quel dipôle telle une lampe, le courant circule dans le circuit. Il est important de noter que la tension est presque constante tandis que l'intensité varie proportionnellement à la quantité de lumière reçue.

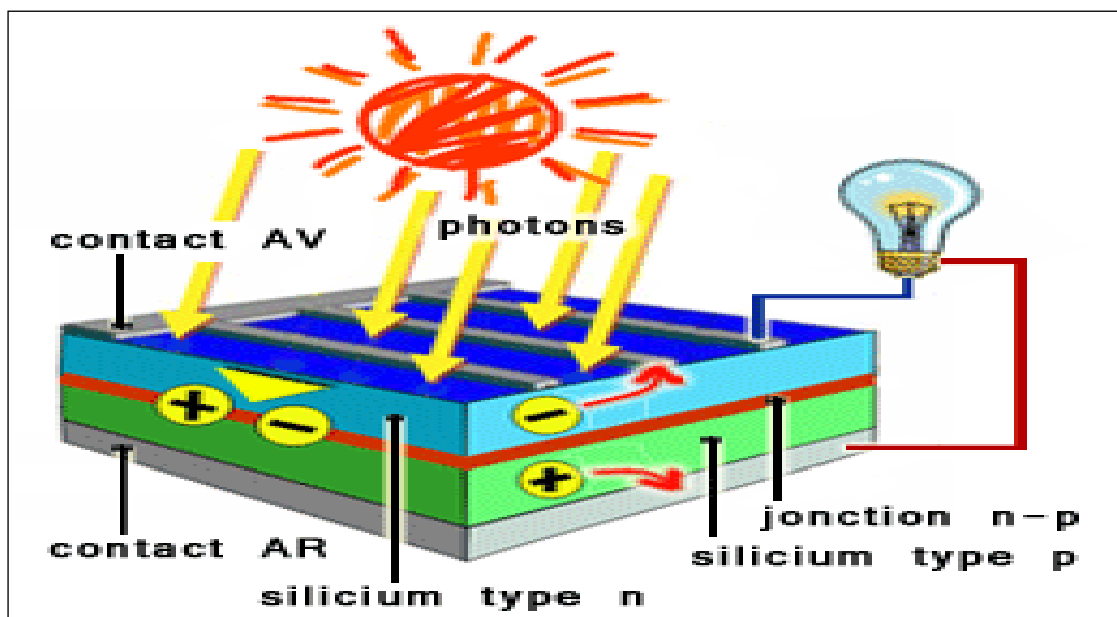


Figure 1.4. Caractéristiques électriques des cellules [12].

I.5. Rendement des panneaux solaires

Le taux de rendement photovoltaïque des panneaux solaires photovoltaïques indique le rapport entre la puissance produite et la puissance du rayonnement capté. Il est exprimé en pourcentage.

Le rendement des panneaux solaires photovoltaïques peut varier en fonction de technologies utilisées, mais il est généralement compris entre 6 à 20 %. Le rendement photovoltaïque d'une installation de panneaux solaires dépend de plusieurs facteurs tel que les suivant ::

I.5.1. Les types des cellules composants les panneaux solaires:

Le silicium utilisé en photovoltaïque peut se rencontrer sous trois formes:

- cellule en silicium poly-cristallin : il s'agit du matériau photovoltaïque le plus utilisé (à lui seul plus de 50% du marché mondial). Il offre un bon rendement (de 12% à 14 %) pour des coûts de fabrication maîtrisés.
- cellule en silicium mono cristallin: le rendement de ce matériau photovoltaïque (15 % à 17 %) est légèrement supérieur au silicium poly-cristallin, en revanche sa fabrication est plus délicate donc plus coûteuse.
- cellule en silicium amorphe: le rendement de ce matériau photovoltaïque est bien inférieur à ceux des silicium cristallin (6%) et son coût est proportionnellement inférieur.

Pour ces trois matériaux photovoltaïques, les coûts par unité puissance sont identiques mais les surfaces de capteur nécessaires pour atteindre cette unité de surface varient en fonction du rendement. Les matériaux en silicium cristallin (poly et mono) représentent 90% du marché mondial.

I.5.2. La puissance de l'installation photovoltaïque

Elle est calculée en kilowatt/crête (kWc), elle est égale au produit de la surface par le facteur de puissance.

Exemple : pour des panneaux solaires composé de cellule poly-cristallines et d'une surface de 15 m² : $15 \times 0,115 = 1,72 \text{ kWc}$

I.5.3. La surface des panneaux solaires photovoltaïques

La surface du panneau solaire doit être étudiée suivant la capacité demandée et la surface du champ utilisé.

I.5.4. L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires

La position du panneau doit être bien orientée vers le soleil.

I.5.5. La situation géographique ou la latitude

En fonction de la géo localisation, l'ensoleillement varie et par conséquent la production annuelle d'électricité varie également [12].

I.6. Gisement solaire

Pour toute application de l'énergie solaire, il est indispensable de connaître de façon détaillée les caractéristiques de l'ensoleillement et du rayonnement sur le site géographique choisi. Ces caractéristiques qui constituent le gisement solaire peuvent être déduites des mesures régulières effectuées pendant plusieurs années par une station météorologique locale. Dans le cas où il n'existe pas de telles stations on peut extrapoler les mesures de stations voisines en utilisant une méthode de calcul fondée sur des corrélations statistiques. Les difficultés majeures des mesures du rayonnement solaire proviennent à la fois des fluctuations climatiques et du mouvement apparent du soleil au lieu d'observation.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde.

La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et 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 $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kwh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud du pays [11].



Fig.1.5. Carte solaire algérienne [11].

Tableau I.1. Potentiel solaire en Algérie

| Régions | Région côtière | Hauts Plateaux | Sahara |
|--|----------------|----------------|--------|
| Superficie (%) | 4 | 10 | 86 |
| Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an) | 2650 | 3000 | 3500 |
| Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an) | 1700 | 1900 | 2650 |

D'après les statistiques, le gisement solaire en Algérie peut dépasser les 5 milliards de GWh [11].

I.7. Les différents systèmes 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 axe.

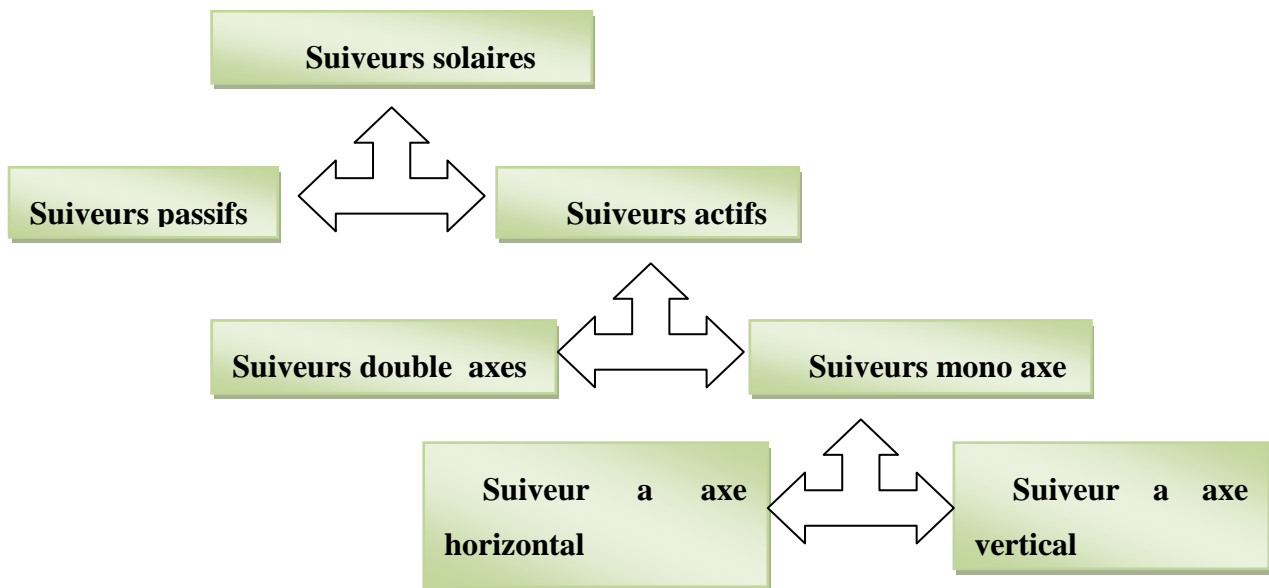


Fig. I.6. Les types des suiveurs solaires

I.7.1. Les suiveurs solaires passifs

Il est constitué dans son architecture d'un (ou plusieurs) tube rempli de fluides chimiques capable de se vaporiser à basse température. En effet, lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente la température d'un côté du panneau, le composé dans le tube se vaporise. La partie gazeuse du composé occupe un plus grand volume interne, et sa partie liquide est décalée vers le côté ombragé. Cette opération de transfert de masse ajuste l'équilibre du panneau PV en le faisant tourner vers la source des rayons solaires.

Ce type de suiveur ne consomme aucune énergie pour le repositionnement du panneau.[7]



Fig.I.7. des modèles des suiveurs passifs [7].

I.7.2. Les suiveurs solaires actifs

Ils utilisent le principe de la détection de lumière, suivant la trajectoire solaire en cherchant à optimiser au maximum l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface. Il existe deux types dans cette famille : [7]

I.7.2.1. Les suiveurs mono-axe

Ce type de suiveur permet une rotation selon un seul axe soit horizontal ou vertical



Fig. I.8 : des modèles des suiveurs actifs mono- axe.

I.7.2.2. Les suiveurs à double axe

Ce type de suiveur permet une rotation selon les deux axes horizontal et vertical



Fig.I.9 : des modèles des suiveurs actifs à double axe [7].

L'avantage de ces derniers par rapports aux suiveurs passifs c'est qu'ils représentent une meilleure précision de suivi et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les ajuster [7].

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a constaté l'importance d'exploiter l'énergie solaire fourni par le gisement le plus élevé au monde existant dans notre payé pour préserver les autres sources en utilisant les panneaux solaires.

Chapitre 2 : Techniques de poursuite des panneaux solaires

II.1. Introduction

Le chemin du soleil à travers le ciel change tout au long de la journée : le matin il est bas sur l'horizon de l'est ; à midi, il est haut dans le ciel ; et en coucher du soleil, il est bas encore, mais à l'horizon de l'ouest.

Un bon site pour tableau de suivi reçoit le soleil de l'aube au coucher du soleil. Cependant si l'on désire maximiser la puissance générée par un panneau PV et avoir un rendement optimal, il faut tenir compte de tous ces paramètres et contraintes liées à l'orientation du module ainsi que la position du soleil.

Ceci peut être assurée par un système de **poursuite solaire** (suiveur soleil ou encore dit **tracker** solaire (appellation courante)) permettant de suivre le soleil tout au long de la journée.



Fig.II.1. Panneau photovoltaïque avec suiveur à double axe [7].

Pour cela, la structure possède deux degrés de liberté : une rotation horizontale pour régler l'azimut et une rotation verticale pour l'inclinaison. Ce système permet ainsi, aux panneaux photovoltaïques de suivre continuellement et en temps réel la trajectoire du soleil

pour assurer une production électrique maximale, d'où la nécessité de définir avec exactitude les trajectoires empruntées par le soleil, de manière à définir la meilleure façon avec laquelle sera effectué le suivi automatique.

L'**Azimut**, d'une part, est l'angle mesuré par rapport au sud dans un plan horizontal.

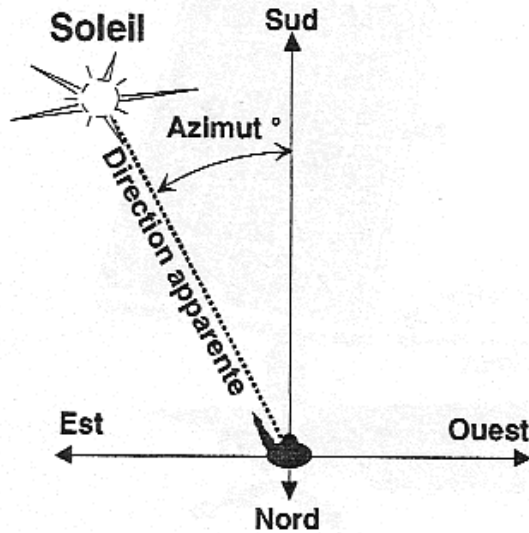


Fig II.2. Description de l'angle azimut

L'**Elevation**, d'autre part, est l'angle mesuré par rapport à l'horizontale dans un plan vertical.

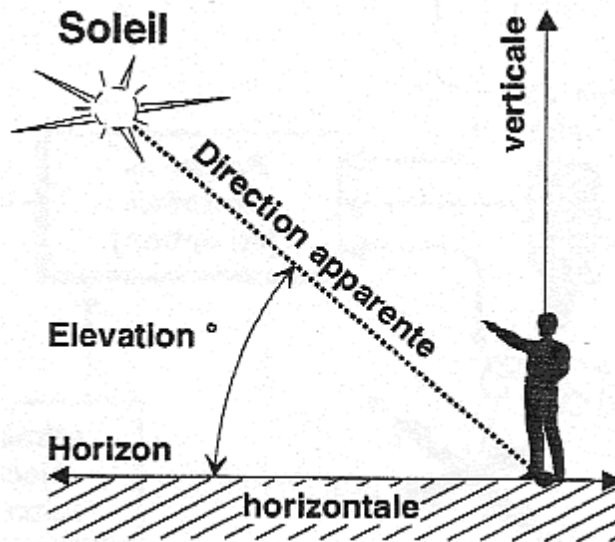


Fig II.3. Description de l'angle d'élévation

Il existe deux grandes techniques pour assurer le suivi et ce en tenant compte de la précision voulue.

II.2. Méthode astronomique

Cette méthode repose sur le calcul de la position du soleil en se basant sur les équations géométriques et astronomiques prédéfinies et qui nécessite une intervention manuelle pour modifier la latitude du site, la date du jour et l'heure. Cette technique est dite la méthode astronomique du fait que la position est directement fonction du parcours solaire préprogrammé.

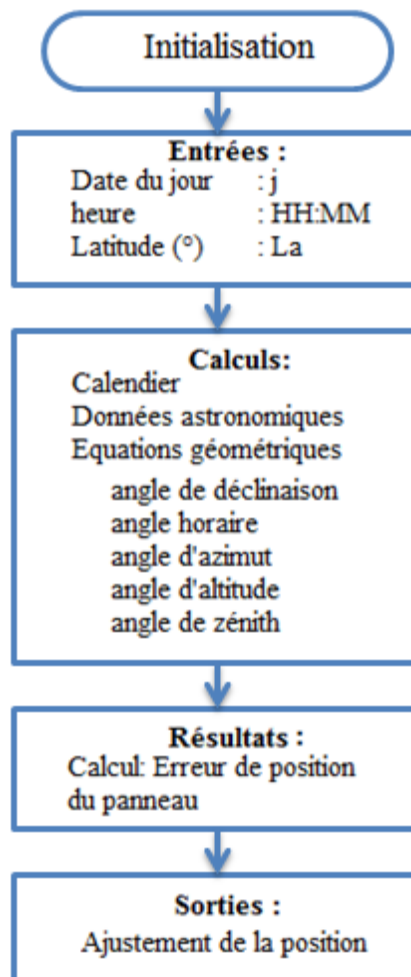


Fig.II.4 : Algorithme de la Méthode de poursuite astronomique

II.2.1. Mouvement de la terre

Les mouvements de la terre dans l'espace sont nombreux, mais nous considérons à notre échelle de temps que deux mouvements :

a)- révolution autour du soleil

La terre se déplace autour du soleil selon une trajectoire elliptique dont l'équation ; en coordonnées polaires est la suivante :

$$r = a(1 - e^2)/(1 + e \cdot \cos \theta) \quad (1)$$

$a = 1.50 \cdot 10^{11} m$ distance moyenne terre soleil.

$e = 0.017$ excentricité

Propriété :

- 1- la distance minimale terre soleil (la périhélie) est $1.47 \cdot 10^{11} m$.
- 2- la distance maximale terre soleil (l'aphélie) est $1.52 \cdot 10^{11} m$.
- 3- une révolution complète s'effectue en 365 jours 6 heures 9 minutes 10 secondes.
- 4- au cours d'une révolution la vitesse de translation varie, selon la deuxième loi de Kepler, autour d'une valeur moyenne de $3 \cdot 10^4 ms^{-1}$. [5]

b)- rotation sur elle-même :

Cette rotation se fait autour de l'axe des pôles dans le même sens que la révolution annuelle, s'effectue en 23 heures 56 minutes 4 secondes $91/100$. L'axe des pôles a une inclinaison de 23.45 degrés par rapport à la normale à l'écliptique.

c)- Conséquences :

- 1- le mouvement de la terre sur elle-même produit l'alternance du jour et de la nuit.
- 2- la révolution autour du soleil associée à l'inclinaison fait varier les durées relatives du jour et de la nuit. L'alternance des saisons est une conséquence du mouvement de la terre autour du soleil (**fig.II.5**).

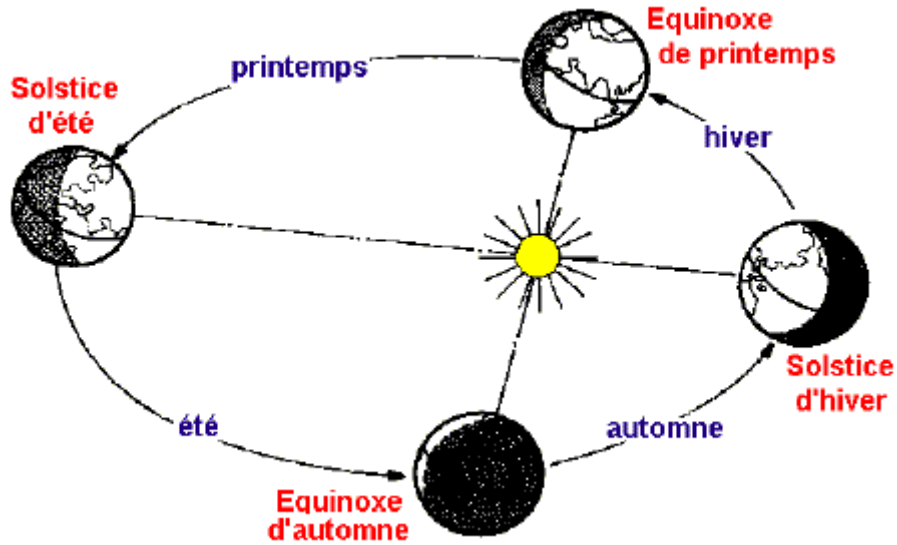


Fig.II.5. mouvement de la terre autour du soleil [5].

II.2.2-Position du soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents:

II.2.2.1. les coordonnées équatoriales

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

- a- la déclinaison du soleil δ** : l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial :

$$\delta = \arcsin(0.369 \sin[\frac{360}{365}(N - 82) + 2 \sin \frac{360}{365}(N - 2)]) \quad (2)$$

N est le numéro du jour de l'année (varie de 1 jusqu'à 360)

- b- l'angle horaire du soleil H** : c'est l'angle que fait les projections de la directions du soleil avec la direction du méridien du lieu :

$$H = 15(TSV - 12) \quad (3)$$

$$\text{avec } \begin{cases} TSV = TL - DE + \left(\frac{E_t + 4.\lambda}{60}\right) \\ E_t = 9.87 \sin 2N' - 7.35 \cos N' - 1.5N' \\ N' = \frac{360}{365}(N - 81) \end{cases} \quad (4)$$

DE : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égale à +1 pour l'Algérie).[5]

TSV : temps solaire vrai

TL : temps légal (donné par une montre)

E_t : correction de l'équation du temps.

λ : longitude du lieu.

II.2.2.2.les coordonnées horizontales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan horizontal du lieu de latitude φ par deux angles h et a .

a- la hauteur du soleil h

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal (figure **fig.II.6**):

$$\sin(h) = \cos \delta \cos \varphi \cos H + \sin \varphi \sin \delta \quad (5)$$

b- l'azimut du soleil a

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud (figure **fig.II.6**) :

$$\sin(a) = \cos \delta \sin H / \cos(h) \quad (6)$$

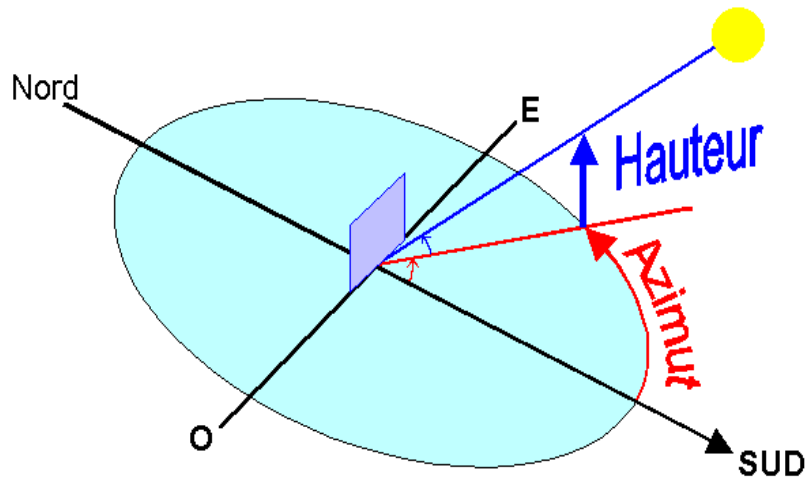


Fig.II.6. position du soleil en coordonnées horizontales

II.2.3. Orientation d'un plan

Un plan quelconque est défini par deux angles (α, γ) :

γ : la hauteur du plan, c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal.

α : azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

L'inclinaison β du plan par rapport au plan horizontal est donnée par : $\beta = 90 - \gamma$.

II.2.3.1 Angle d'incidence sur un plan

L'angle d'incidence i est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan. Cet angle est déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales : [5]

$$\cos(i) = \sin(\alpha - a) \cdot \cos \gamma \cdot \cos(h) + \sin \gamma \cdot \sin(h) \quad (7)$$

En coordonnées horaires :

$$\cos(i) = \sin(\alpha) \cdot \cos \gamma \cdot \sin(H) \cdot \cos \delta + \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \cdot [\cos(H) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi)] + \sin(\gamma) \cdot [\cos(H) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi)] \quad (8)$$

II.3. Méthode automatique

Cette méthode est dite active, permanente ou asservie vu que les algorithmes adoptés sont basés sur des capteurs de lumière, photorésistances ou cellules PV pour déterminer la position du soleil à tout moment, permettant ainsi un suivi instantané et notamment une orientation optimale du panneau.

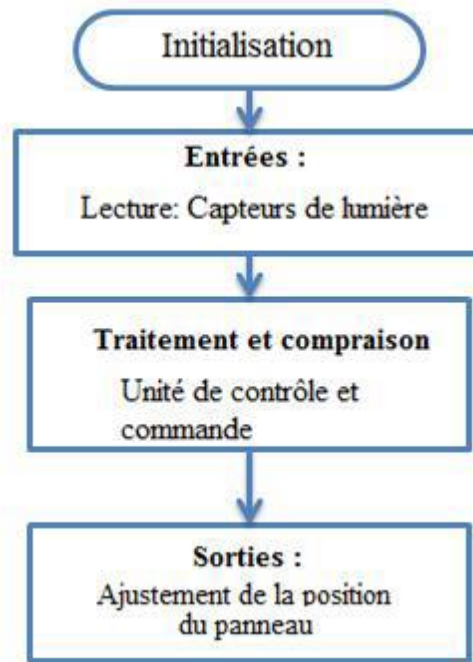


Figure II.7: Algorithme de la Méthode de poursuite automatique

Dans l'industrie actuelle ; Il existe deux types de suiveurs automatiques :

II.3.1. Les suiveurs mono-axe

Ils suivent généralement le soleil d'est en ouest avec un angle d'inclinaison déterminé comparable aux installations fixes.

II.3.2. Les suiveurs à deux axes

Ils suivent également le soleil d'est en ouest et ajuster l'inclinaison du tableau pour tenir compte de la modification de l'altitude du soleil C'est vers cette dernière que va s'orienter notre travail, en réalisant un système de poursuite automatique.

II.3.3. Intérêt des panneaux solaire photovoltaïques mobiles par rapport aux panneaux fixes

Au cours de la journée, le soleil se déplace continuellement, alors qu'un générateur Photovoltaïque est fixe dans sa position, perdant ainsi une considérable quantité d'énergie, qui pourrait être disponible.

Dans une installation fixe qui, pour en optimiser le rendement est exposé au Sud, l'énergie rendue par les modules PV est maximale seulement à midi comme indiqué sur la (figure II.4). Pour cela si les modules PV sont toujours orientés vers le soleil, c'est comme s'il y avait constamment la condition correspondante à midi, la puissance générée est toujours celle maximale.

Les modules photovoltaïques placés sur des suiveurs de soleil ont un rendement énergétique qui augmente de manière appréciable par rapport aux installations fixes.

Les suiveurs de soleil proposés dans notre gamme offrent un suivi de la trajectoire du soleil suivant un axe motorisé et un axe saisonnier manuel. Ils engendrent ainsi une augmentation de la production moyenne d'électricité de l'ordre de 50%.

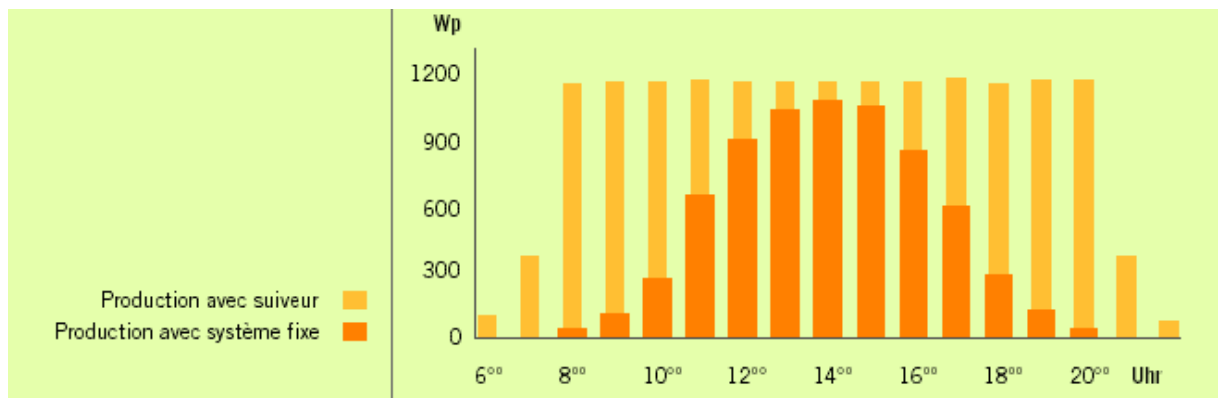


Fig.II.8: diagramme de comparaison entre la production avec un suiveur et celle avec un système fixe[7].

II.4. Conclusion

Après la présentation des deux techniques de poursuite qui existent ; on a constaté que la technique de suiveur à deux axes est la plus efficace pour avoir le maximum du rendement du panneau solaire.

Chapitre 3 : Réalisation d'un suiveur a double axe commandé par la carte Arduino

III.1. introduction

La réalisation d'un suiveur a double axes commandé par une carte Arduino nous impose de commencer en premier lieu par la création de la partie mécanique puis réalisation du câblage ensuite la programmation pour la partie commande .

III.2. Description du prototype (partie mécanique)

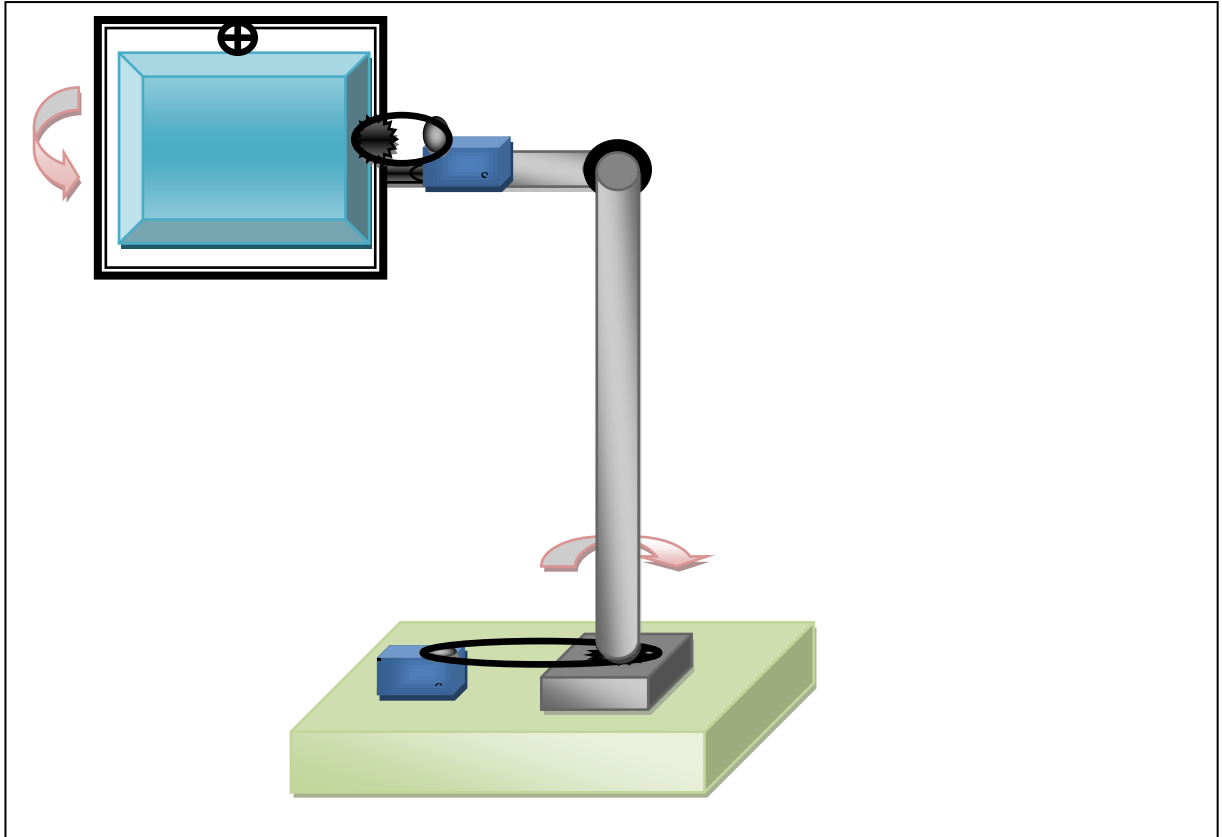
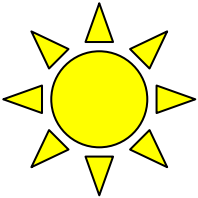


Fig.III.1. prototype du projet de suiveur à double axe

Nous avons commencé par l'installation d'un mécanisme à deux servomoteurs reliés à deux tiges permettant de faire pivoter la plaquette et à placer celle-ci en face de la source lumineuse (modifiant l'azimut et l'élévation).

Ce mécanisme est fixé sur une plate forme adéquate.

III.3.Description de la partie électronique :

III.3.1.Circuit de la commande :

Notre projet consiste à commander les deux **servomoteurs** à rotation continue par une carte **Arduino uno**.

Le matériel nécessaire est :

- 1 plaque d'expérimentation,
- 1 module Arduino,
- 02 servomoteurs « classiques » 9 g,
- 03LDRs,
- 03 résistances 1kOhm.
- Des câbles de liaison

III.3.1.1. Description de la carte Arduino le cœur de la partie commande

III.3.1.1.1.Définition

La carte **Arduino** gère la fonction principale de cette partie commande appelée « CAN » (« Convertisseur Analogique Numérique » sur 10 bits dans ce projet). Cette fonction a pour but de convertir les signaux analogiques en entrée (issus des photos résistances) en signaux numériques.

C'est cette carte qui permet de faire la liaison entre les signaux des LDR et servomoteurs.

Cette carte a pour cœur un microcontrôleur, ici un Atmega 328, qui lui intègre le programme qui gère la fonction CAN. Mais la fonction CAN n'est pas spécifique au microcontrôleur puisqu' elle est issue de la programmation que nous pouvons télécharger dans ce dernier. En plus de gérer cette fonction il envoie et reçoit des signaux numériques ou analogiques dans plusieurs entrées et sorties (« ANALOG IN »

et « DIGITAL »). En conclusion cette carte électronique peut gérer beaucoup de fonctions (contrôle de LEDs, Digits, enceintes, écran, moteur, réseaux, ...).

Cette carte dispose :

- de 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)),
- de 6 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
- d'un quartz 16Mhz,
- d'une connexion USB,
- d'un connecteur d'alimentation jack,
- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),
- et d'un bouton de réinitialisation (reset).

III.3.1.1.2. Caractéristiques de la carte Arduino

Les caractéristiques des composants de la carte Arduino sont citées dans le tableau suivant [1] :

Tableau III.1 caractéristiques des composants de la carte Arduino

| | |
|--|---|
| Microcontrôleur | ATmega328 |
| Tension de fonctionnement | 5V |
| Tension d'alimentation (recommandée) | 7-12V |
| Tension d'alimentation (limites) | 6-20V |
| Broches E/S numériques | 14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM) |
| Broches d'entrées analogiques | 6 (utilisables en broches E/S numériques) |
| Intensité maxi disponible par broche E/S (5V) | 40 mA (ATTENTION : 200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S) |
| Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V | 50 mA |
| Intensité maxi disponible pour la sortie 5V | Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mA max si port USB utilisé seul |
| Mémoire Programme Flash | 32 KB (ATmega328) dont 0.5 KB sont utilisés par le bootloader (programme de base pré-programmé conçu pour établir la communication entre l'Atmega et le logiciel Arduino) |
| Mémoire SRAM (mémoire volatile) | 2 KB (ATmega328) |
| Mémoire EEPROM (mémoire non volatile) | 1 KB (ATmega328) |
| Vitesse d'horloge | 16 MHz |

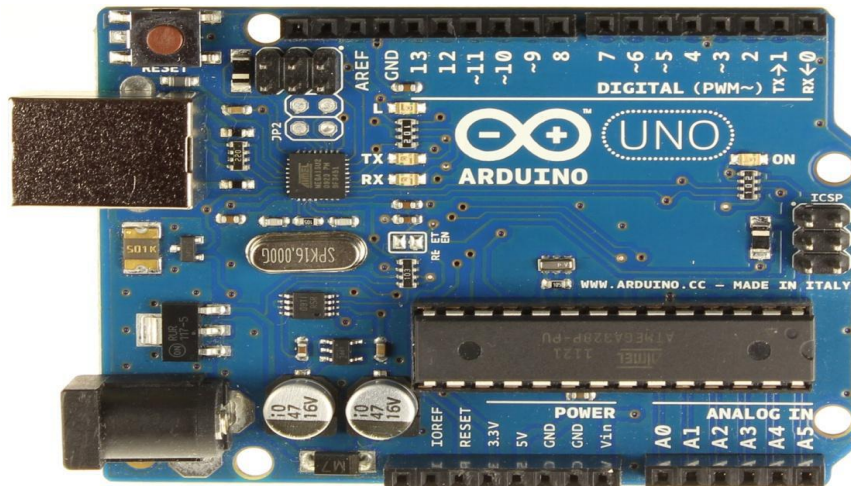


Fig.III.2.Photo de la carte Arduino uno utilisée pour ce projet [4].

III.3.1.2. Les servos-moteurs

III.3.1.2.1. Définition

Les servomoteurs sont des moteurs capables de maintenir une position à un effort statique et dont la position est vérifié en continue (grâce au potentiomètre) et corrigé en fonction de la mesure (ici la mesure fait référence au signal entrant dans le servo. qui dépend de la tension en sortie des LDRs).

C'est un système motorisé capable d'atteindre des positions prédéterminées puis de les maintenir.[9]

III.3.1.2.2. Fonctionnement du servomoteur

Le servomoteur intègre un système électronique qui convertie un signal numérique en un angle qui sera reproduit sur le palonnier (voir Figure III.3) grâce au moteur électrique à courant continu présent dans le servomoteur.



Fig.III.3.le servomoteur utilisé pour ce projet typeSG90 [9].

Ce signal numérique est une dérivée de la technique PWM ou MLI (Modulation en Largeurs d' Impulsions). Le servo. est alimenté avec 3 fils: une entrée 5V (ou plus), une masse et une entrée d'impulsion (la commande du servo.). C'est dans cette entrée d'impulsion qu'est envoyé le signal numérique modulé en impulsions.[4]



Fig III.4. Fiche de commande du servomoteur [9].

Ces impulsions sont des créneaux à rapport cyclique variable (5 à 10% pour le bon fonctionnement du servomoteur), et la période de ce créneau est fixée à 20 ms:

Ce signal numérique va alors contrôler le servomoteur en position. Et il est le fruit de la conversion du signal analogique en sortie de l'Analog. de la résistance variable de la LDR. En conclusion c'est le contrôle du servo. via la LDR.

Le rapport cyclique de 5% donne un état haut de 1ms ce qui correspond à un angle de 0° (A sur le graph), le rapport de 10% donne un état haut de 2ms ce qui correspond à un angle de 180° (B sur le graph). La valeur de l'angle est linéaire (1,5 ms pour un angle de 90°). Les impulsions doivent être constante (C sur le graph) sinon le servomoteur devient instable (période fixe).

Tableau III.2 caractéristiques dimensionnelles et spécifiques du servomoteur SG90.[4]

| Dimensions & Specifications |
|-----------------------------|
| A (mm) : 32 |
| B (mm) : 23 |
| C (mm) : 28.5 |
| D (mm) : 12 |
| E (mm) : 32 |
| F (mm) : 19.5 |
| Speed (sec) : 0.1 |
| Torque (kg-cm) : 2.5 |
| Weight (g) : 14.7 |
| Voltage : 4.8 - 6 |

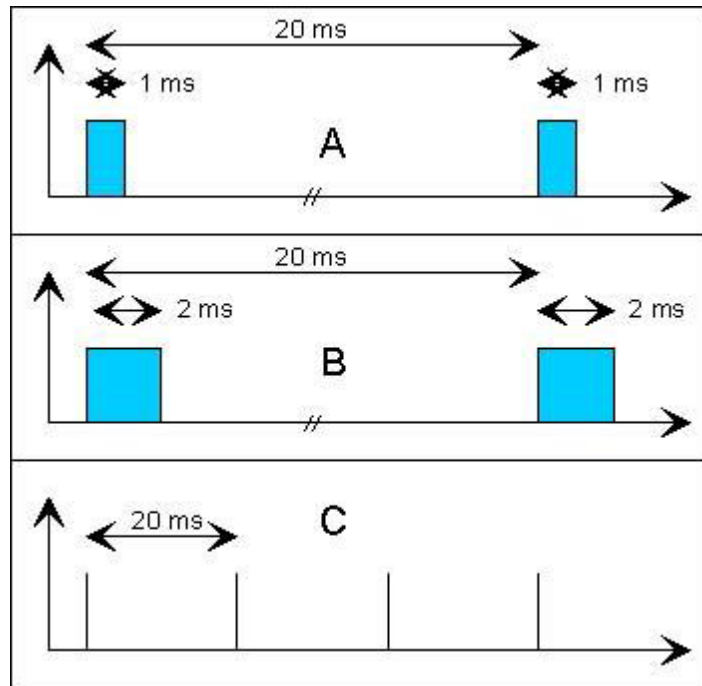


Fig.III.5.la conversion des signaux numériques en impulsions

III.3.1.3. Capteur LDR :

III.3.1.3.1. Définition :

Une photo résistance est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle il est exposé. On la désigne aussi par **LDR** (**L**ight **D**ependent **R**esistor ou résistance dépendant de la lumière).

La principale utilisation de la photo résistance est la mesure de l'intensité lumineuse (appareil photo, systèmes de détection, de comptage et d'alarme...). Elle est fortement concurrencée par la photodiode, on l'a choisi dans notre projet grâce à son temps de réponse qui est beaucoup plus court. Les matériaux utilisés sont généralement du sulfure ou du sélénure de cadmium qui se comporte comme des semi-conducteurs.



Fig.III.6: Capteur LDR [7].

III.3.1.3.2. Principe de fonctionnement :

Un cristal de semi-conducteur à température basse contient peu d'électrons libres. La conductivité du cristal est très faible, proche de celle d'un isolant. Lorsque la température du cristal augmente, de plus en plus d'électrons qui étaient immobilisés dans les liaisons covalentes s'échappent et peuvent participer à la conduction.

A température constante si le même cristal semi-conducteur est soumis à une radiation lumineuse, l'énergie apportée par les photons peut suffire à libérer certains électrons utilisés dans les liaisons covalentes entre atomes du cristal. Plus le flux lumineux sera intense, plus le nombre d'électrons disponibles pour assurer la conduction sera grand, ainsi la résistance de la LDR est inversement proportionnelle à la lumière reçue. La sensibilité dépend de la fréquence de la radiation lumineuse.

Ainsi, nous décidons d'effectuer une petite installation à l'aide de LEDs lumineuses, l'une s'allumant lorsque la tension en sortie est positive et l'autre lorsque la tension est négative.

Ces LEDs fonctionnant avec un courant de 20mA, une tension de 2V et étant alimentées par 15V, un calcul élémentaire nous permet de conclure qu'il nous faudrait une résistance de 650Ω pour que celles-ci émettent une lumière bien visible. N'ayant pas à disposition de cette valeur de résistance, nous en avons prises de $1k\Omega$. Ce montage fonctionne bien : lorsque la lumière est éteinte, toutes les LEDs sont allumées car elles reçoivent la même intensité lumineuse et lorsque l'on éclaire une photodiode en particulier, c'est la LED qui y est associée qui s'allume.

III.3.1.4. Le montage du matériel utilisé :

Le module Arduino peut être alimenté par son câble USB et alimenter un servomoteur sans dommage. Au-delà, il est prudent de calculer la consommation totale car le port USB ne pourra délivrer que 500mA au maximum. Une alimentation séparée et correctement dimensionnée est conseillée.

Pour câbler le servomoteur avec l'Arduino , suivant les étapes ci-après :

- 1.Connecter le fil rouge du servo au +5V de l'Arduino et le fil noir sur la masse GND
2. Connecter le fil jaune du servo sur le PIN 9

3. Connecter un fil du bouton poussoir sur le PIN 8 et l'autre sur GND (pour notre cas on utilise les LDRs)

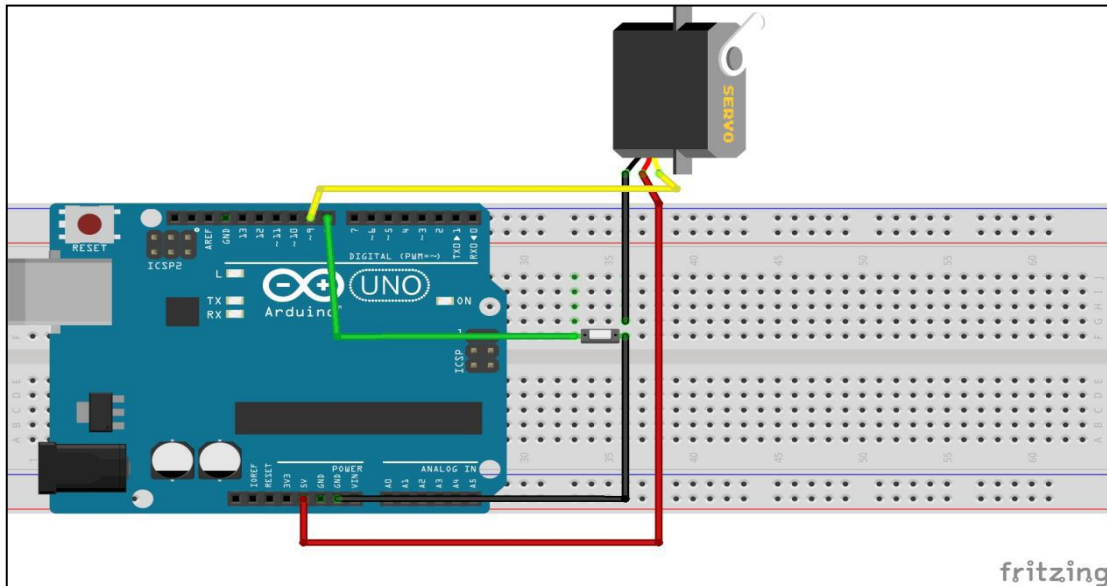


Fig.III.7. schéma de câblage du servomoteur avec la carte Arduino[4].

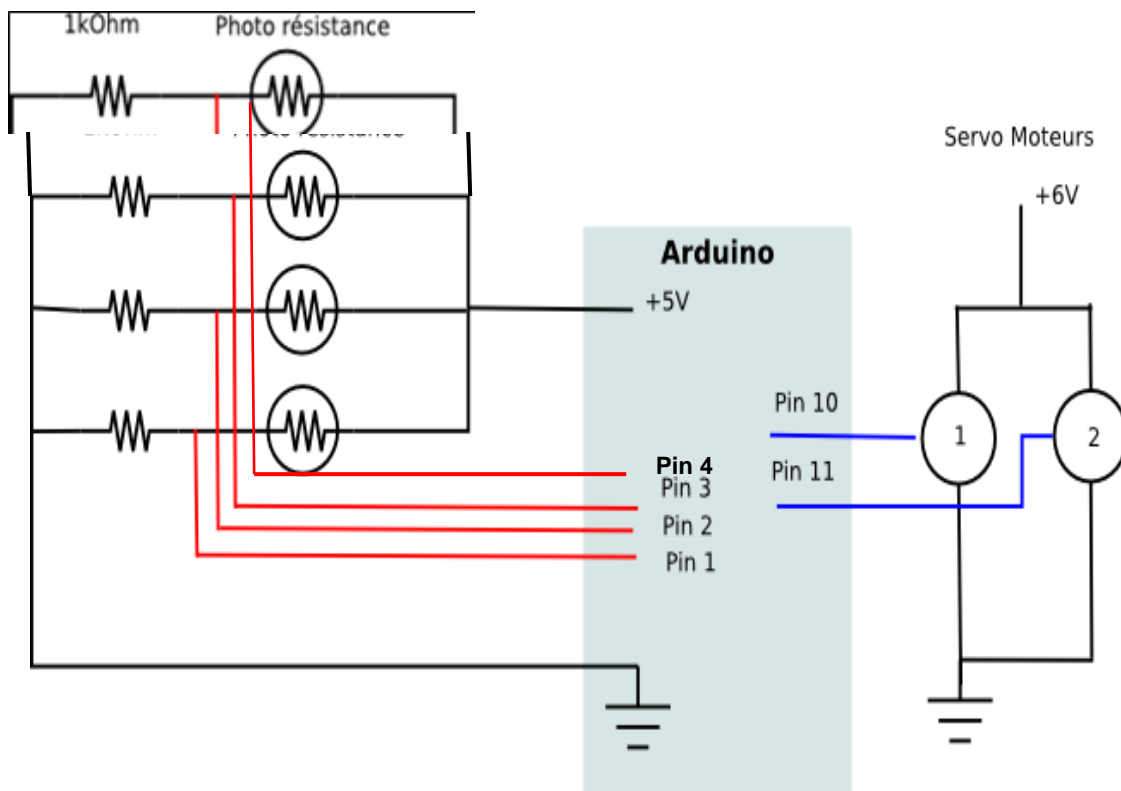


Fig.III.8. schéma de câblage de la partie commande

III.3.2. Description de la partie programmation

La programmation est un code qui va dicter des ordres au microcontrôleur, on la télécharge dans ce dernier pour qu'il puisse suivre les consignes dictées par le programme. Pour ce faire on utilise un logiciel nommé Arduino qui peut vérifier et compiler plusieurs programmes, l'avantage est de pouvoir vérifier le programme édité avant de le compiler vers le microcontrôleur.

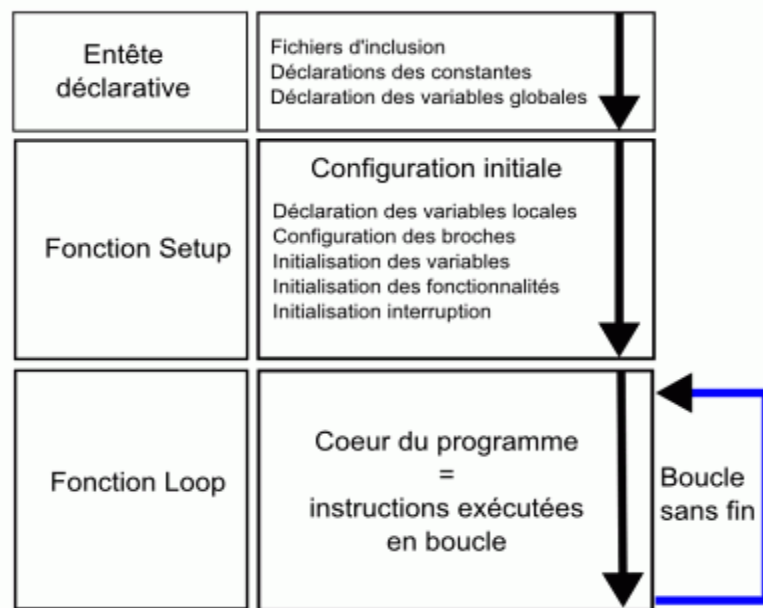


Fig III.9. Les étapes de programmation en Arduino

III.3.2.1. L'interface du programme utilisé :

Ce programme est codé en langage C, c'est un langage de programmation impératif pour la carte. Son avantage est qu'il intègre des fonctions préinstallées dans une seule ligne de code grâce à des bibliothèques. Dans ce programme nous n'utilisons que la bibliothèque SERVO qui regroupe un grand nombre de sous-fonctions en une seule ligne de code.

Le programme final utilisé pour cette commande sur l'interface Arduino est montré par la figure ci-après :

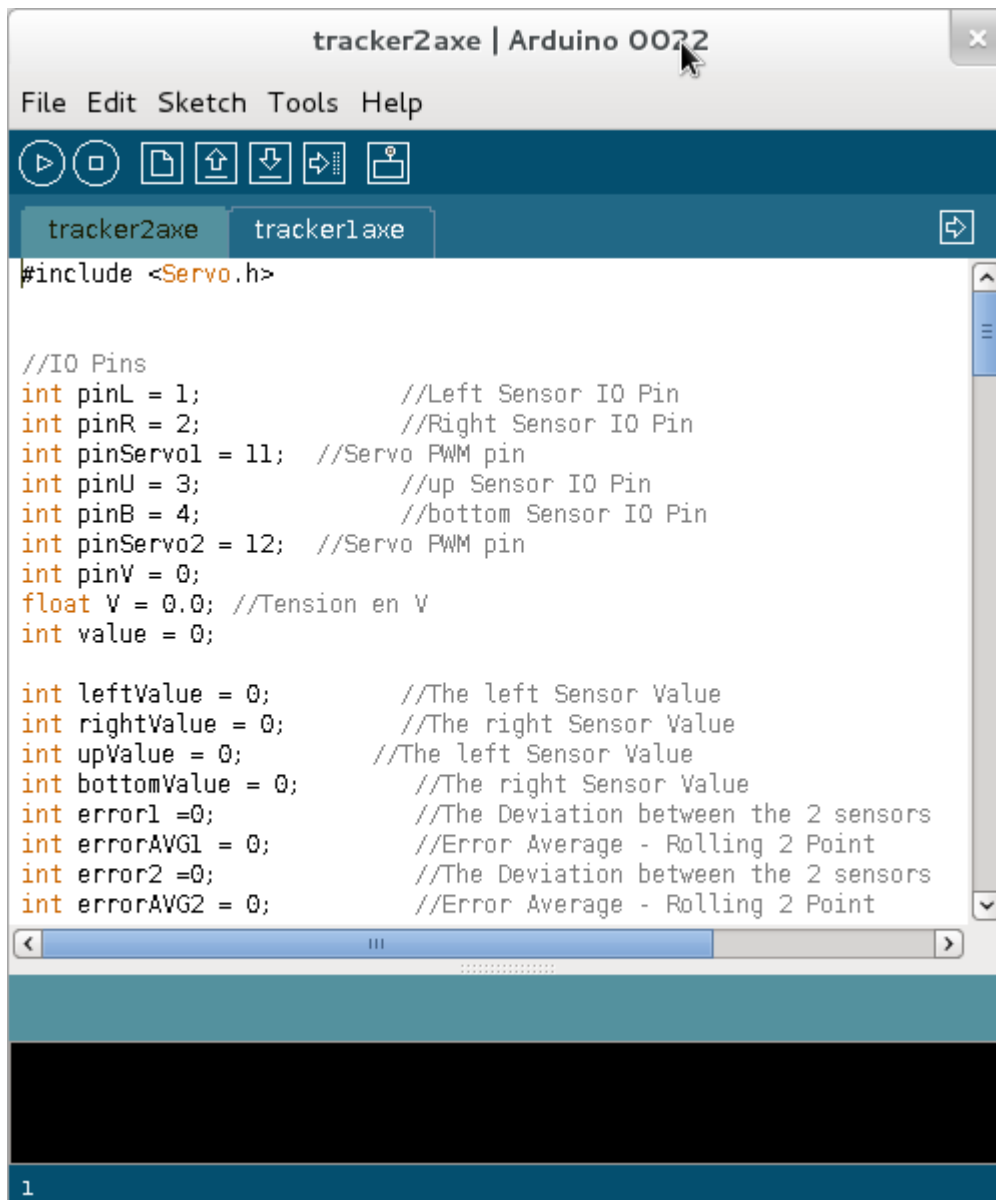


Fig III.10.Photo de l'interface de programmation en Arduino

III.3.2.2. l'Organigramme utilisé pour la programmation

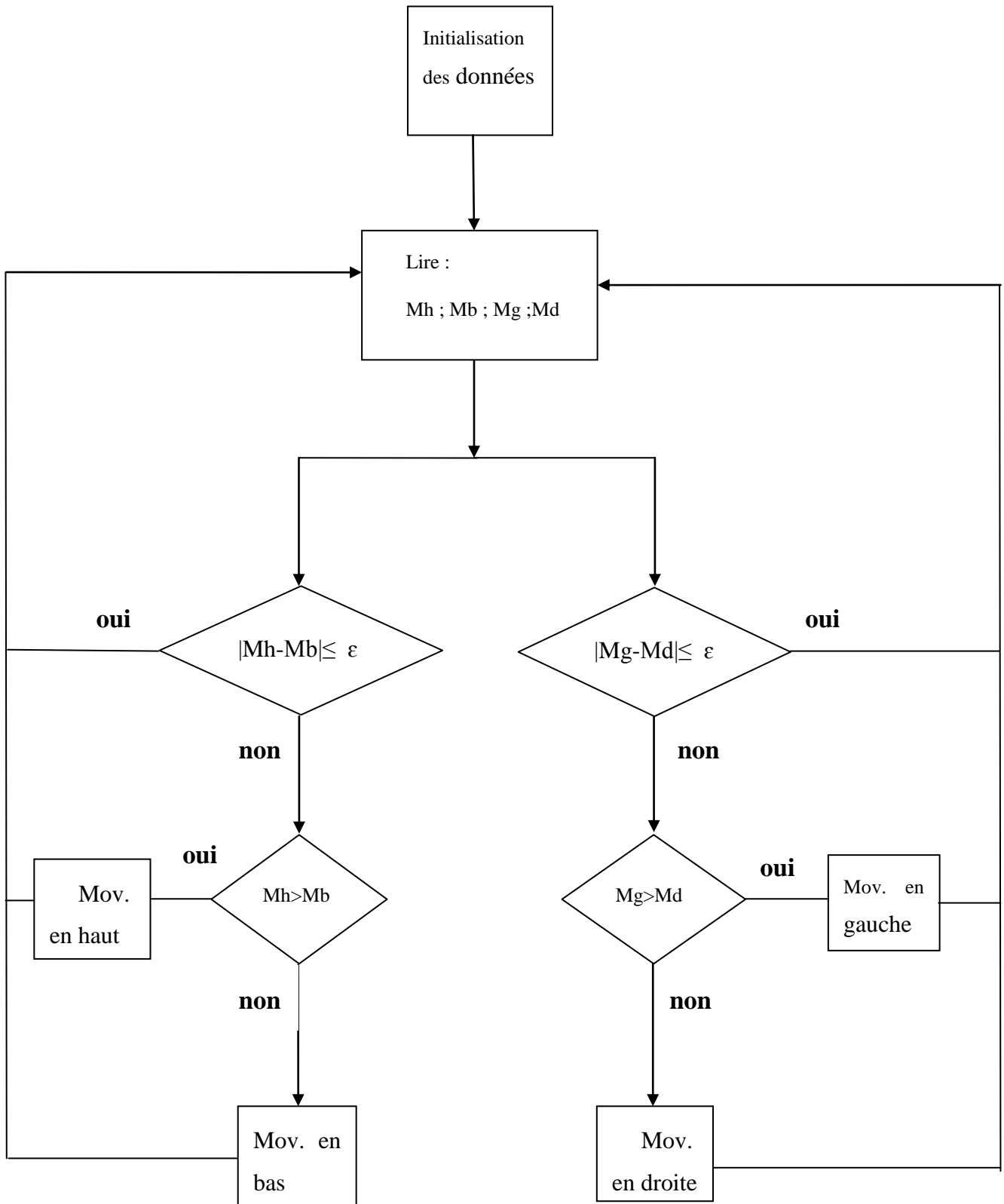
Pour construire l'organigramme du commande d'un suiveur adouble axe on a passé par les étapes suivantes :

Etape 1 : l'initialisation des données

Etape 2 : la lecture des paramètres donnés par les signaux des LDR

Etape 3 ; la comparaison des moyennes pour les deux axes

Etape 4 : rattrapage de la différence entre les moyennes par le mouvement de mécanisme.



- Fig III.11. L'organigramme principal suivi pour la commande

III.4. Test et problèmes rencontrés

Après le couplage de la partie mécanique et la partie de commande et la vérification du mécanisme commandé, on a testé notre réalisation en utilisant une lampe comme source de lumière.

L'exécution du programme sur l'interface de l'Arduino a permis à cette dernière de donner l'ordre aux servomoteurs pour fonctionner suivant les impulsions fournies d'après les LDRs.

En changeant la position la source de la lumière, on remarque que la plaque du panneau solaire suit impérativement cette lumière c'est à dire que le système fonctionne correctement..

Durant notre réalisation de ce projet, on a rencontré plusieurs difficultés tel que :

- Le choix de l'emplacement des LDRs est très sensible.
- L'imprécision du choix de matière : des supports et d'engrenage en fonction de la capacité des servomoteurs
- L'importance de la séparation des LDRs par des parois pour une sensibilité de détection de la lumière

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a démontré comment choisir le matériel nécessaire pour réaliser ce projet avec les définitions de tous les composants ainsi que ces caractéristiques.

Aussi, on a établi l'organigramme utilisé pour la programmation et le programme.

En fin, les tests nous ont montré la capacité de commander ce prototype.

Conclusion générale

Notre travail présenté dans ce projet a porté sur la conception et la réalisation d'un système de poursuite de soleil à l'aide des composants électroniques programmable,

Le but primordial de cette thèse réside dans la mise en œuvre d'une solution technique permettant de transformer un panneau photovoltaïque fixé en un panneau mobile afin d'obtenir le meilleur rendement.

Deux méthodes ont été présentées dans ce travail l'une est basée sur le gisement solaire et la position du soleil par rapport à la terre la quelle se limite sur des calculs mathématiques préalables qui loupe parfois les coordonnées réels, la deuxième ou la technologie électronique assume la bonne détection de la position avec une sensibilité tors élevé.

Après avoir confirmé la fiabilité de notre système de poursuite solaire aux positions recherchées d'inclinaison et de rotation à l'aide de deux servomoteurs, commande électronique et structure de réalisation.

La programmation et la commande via la carte ARDUINO nous a donner des résultats très satisfaisantes aux conditions du fonctionnement convenable du système et l'objectif est atteint.

Le système réalisé est capable de suivre la position du soleil à une exactitude très agréable.

En fin ; ce projet nous a donné vraiment une très bonne connaissance sur l'énergie renouvelable et l'énergie solaire ; aussi ; nous avons eu la chance de savoir programmer par l'interface Arduino.

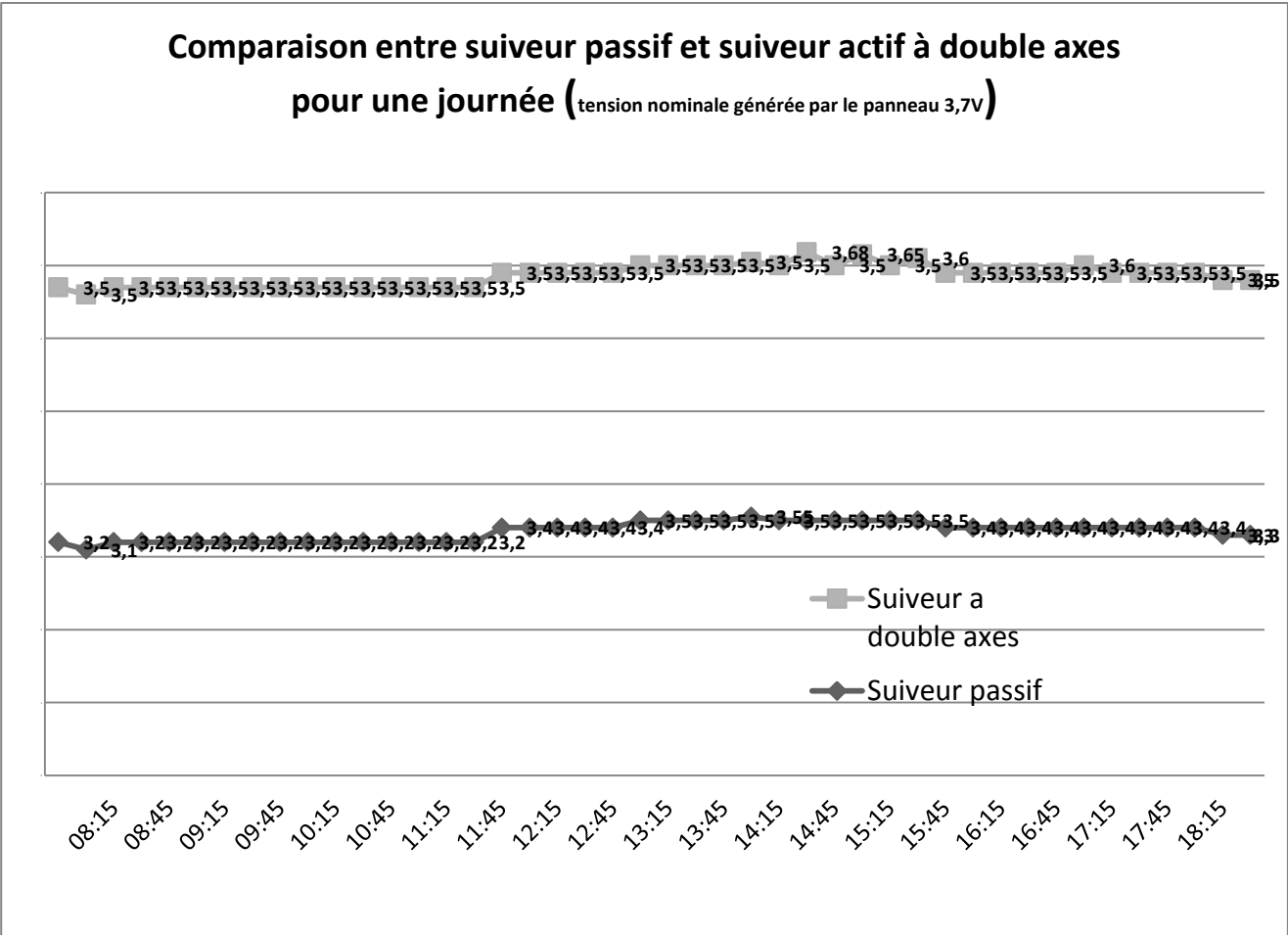
Nous signalons que ce projet peut être amélioré par un choix très sensible de la matière du mécanisme utilisé.

Bibliographies

- [1] - Arduino : Premiers pas en informatique embarquée ; revue par les auteurs : Simon Landrault et Hippolyte Weisslinger .
- [2]- Conception et réalisation d'un système de suiveur solaire pour des systèmes photovoltaïques Mémoires de fin d'étude réalisé par Mr Boughoufala med (université mohammed Boudiaf - Oran)
- [3]- Etude, conception et réalisation d'une commande d'un tracker solaire Mémoires de fin d'étude réalisé par Melle BENMOHAMMADI Zahra (université sidi m'hammed - Maroc)
- [4]- Planete science « commander des servomoteurs classiques et a rotation continue » ; revue Secrétariat général par : Paula Bruzzone Rouge.
- [5]- Rapport scientifique de Dr Bouhadda Youcef sur l'étude de gisement solaire à Ghardaïa (unité de recherche appliquée en énergie renouvelable)
- [6]- Rapport scientifique des Mr DUVAL Alexis & HASHEMI Keyvan (universita di Roma-sapeinza - Italia)
- [7]- sire internet : www.Panneau-solaire-souple.com
- [8]- sire internet : www.Energie-renouvelable.com
- [9] - sire internet : [www.google/Servomoteur commandé par Arduino uno.com](http://www.google/Servomoteur-commandé-par-Arduino-uno.com)
- [10] - sire internet : [www.google/ historique de l'énergie renouvelable en algerie.com](http://www.google/historique-de-l'énergie-renouvelable-en-algerie.com)
- [11] - sire internet : [www.google/ l'énergie solaire en algerie.com](http://www.google/l'énergie-solaire-en-algerie.com)
- [12] - sire internet : [www.google/ panneau-solaire-souple.com](http://www.google/panneau-solaire-souple.com)

Annexe A

A.1 Photo de projet réalisé :



A.2 Les dimensions d'une LDR

Dimensions

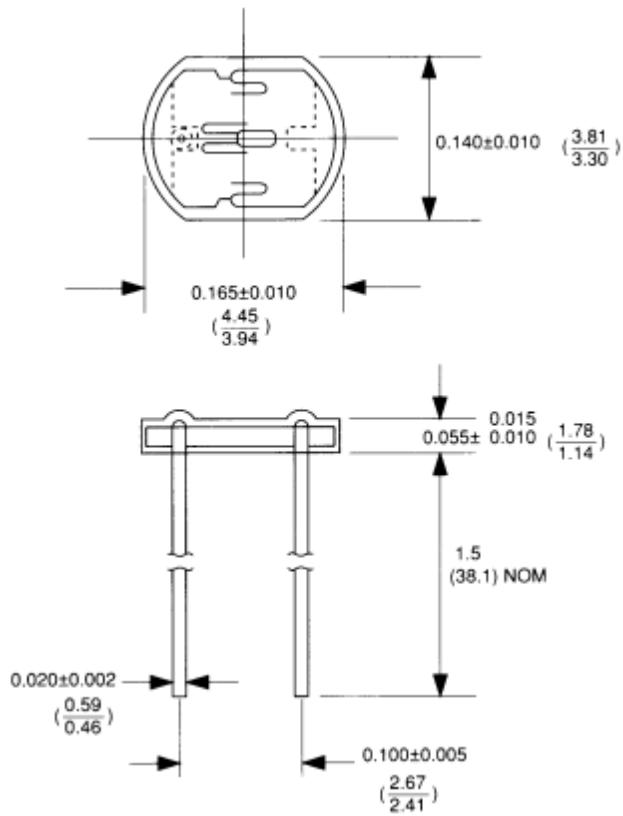


Figure A.2 Dimensions en (mm) du capteur LDR

A.3 Programme utilisé pour la commande

```
#include <Servo.h> //on importe la bibliothèque Servo

int pin_servoV=2; // variable pour stocker le pin pour la commande

int pin_servoH=1; // variable pour stocker le pin pour la commande

Servo servoV, servoH; // on définit un objet Servo nommé servo1

int servoV_angle=90;

int servoH_angle=90;

int tol=5;

int d2=0.1;

//*****

int LDR1 = 1; //LDR top left

int LDR2 = 2; //LDR top right

int LDR3 = 3; //LDR down left

int LDR4 = 4; //ldr down right

//  LDR1 | LDR2

//  ----|----

//  LDR3 | LDR4

//*****

void setup() {

servoV.attach(pin_servoV); // on relie l'objet au pin de commande

servoH.attach(pin_servoH); // on relie l'objet au pin de commande

servoV.write(servoV_angle); //mise en position initiale du servo V
```

```

servoH.write(servoH_angle); //mise en position intial du servo H

delay(500); // ce délai est nécessaire pour que le servo atteigne sa position
}

void loop() {

  int VLDR1=analogRead(LDR1);

  int VLDR2=analogRead(LDR2);

  int VLDR3=analogRead(LDR3);

  int VLDR4=analogRead(LDR4);

  /*******
  *

  int moyH = (VLDR1 + VLDR2) / 2; //valeur moyenne haute

  int moyB = (VLDR3 + VLDR4) / 2; // valeur moyenne basse

  int moyG = (VLDR1 + VLDR3) / 2; // valeur moyenne gauche

  int moyD = (VLDR2 + VLDR4) / 2; // average value droite

  /*******
  *

  int dvert = moyH - moyB; // vérifier la différence de haute et basse

  int dhorz = moyG - moyD; // vérifier la différence de gauche et droite

  /*******
  *

  // vérifier si la différence est dans la tolérance sinon changer l'angle vertical

```

```

    if (servoV_angle > 179)
    {
        servoV_angle = 179;
    }
}

else if (moyH < moyB )
{
    servoV_angle= --servoV_angle;

    if (servoV_angle < 1)
    {
        servoV_angle = 1;
    }

    else if (moyG == moyD)

    {
        // nothing
    }
}

servoV.write(servoV_angle);

}

//*****
*****

// vérifier si la différence est dans la tolérance sinon changer l'angle horizontal
if (-1*tol > dhorz || dhorz > tol)
{
    if (moyG > moyD)

```

```

servoH_angle = --servoH_angle;
if (servoH_angle < 1)
{
    servoH_angle = 1;
}
}
else if (moyG < moyD)
{
    servoH_angle = ++servoH_angle;
    if (servoH_angle > 179)
    {
        servoH_angle = 179;
    }
}
else if (moyG == moyD)
{
    // nothing
}
servoH.write(servoH_angle);
}
delay(50);
}

```

Fig.A.3 .le programme utilisé pour l'interface Arduino