

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

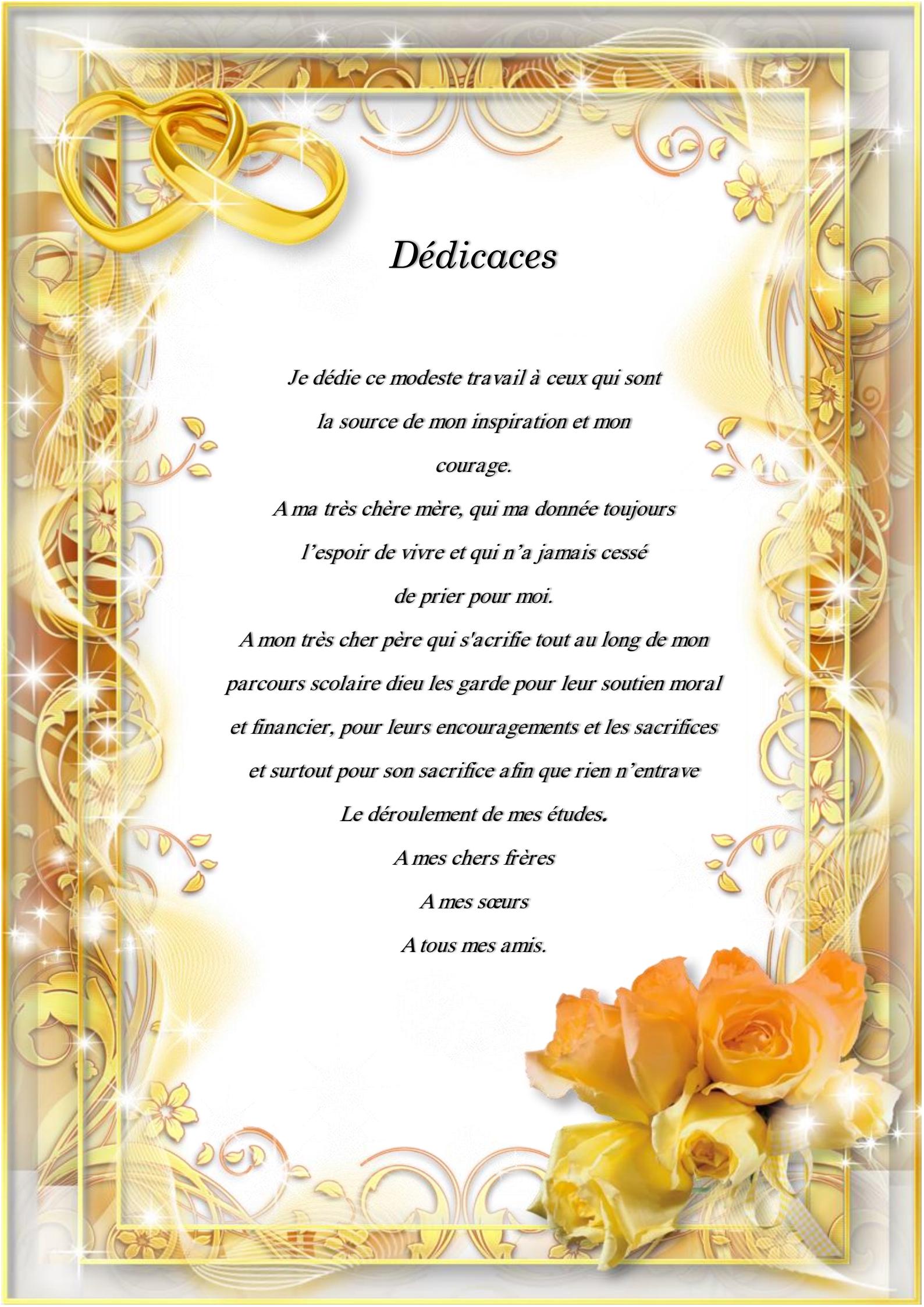
**Etude et réalisation d'un suiveur solaire
photovoltaïque**

Devant le jury composé de :

Dr. MAHMOUDI Abdelkader	Président
Dr. LARGOUT Soulafe	Examinateur
Dr. ZOUBAIDI Massoud	Examinateur
Dr. MILOUDI Khaled	Encadrant
Dr. BELILA Khaled	Co- Encadrant

Présenté par :

- MEISSA Charaf Eddine
- SAHIB Abdelkader
- CHETEHOUNA Fares
- MESSAI MOHAMMED Djaafar



Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont
la source de mon inspiration et mon
courage.*

*A ma très chère mère, qui ma donnée toujours
l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé
de prier pour moi.*

*A mon très cher père qui s'acrifie tout au long de mon
parcours scolaire dieu les garde pour leur soutien moral
et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices
et surtout pour son sacrifice afin que rien n'entrave*

Le déroulement de mes études.

A mes chers frères

A mes sœurs

A tous mes amis.



Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU "Allah" notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

*Mes sincères remerciements s'adresse surtout à mes professeurs **Khaled Miloudi et Khaled Belila** qui ont m'orienté et me soutenir dans ce travail de recherche. Pour nous avoir diligenté tout au long de ce travail, pour sa compréhension, sa patience, sa compétence, et ces remarques qui nous ont été précieuses.*

Nous présentons nos chaleureux remerciements aux professeurs du département génie mécanique

Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

Un système de suivi des panneaux solaires photovoltaïques est nécessaire pour extraire le maximum d'énergie solaire. Le travail présenté dans cette thèse contrôle le système de suivi solaire des panneaux solaires photovoltaïques. Le système de suivi peut être installé dans des zones riches en énergie solaire. Les panneaux solaires photovoltaïques biaxiaux ont la capacité de se déplacer dans les directions horizontale et verticale. Le contrôleur est utilisé carte Arduino qui reçoit les signaux des récepteurs LDR pour contrôler deux servomoteurs sur le double axe vertical et horizontal. Ce système de suivi rend le générateur solaire photovoltaïque plus efficace en gardant la face du panneau perpendiculaire au soleil, extrayant ainsi la quantité maximale d'énergie solaire, augmentant ainsi l'efficacité globale.

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

Abstract

A solar photovoltaic panel tracking system is necessary to extract the maximum amount of solar energy. The work presented in this thesis controls the solar tracking system of photovoltaic solar panels. The tracking system can be installed in areas rich in solar energy. Biaxial photovoltaic solar panels have the ability to move in both horizontal and vertical directions. The controller uses an Arduino board which receives signals from LDR receivers to control two servo motors on the vertical and horizontal double axis. This tracking system makes the solar photovoltaic array more efficient by keeping the panel face perpendicular to the sun, thereby extracting the maximum amount of solar energy, thereby increasing overall efficiency.

Key words: photovoltaic; tracker solar; photovoltaic panels; efficacy; ARDUINO UNO; LDRs; servomotors.

ملخص

يعد نظام تتبع الألواح الشمسية الكهروضوئية ضروريًا لاستخراج أكبر قدر من الطاقة الشمسية. يتحكم العمل المقدم في هذه الأطروحة في نظام التتبع الشمسي للألواح الشمسية الكهروضوئية. يمكن تركيب نظام التتبع في المناطق الغنية بالطاقة الشمسية. تتمتع الألواح الشمسية الكهروضوئية ثنائية المحور بالقدرة على التحرك في كلا الاتجاهين الأفقي والرأسي. تستخدم وحدة التحكم لوحة أردوينو التي تستقبل إشارات من مستقبلات LDR للتحكم في محركين موازرين على المحور المزدوج الرأسي والأفقي. يجعل نظام التتبع هذا المصفوفة الكهروضوئية الشمسية أكثر كفاءة من خلال الحفاظ على وجه اللوحة عمودياً على الشمس، وبالتالي استخراج أقصى قدر من الطاقة الشمسية، وبالتالي زيادة الكفاءة الإجمالية.

الكلمات المفتاحية: التكنولوجيا الكهروضوئية، المترافق الشمسي، الألواح الكهروضوئية، كفاءة الطاقة، أردوينو أونو، المقاوم الضوئي، محركين موازرين.

Liste de symbole et d'abréviation

C : La vitesse de la lumière.

λ : Longitude du lieu.

h : La constante de Planck.

PV : Photovoltaïque.

p-n : Jonction.

RS : Résistance série.

Rsh : Résistance shunt.

Icc : Courant en court-circuit.

Vco : Tension en circuit ouvert.

FF : Facteur de forme.

η : Rendement.

Pmax : Puissance maximale.

Pinc : La puissance solaire incidente

Popt : Puissance optimale.

Vopt : Tension optimale.

Iopt : Courant optimal.

Iph : Photo courant.

Np : Nombre des cellules en parallèles.

Ns : Nombre des cellules en série.

MPPT: Maximum power point tracking.

GPV : Générateur photovoltaïque.

DC/AC : Convertisseur Continu/ Alternatif.

DC/DC : Convertisseur Continu/ Continu.

IDE : interface logiciel Arduino.

LDR : light-dépendent résistor.

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Avantages et inconvénients des cellules PV.....	13
Tableau (II.1) : Les caractéristiques technique d'Arduino Uno.....	35
Tableau (II.2) : Les caractéristiques technique d'Arduino Nano.....	37
Tableau (II.3) : Les caractéristiques technique d'Arduino Leonardo.....	38
Tableau (II.4) : Les caractéristiques technique d'Arduino Méga 2560.....	40
Tableau (II.5) : Les caractéristiques technique d'Arduino due.....	41
Tableau (II.6) : Les caractéristiques technique d'Arduino LilyPad.....	43
Tableau (III.1) : Les caractéristiques technique d'Arduino Uno.....	46

Liste des Figures

Figure (I.1) : Composants du rayonnement solaire.....	6
Figure (I.2) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure (I.3) : Exemple d'un cellule PV.....	8
Figure (I.4) : Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque.....	9
Figure (I.5) : Cellule au Silicium Monocristallin.....	10
Figure (I.6) : Cellule au Silicium Poly cristallin.....	11
Figure (I.7) : Cellule au Silicium amorphe.....	12
Figure (I.8) : caractéristiques résultantes d'un groupement de (Ns) cellules en séries.....	13
Figure (I.9) : Caractéristiques d'un groupement de (Np) cellules en parallèle.....	14
Figure (I.10) : caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques.....	15
Figure (I.11) : Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque.....	16
Figure (I.12) : Composition d'un module photovoltaïque.....	17
Figure (I.13) : Régulateur MPPT Smart Solar.	18
Figure (I.14) : accumulateur de six éléments.....	18
Figure (I.15) : Convertisseur DC-DC (hacheur).....	19
Figure (I.16) : Convertisseur DC-AC (onduleur).....	19
Figure (I.17) : Classification des onduleurs PV connectés au réseau.....	20
Figure (II.1) : Types de suiveurs solaires.....	24
Figure (II.2) : Suiveur solaire passif.....	25
Figure (II.3) : Panneaux solaires avec système de poursuite mono-axiale.....	26
Figure (II.4) : Panneau solaire avec système de poursuite bi-axiale.....	26
Figure (II.5) : Le microcontrôleur Microchip Technology ATtiny817.....	27
Figure (II.6) : L'interface de l'IDE Arduino en détail.....	29
Figure (II.7) : Paramétrage de la carte.....	30
Figure (II.8) : Structure de programme principal.....	31
Figure (II.9) : Les étapes de téléchargement du code.....	32
Figure (II.10) : La carte Arduino UNO.....	34
Figure (II.11) : Description de la carte Arduino Uno.....	35
Figure (II.12) : La carte Arduino Nano.....	36
Figure (II.13) : La carte Arduino Mini.....	37
Figure (II.14) : La carte Arduino Leonardo.....	38
Figure (II.15) : La carte Arduino Méga 2560.....	39
Figure (II.16) : Description des entrées/sorties de la carte Arduino Méga 2560.....	40
Figure (II.17) : La carte Arduino due.....	41

Liste des Figures

Figure (II.18) : La carte Arduino Lily Pad.....	42
Figure (III.1) : La carte Arduino UNO.....	45
Figure (III.2) : Microcontrôleur ATMega328.....	47
Figure (III.3) : Composition d'un servomoteur.....	50
Figure (III.4) : Servomoteur Futuba S3003.....	51
Figure (III.5) : Fonctionnement d'un servomoteur.....	52
Figure (III.6) : Illustration Signal de contrôle.....	52
Figure (III.7) : Symbole LDR.....	53
Figure (III.8) : Circuit équivalent de la photorésistance utilisé.....	54
Figure (III.9) : Résistance 10 kOhm.....	54
Figure (III.10) : Panneau solaire.....	55
Figure (III.11) : Interface principale de Logiciel Proteus.....	56
Figure (III.12) : Schéma de suiveur solaire (Proteus).....	57
Figure (III.13) : Programmation sur Arduino.....	60
Figure (III.14) : Brochage de LDR à l'Arduino.....	60
Figure (III.15) : montage circuit électrique des servomoteurs (fritzing).....	61
Figure (III.16) : Circuit électrique de suiveur.....	61
Figure (III.17) : Début de la conception de base.....	62
Figure (III.18) : Pièces de base.....	62
Figure (III.19) : Support de panneau solaire.....	63
Figure (III.20) : Installation du capteur de lumière (LDR).....	63
Figure (III.21) : Prototype des capteurs.....	64
Figure (III.22) : Pièces de traqueur solaire.....	65
Figure (III.23) : La forme finale de Suiveur Solaire	65

Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Généralités sur le système photovoltaïque

I.1. Introduction	4
I.2. L'énergie solaire	4
I.3. Le rayonnement solaire	5
I.4. Le type de rayonnement solaire	5
I.4.1. Rayonnement direct	5
I.4.2. Le rayonnement diffus	5
I.4.3. Le rayonnement réfléchi	6
I.4.4. Le rayonnement global	6
I.5. La conversion photovoltaïque	6
I.5.1. L'effet photovoltaïque	6
I.5.2. Le principe de la conversion	7
I.6. La cellule photovoltaïque	8
I.6.1. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.6.1.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.6.1.1.1. Courant de court -circuit (I_{cc})	9
I.6.1.1.2. Tension de circuit –ouvert (V_{co})	9
I.6.1.1.3. Facteur de forme.....	9
I.6.1.1.4. Rendement énergétique.....	10
I.7. Type de cellule.....	10
I.7.1. Cellules au silicium monocristallin.....	10
I.7.2. Cellule au silicium poly (ou multi) -cristallin.....	11
I.7.3. Cellule au silicium amorphe.....	11

Sommaire

I.8. Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques.....	12
I.9. Regroupement des cellules.....	13
I.9.1. Regroupement des cellules en série.....	13
I.9.2. Regroupement de cellules en parallèle.....	14
I.9.3. Regroupement (série et parallèle)	14
I.10. Centrale solaire.....	15
I.10.1. Qu'est-ce qu'une centrale solaire.....	15
I.10.2. Les centrales solaires photovoltaïques.....	15
I.11. Matériel utilisé dans les centrales solaires.....	16
I.11.1. Les panneaux solaires photovoltaïques.....	16
I.11.2. Régulateur de charge MPPT.....	17
I.11.3. Batterie.....	18
I.11.4. Convertisseur.....	18
I.11.4.1. Convertisseur DC-DC (hacheur).....	19
I.11.4.2. Convertisseur DC-AC (onduleur).....	19
I.12. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	20
I.13. Conclusion.....	21

Chapitre II : Association suiveur solaire-Arduino

II.1. Introduction.....	23
II.2. Suiveur solaire.....	23
II.2.1 Les types de suiveurs solaires.....	24
II.2.1.1. Suiveurs solaire passif.....	24
II.2.1.2. Suiveur solaire actif.....	25
II.2.1.2.1. Suiveur solaire mono-axe.....	25

Sommaire

II.2.1.2.2. Suiveur solaire double axe.....	26
II.3. Généralité sur d'Arduino.....	27
II.3.1. Microcontrôleur.....	27
II.3.2. Partie programme software.....	28
II.3.2.1. L'environnement de la programmation : le logiciel (IDE).....	28
II.3.2.2. L'architecture générale du logiciel.....	28
II.3.2.3. Injection du programme.....	29
II.3.2.4. Programmation en Arduino.....	30
II.3.2.5. Les étapes de téléchargement du programme.....	31
II.3.3. Carte d'Arduino.....	32
II.3.3.1. Définition.....	32
II.3.3.2. Caractéristique de la carte Arduino.....	33
II.3.4. Le type d'Arduino.....	34
II.3.4.1. Arduino UNO.....	34
II.3.4.2. L'Arduino Nano.....	36
II.3.4.3. L'Arduino Mini.....	37
II.3.4.4. L'Arduino Leonardo.....	37
II.3.4.5. L'Arduino Méga 2560.....	39
II.3.4.6. L'Arduino due.....	40
II.3.4.7. Arduino LilyPad.....	42
II.4. Conclusion.....	43

Chapitre III : Programmation et réalisation d'un suiveur solaire

III.1. Introduction.....	45
III.2. Matériel utilisé dans le projet.....	45

Sommaire

III.2.1. Arduino UNO.....	45
III.2.1.1. La constitution de la carte Arduino UNO.....	46
III.2.1.1.1. Le Microcontrôleur ATMega328.....	46
III.2.1.1.2. Les sources de l'alimentation de la carte.....	47
III.2.1.1.3. Les entrées & sorties.....	48
III.2.2. Servomoteur.....	49
III.2.2.1. Présentation.....	49
III.2.2.2. Fonctionnements des servomoteurs.....	51
III.2.3. Photorésistance LDR.....	52
III.2.3.1. Principe de fonctionnement.....	53
III.2.4. Résistance	54
III.2.5. Mini panneau solaire	54
III.3. La conception et la réalisation du système de poursuite	55
III.3.1. Partie simulation	55
III.3.1.1. Présentation de logiciel ISIS Proteus.....	55
III.3.2. Partie programmation	57
III.3.3. Partie électronique	60
III.3.3.1. Branchement de LDR	60
III.3.3.2. Branchement de servomoteurs	61
III.3.3.3. Réalisation du circuit électrique	61
III.3.3.4. L'Alimentation	61
III.3.4. Partie mécanique	62
III.3.4.1. Conception de la partie inférieure (base du projet)	62
III.3.4.2. Conception supérieure (Support de panneau solaire)	62

Sommaire

III.3.4.3. Comment installer des photorésistances (LDR)	63
III.3.4.4. Position des photorésistances (LDR)	64
III.3.4.5. Assemblage des pièces du projet.	64
III.3.4.6. Schéma final de notre suiveur.....	65
III.4. Explication du principe de fonctionnement du projet.....	65
III.5. Conclusion.....	66
Conclusion générale.....	68
Bibliographie.....	70

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des énergies qui dépendent de ressources naturelles qui ne sont pas éphémères ou qui ne sont pas consommées par l'homme.

Les données à l'heure actuelle montrent que la réserve mondiale s'épuisera à long terme si la consommation n'est pas modifiée, et étant donné que la source d'énergie actuelle est nocive pour l'environnement, nous devons rechercher des solutions technologiques alternatives pour produire une énergie propre qui n'est pas écologique.

Il existe également des sources pour la production d'énergie renouvelable, telles que la production par panneau solaire ou l'exploitation de la vitesse du vent en employant des turbines pour convertir l'énergie mécanique en électricité, et il existe de nombreuses autres sources pour la production d'énergie propre.

L'énergie électrique produite par les centrales solaires dépend de l'intensité de l'illumination quotidienne du soleil, et afin de générer la plus grande quantité d'énergie, la plus grande quantité possible de l'illumination quotidienne du soleil est exploitée en utilisant des dispositifs appelés systèmes de suivi solaire " traqueurs solaires".

Nos travaux de recherche présentés dans ces rubriques portent spécifiquement sur cette conception et réalisation d'un tracker solaire basé sur une carte Arduino UNO. On a partagé ce travail en trois chapitres importants :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités au système photovoltaïque à partir des notions de rayonnement solaire, et nous présenterons également le principe de l'effet photovoltaïque, le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs procédés de fabrication et leur application dans le domaine photovoltaïque, et dans le dernier nous avons évoqué les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous parlerons du suiveur solaire et de ses types ainsi que des informations générales sur l'Arduino. Ensuite, nous avons discuté des différents titres et découvert leurs types et leurs caractéristiques.

Et dans le troisième chapitre, nous avons réalisé un tracker d'énergie solaire basé sur la carte Arduino UNO.

CHAPITRE I

Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

I.1. Introduction :

Le soleil est une source d'énergie presque illimitée, capable de couvrir des milliers de fois notre consommation énergétique mondiale. C'est pourquoi, après une longue recherche d'un moyen d'exploiter cette énergie précieuse qui est largement répartie sur le globe, l'homme a maintenant trouvé un moyen de la faire grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques. Cette énergie solaire est abondante partout à la surface de la terre, et malgré une forte atténuation lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité restante lorsqu'elle atteint le sol est encore assez importante. On peut ainsi compter sur 10 000 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [1].

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique [2].

En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [3].

I.2. L'énergie solaire :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est fournie par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité alimentée est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité alimentée dans le réseau.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles vous vous trouvez [4].

I.3. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est la quantité d'énergie émise par le soleil sous forme de rayonnement électromagnétique sous forme de photons. On peut exprimer cette énergie par la relation suivante $E = h \cdot C / \lambda$ [5].

Où, h , est la constante de Planck, $h = 6.62 \times 10^{-34}$ J.s.

Le rayonnement solaire est constitué du rayonnement électromagnétique émis par le soleil, avec un spectre qui s'étend depuis les plus petites longueurs d'onde (rayons gamma) jusqu'aux plus grandes longueurs d'onde (rayons électromagnétiques). Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement de la Terre sont avant tout des bandes infrarouges, visibles et ultraviolettes, ainsi que les bandes radio et micro-ondes.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-Soleil de 15.107 km). Ceci se nomme la constante solaire [5].

I.4. Le type de rayonnement solaire :

I.4.1. Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est reçu du Soleil en ligne droite, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, le rayonnement direct forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

Le pyrhéliomètre est l'instrument utilisé pour mesurer l'intensité des radiations directes. Il doit être muni d'un dispositif orienté en continuation vers le soleil [6].

I.4.2. Le rayonnement diffus :

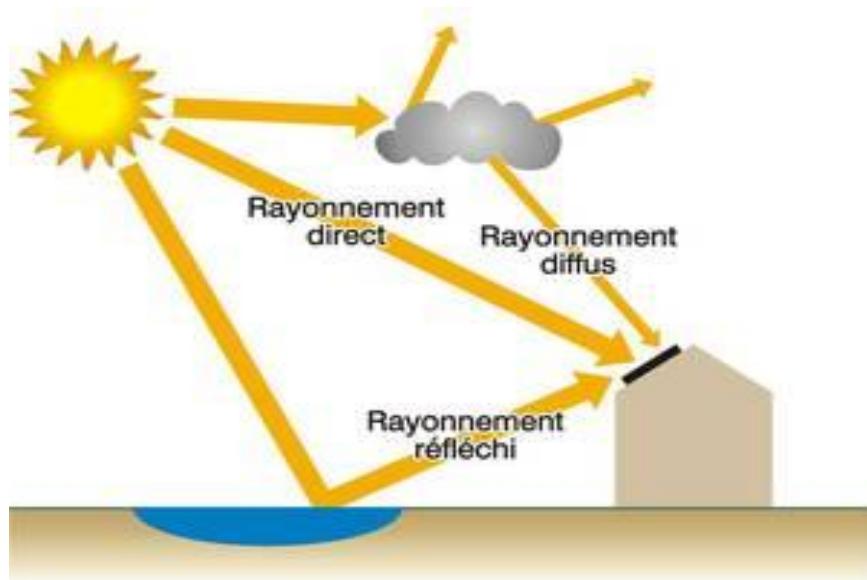
Est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du Soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet que le rayonnement diffus est *isotrope*, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du Soleil (composante appelée *circumsolaire*) et souvent un renforcement sur l'horizon, la *bande horizon* [7].

I.4.3. Le rayonnement réfléchi :

L'albédo est la partie réfléchie par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés [8].

I.4.4. Le rayonnement global :

Le rayonnement global est la somme des autres composantes d'au moins deux composantes du rayonnement solaire sur un plan horizontal : soit les composantes globale et directe, soit les composantes globale et diffuse [9].



(Figure I.1) : Composants du rayonnement solaire [10].

I.5. La conversion photovoltaïque :

I.5.1. L'effet photovoltaïque :

C'est la transformation de l'énergie issue de la lumière solaire en énergie électrique par le biais d'un capteur composé de matériaux sensible à l'énergie qui réside dans les photons. Ce capteur sera sous forme d'une cellule PV dans l'échelle élémentaire. En 1839, le physicien français Edmond Becquerel observa, pour la première fois, l'effet photovoltaïque. En dépit de cela, la fabrication de la première photopile ; l'élément primaire ou de base de la conversion photovoltaïque n'a eu lieu qu'au cours des années 1950 par les chercheurs de la compagnie Bell, aux Etats-Unis [11].

I.5.2. Le principe de la conversion :

L'effet photovoltaïque, utilisé dans les cellules solaires, permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité en produisant et en transportant des charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur sous l'influence de la lumière. Les deux sections de ce matériau, l'une avec un excès d'électrons et l'autre avec un manque d'électrons, sont appelées dopées de type n et de type p, respectivement. Lorsque le premier entre en contact avec le second, les électrons en surplus de la matière n diffusent dans la substance p.

La région initialement dopée n devient chargée positivement, tandis que la région initialement dopée p devient chargée négativement. Il en résulte qu'un champ électrique se forme entre eux, ce qui tend à repousser les électrons de la zone n et les trous de la zone p vers l'arrière. Il y a eu la formation d'une jonction p-n. Une diode est réalisée en connectant les régions n et p avec des contacts métalliques. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'une énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite transfèrent leur énergie aux atomes, qui transmettent chacun un électron de la bande de valence à la bande de conduction tout en laissant simultanément un trou mobile, ce qui donne un électron -paire de trous. Si une charge est appliquée aux bornes de la cellule, la cellule sera chargée. Les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel [11].

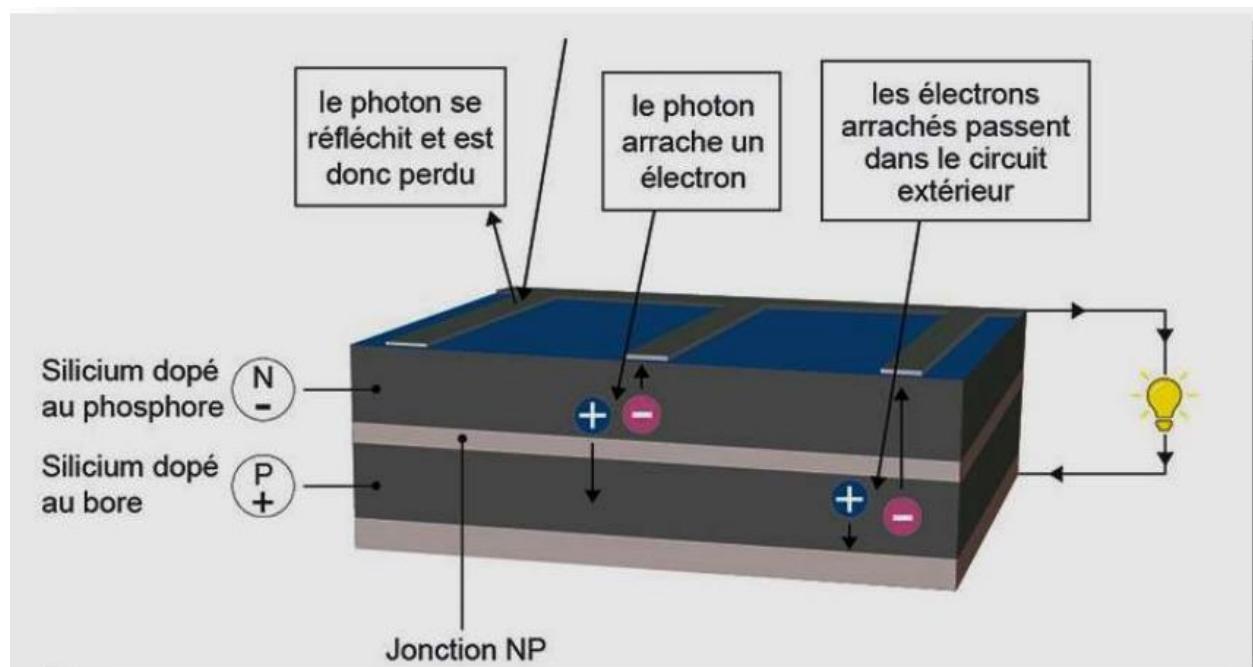


Figure (I.2) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [12].

I.6. La cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs électroniques réalisées à l'aide des composants semi-conducteurs qui possèdent la particularité de produire l'électricité quand'ils sont éclairés. Elles sont généralement faites du silicium sous ses différentes formes [11].

Son fonctionnement est conforme au principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles pour former ce qu'on appelle un module solaire photovoltaïque [13].



Figure (I.3) : Exemple d'un cellule PV [13].

I.6.1. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque :

La figure (I.4) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant monté en parallèle avec une diode. Dans ce schéma, on introduit deux résistances parasites.

Ces résistances affectent quelque peu la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule : La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé ; La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; Cela dépend de comment cela se fait :

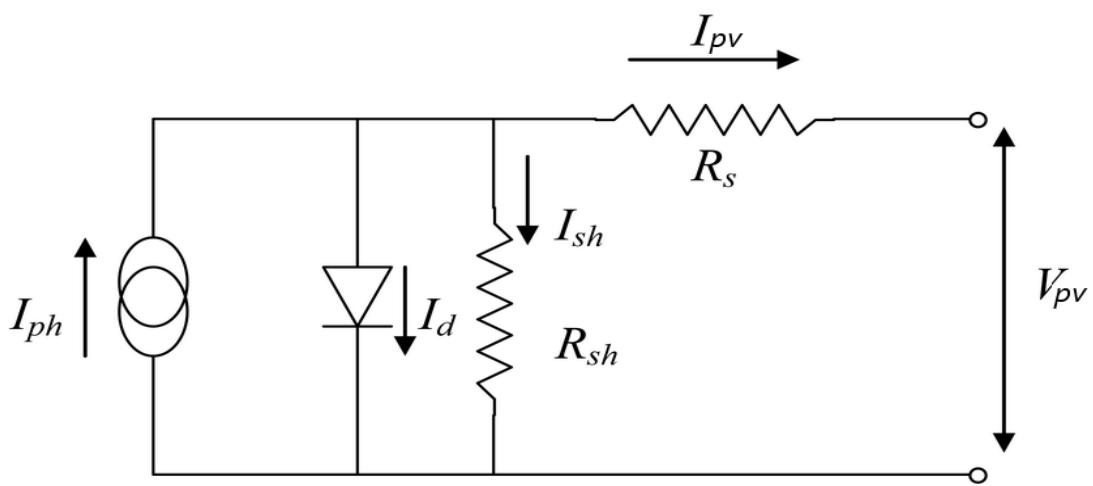


Figure (I.4) : Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque.

I.6.1.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

I.6.1.1.1. Courant de court -circuit (**Icc**) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal (nulle et infinie), ce courant se confond avec la photo – courant dans le cas contraire, en annulant la tension V [14] :

I.6.1.1.2. Tension de circuit –ouvert (**Vco**) :

La tension en circuit ouvert est obtenue lorsque le courant passant par la cellule est de zéro. Cela dépend de la barrière énergétique, et diminue avec la température et varie peu avec l'intensité de la lumière.

I.6.1.1.3. Facteur de forme :

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule **Pmax (Iopt, Vopt)** et le produit du courant de court-circuit **Icc** par la tension de circuit –ouvert (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, plus il s'approche de l'unité watt plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 watt pour les cellules performantes ; et diminue avec la température [14]. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites **Rser** et **Rshu**. Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{I_{cc}V_{co}} \quad (\text{I.1}) [14].$$

I.6.1.1.4. Rendement énergétique :

Il s'agit du ratio entre la puissance électrique maximum fournie par la cellule **P_{max}** (I_{opt} , V_{opt}) et l'énergie solaire incidente. Elle vient de :

$$n = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{P_{inc}} \quad (\text{I.2}) [14].$$

Avec **P_{inc}** égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des générateurs PV. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [14].

I.7. Type de cellule :

Il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe :

I.7.1. Cellules au silicium monocristallin :

Les photopiles sont formées d'un seul cristal ordonné. Ce matériau est fabriqué en barreaux étirés à partir d'un germe, ou recristallisés à haute température; lequel matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux « terrestres » les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium .

- Rendement électrique des panneaux : 15 à 20 %
- Puissance des panneaux : 5 à 300 Wc.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1 000 W/m².
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance : télécoms, habitat, centrales et toits solaires [15].

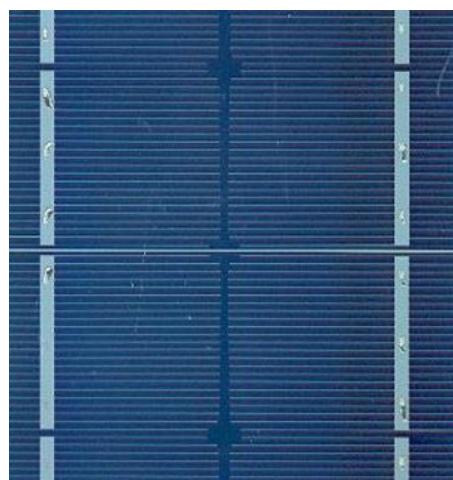


Figure (I.5) : Cellule au Silicium Monocristallin [16].

I.7.2. Cellule au silicium poly (ou multi) -cristallin :

Il est constitué de cristaux de 1 mm à environ 2 cm assemblés (composés de multi cristaux), appelés « grains ». Ce matériau, moins onéreux, est élaboré dans de grands creusets industriels par fonte et refroidissement de blocs de silicium purifié. Il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairages modérés, et également moins onéreux .

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 17 %.
- Puissance des panneaux : 5 à 300 Wc.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1 000 W/m².
- Usage : id. silicium cristallin [15].



Figure (I.6) : Cellule au Silicium Poly cristallin [16].

I.7.3. Cellule au silicium amorphe :

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, c'est-à-dire non cristallisée, ou vitreuse. Cependant, il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ mille fois supérieur à celui du silicium cristallin. Une fine couche de 0,3 µm (= 0,0003 mm) est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible. Et il est moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairages, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

- Rendement électrique des panneaux : 5-7 % (jusqu'à 12 % pour les « multi-jonctions »).
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 Wc.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 90 Wc.
- Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1 000 W/m² (en extérieur).

- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi-transparentes, centrales au sol [15].

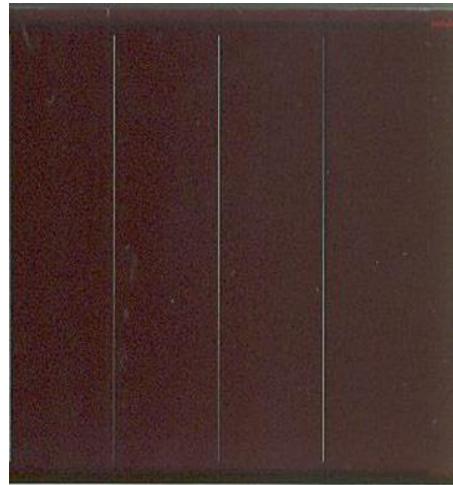


Figure (I.7) : Cellule au Silicium amorphe [16].

I.8. Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques :

Le tableau (I.1) présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque [20].

Type	Avantage	Inconvénient
Silicium mono cristallin	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m²) ➤ Durée de vie importante (+/- 30 ans) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Plus cher que le polycristallin ➤ Rendement faible sous un faible éclairement
Silicium poly cristallin	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bon rendement (environ 100 Wc/m²) ➤ Durée de vie importante (+/- 30 ans) ➤ Moins cher que le monocristallin 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rendement faible sous un faible éclairement
Silicium amorphe	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fonctionnent avec un éclairement faible 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m²), les cellules en couche

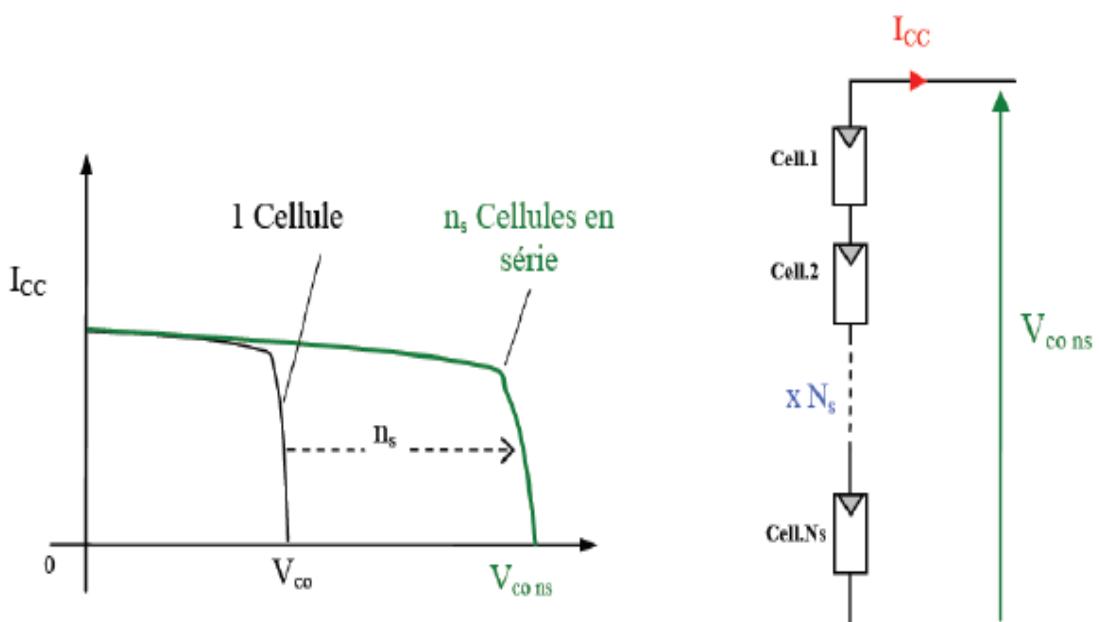
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bon marché par rapport aux autres types de cellules ➤ Moins sensible aux températures élevées ➤ Souple 	<ul style="list-style-type: none"> mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses ➤ Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps
--	--	--

Tableau (I.1) : Avantages et inconvénients des cellules PV.

I.9. Regroupement des cellules :

I.9.1. Regroupement des cellules en série :

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante de regroupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, un tel regroupement est représenté par la figure (I.8) [17].

**Figure (I.8)** : caractéristiques résultantes d'un regroupement de (N_s) cellules en séries [17].

I.9.2. Regroupement de cellules en parallèle :

Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. La figure (I.9) résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules.

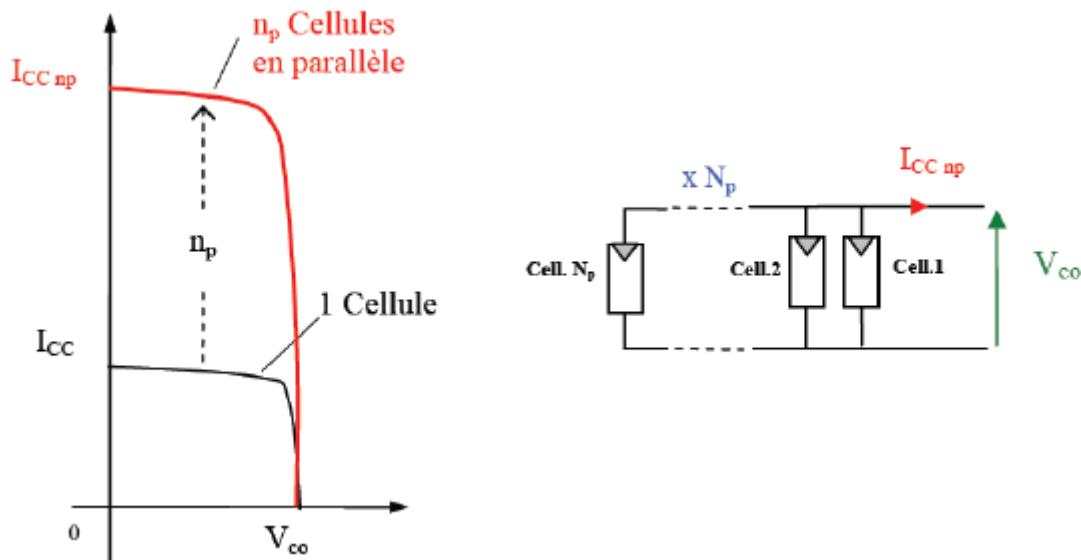


Figure (I.9) : Caractéristiques d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle [17].

I.9.3. Regroupement (série et parallèle) :

Ce type d'association est relativement adopté pour en tirer une tension importante étant donné que l'association en série des photopiles délivre une tension équivalente à la somme des tensions individuelles et un courant équivalent à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant. Il est strictement indispensable d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque, afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable [18].

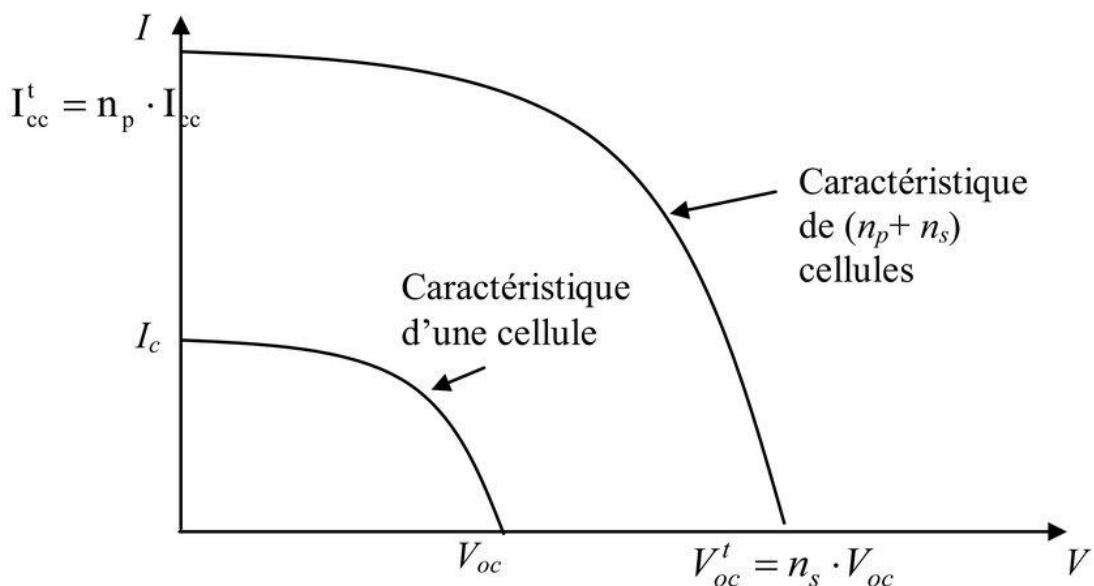


Figure (I.10) : caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques [18].

I.10. Centrale solaire :

I.10.1. Qu'est-ce qu'une centrale solaire ?

Les centrales solaires sont basées sur un principe simple : produire de l'énergie à partir de l'énergie solaire, via des panneaux solaires. On capitalise ainsi sur le rayonnement solaire afin de produire de l'énergie renouvelable. Il s'agit d'une énergie propre.

On parle de centrale solaire pour qualifier les unités de production d'énergie via le rayonnement solaire, sans limite de taille. Ce terme peut donc s'appliquer à de grandes installations, mais aussi à des centrales de plus petite taille.

Il en existe principalement trois types : les centrales solaires photovoltaïques, les centrales solaires thermiques et les centrales solaires thermodynamiques.

L'énergie produite par les centrales solaires peut être utilisée sur place ou réinjectée dans le réseau de distribution d'électricité. EDF a notamment une obligation de rachat de l'électricité photovoltaïque [23].

I.10.2. Les centrales solaires photovoltaïques :

Les centrales solaires photovoltaïques transforment le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques intégrées à des panneaux. Ceux-ci peuvent être posés sur le sol ou installés sur des toitures. Ils vont donc capter l'énergie solaire pour la transformer en électricité. La durée de vie d'une centrale solaire photovoltaïque est au minimum de 25 ans pour les centrales neuves, pouvant aller jusqu'à 40 ou 45 ans [19].

Le **silicium cristallin** représente 90 % du marché mondial des cellules photovoltaïques : ces cellules sont constituées de fines plaques de silicium, élément que l'on extrait du sable ou du quartz. D'autres types de cellules photovoltaïques se développent peu à peu comme les couches minces, les cellules organiques, les cellules à concentration et les cellules pérovskites hybrides [23].

I.11. Matériel utilisé dans les centrales solaires :

I.11.1. Les panneaux solaires photovoltaïques :

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules sont assemblées pour former un module. Les cellules individuelles sont généralement connectées dans une chaîne en série (typiquement 36 ou 72) pour atteindre la tension de sortie désirée. La puissance crête obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité. La courbe de la figure (I.11), montre les caractéristiques non linéaires du panneau solaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température. Cependant, plusieurs grandeurs électriques importantes décrivent le fonctionnement du module photovoltaïque sont :

- Le courant maximal (I_{sc}) Il se produit lorsque les bornes du module sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit (I_{sc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.
- La tension à vide (V_{oc}) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert.
- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale du module) [20].

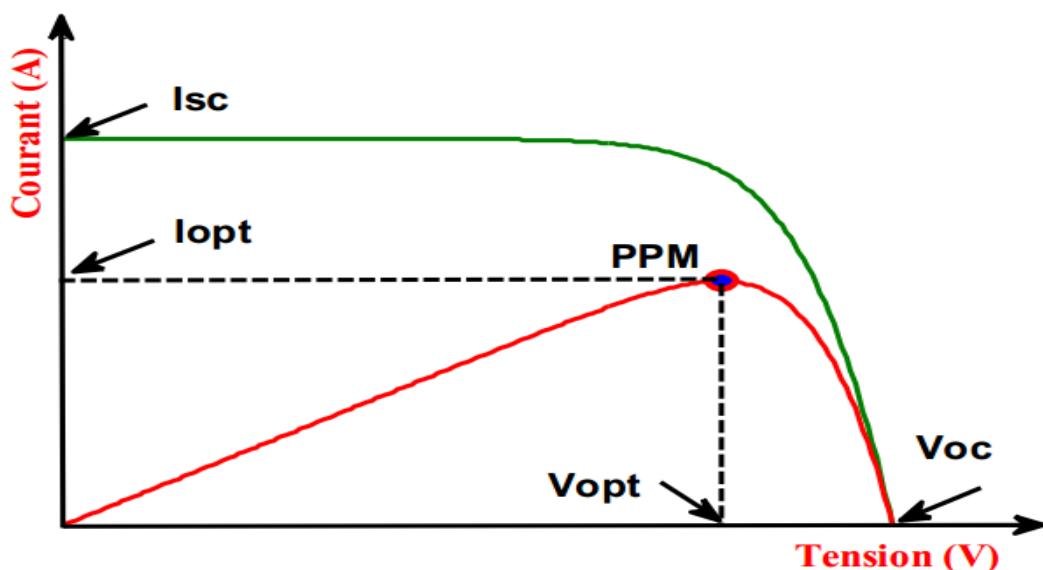


Figure (I.11) : Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque [20].

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments (figure I.12):

- Cadre en aluminium.
- Joint pour fixer le module.
- Verre : pour la protection du module.
- Couche de l'EVA (EVA : éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité.
- Cellule photovoltaïque
- Feuille de Tedlar blanc : pour plus de résistance mécanique des grands modules [21].

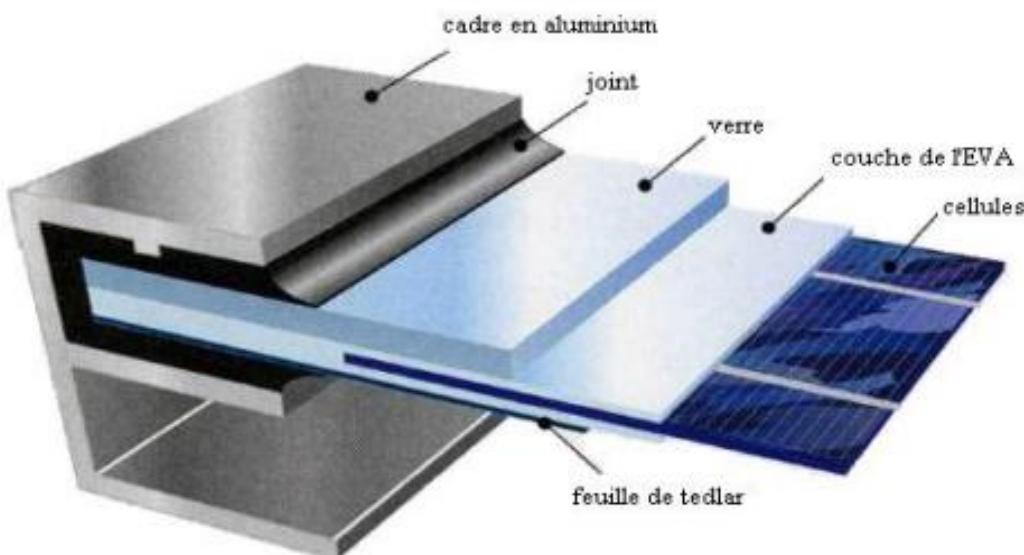


Figure (I.12) : Composition d'un module photovoltaïque [21].

I.11.2. Régulateur de charge MPPT :

Actuellement, le régulateur de charge solaire le plus utilisé est celui basé sur l'algorithme MPPT. Il a une efficacité de 30 à 40% à basse température. Le contrôleur MPPT est basé sur un circuit convertisseur Buck synchrone. Il diminue la tension du panneau solaire à la tension de charge de la batterie. Il ajustera sa tension d'entrée pour obtenir le maximum de puissance des panneaux solaires, puis convertir cette énergie pour répondre aux différentes exigences de tension de la batterie et de la charge. Généralement, Le contrôleur de charge MPPT est un convertisseur DC/DC qui convertit l'énergie à haute tension en énergie à basse tension. Par conséquent, si la tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée, le courant de sortie sera supérieur au courant d'entrée, de sorte que le produit $P = VI$ reste constant. Ainsi, pour tirer le maximum d'énergie des panneaux solaires, le contrôleur de charge doit pouvoir sélectionner le point de courant-tension

idéal dans la courbe courant-tension : le point de puissance maximale. MPPT. Fait exactement cela. Ainsi, les panneaux solaires ne sont pas utilisés à leur propre point de puissance maximale, dans la plupart des cas [22].



Figure (I.13) : Régulateur MPPT Smart Solar.

I.11.3. Batterie :

La batterie est constituée d'un ensemble d'accumulateurs électrochimiques qui transforment l'énergie électrique en énergie chimique et inversement. Ces activités sont respectivement appelées chargées et déchargées. Le terme "accumulateur" est utilisé pour décrire un élément rechargeable. [23].

➤ Un accumulateur :

Est un gadget qui stocke l'énergie électrique sous forme d'électrochimie et la libère ensuite au besoin. Chaque accumulateur se compose de pièces qui sont reliées entre elles pour construire des blocs.

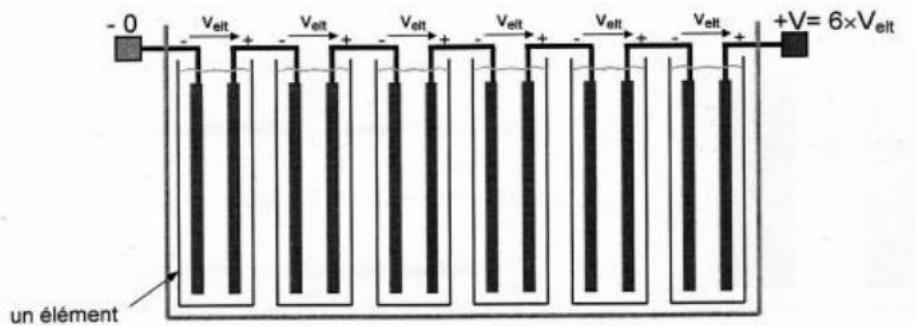


Figure (I.14) : accumulateur de six éléments [23].

I.11.4. Convertisseur :

Il s'agit des appareils qui servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries afin de l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente

ou une tension alternative. Au cas où le convertisseur serait utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...), le recours à son étude est intéressante. En quelque sorte, il existe deux sortes de convertisseurs dans une installation PV, le hacheur et l'onduleur qui ont pour rôle d'extraire la puissance maximale du générateur PV et la convertir en puissance alternative avant de la consommer [24].

I.11.4.1. Convertisseur DC-DC (hacheur) :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). On l'utilise nécessairement pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [25]. Le hacheur est fait pour extraire la puissance maximale du générateur PV. C'est la raison pour laquelle il est doté d'un algorithme de recherche de type MPPT [26].

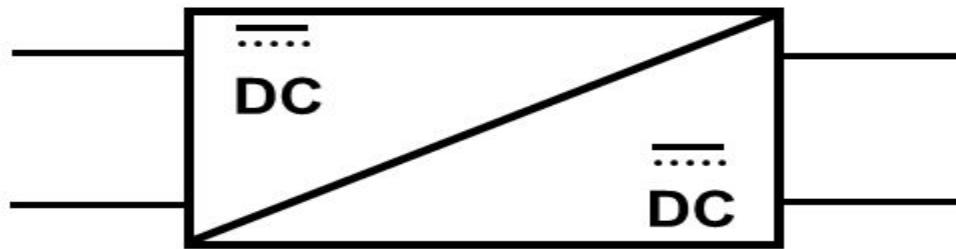


Figure (I.15) : Convertisseur DC-DC (hacheur).

I.11.4.2. Convertisseur DC-AC (onduleur) :

Nous parlons un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée d'une manière très précise [25]. Dans une station PV la puissance maximale extraite par le hacheur est convertie en puissance alternative active par l'onduleur. Dans une station PV, l'onduleur est l'un des composants les plus importants, il existe plusieurs différents types d'onduleurs utilisés selon la nature et l'exigence de l'installation, les plus importants en sont :

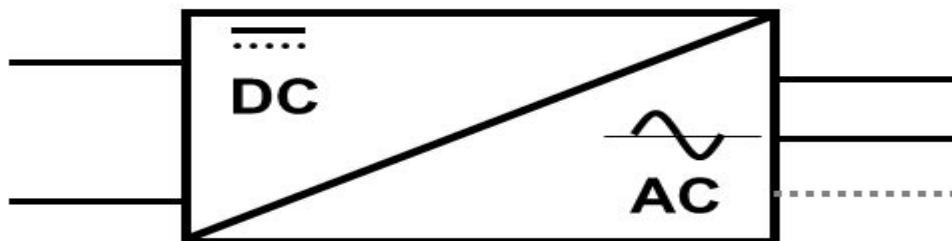


Figure (I.16) : Convertisseur DC-AC (onduleur).

➤ **Onduleurs modulaires (module inverter) :**

Chaque module solaire disposé d'un onduleur individuel, pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant [27].

➤ **Onduleurs centralisés (central inverter) :**

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif. Ce qui veut dire un seul onduleur de taille pour tout l'ensemble des modules du champ PV, et pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série [27].

➤ **Onduleurs "String" ou "de Rangée" :**

L'onduleur String est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) de modules solaires sont connectés en série. Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé [27].

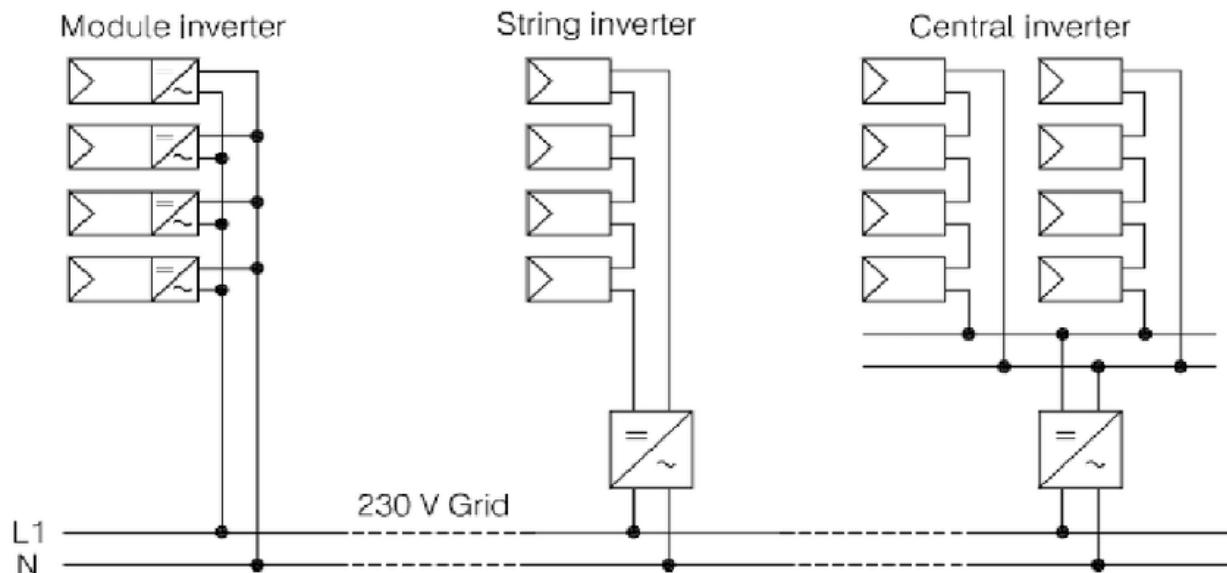


Figure (I.17) : Classification des onduleurs PV connectés au réseau [24].

I.12. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.12.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [28] :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.

- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

I.12.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication.

I.13. Conclusion :

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité dans des matériaux très spécifiques tels que les semi-conducteurs, et nécessite un équipement supplémentaire appelé système photovoltaïque, qui s'appuie sur des composants d'optimisation qui en font une énergie électrique productive et consommable.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts généraux du système PV, l'installation et l'assemblage des panneaux, ainsi que les avantages et les inconvénients du PV.

CHAPITRE II

Association Suiveur Solaire

- Arduino

II.1. Introduction :

Suiveur solaire est un appareil qui suit le mouvement du soleil pendant sa rotation d'est en ouest chaque jour. La fonction principale de tous les systèmes de suivi est de fournir un ou deux degrés de liberté de mouvement. Les suiveurs sont utilisés pour maintenir les collecteurs solaires/panneaux solaires orientés directement vers le soleil lorsqu'il se déplace dans le ciel chaque jour. L'utilisation de trackers solaires augmente la quantité d'énergie solaire qui est reçue par le collecteur d'énergie solaire et améliore la production d'énergie de la chaleur/électricité qui est générée. Les suiveurs solaires peuvent augmenter la production des panneaux solaires de 20 à 30 %, ce qui améliore l'économie du projet de panneaux solaires [29].

Grâce au développement technologique dans le domaine des semi-conducteurs et à l'invention des circuits intégrés, il est devenu possible de placer un circuit électronique complet sur une petite puce dont la taille ne peut dépasser quelques millimètres ; même aujourd'hui, il existe des circuits électroniques dont la taille est estimée être nano-mètre et qui ne peuvent être vus qu'avec des amplificateurs spéciaux. [30].

Le développement de ces circuits intégrés a également conduit à l'émergence d'une génération spéciale de circuits électroniques appelés microcontrôleurs cela ressemble plus à un miniordinateur programmable pour exécuter une gamme de fonctions, tels que la lecture du contrôle de température d'un moteur électrique ou encore la gestion des lignes de production dans les grandes usines et tout cela se fait simplement au moyen de commandes logicielles et donc la technologie de fabrication de systèmes et de circuits électroniques est passée de la conception et de la recherche électroniques basées uniquement sur des composants solides à des commandes programmatiques que chacun peut écrire et concevoir par lui-même facilement et commodément.

Ces microcontrôleurs offrent également des possibilités de modification à tout moment, tout simplement si nous voulions changer quelque chose de notre projet, nous pourrions le faire en ajustant les lignes de programmation et replacez les nouvelles commandes sur le microcontrôleur et essayez-le plus d'une fois [30].

II.2. Suiveur solaire :

Différentes conceptions des suiveurs solaires sont proposées, et le nécessité des capteurs joue un grand rôle dans leur fonctionnement, et du contrôle du temps. L'ancien type de suiveur exige que la position du soleil soit déterminée par des capteurs de photocellules, et la précision de ce type de commande dépend du nombre de capteurs dans tous les sens [31].

Des suiveurs solaires peuvent être divisés en deux types principaux selon le type de la commande et de la sensibilisation du système de positionnement qu'ils incorporent :

II.2.1 Les types de suiveurs solaires :

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

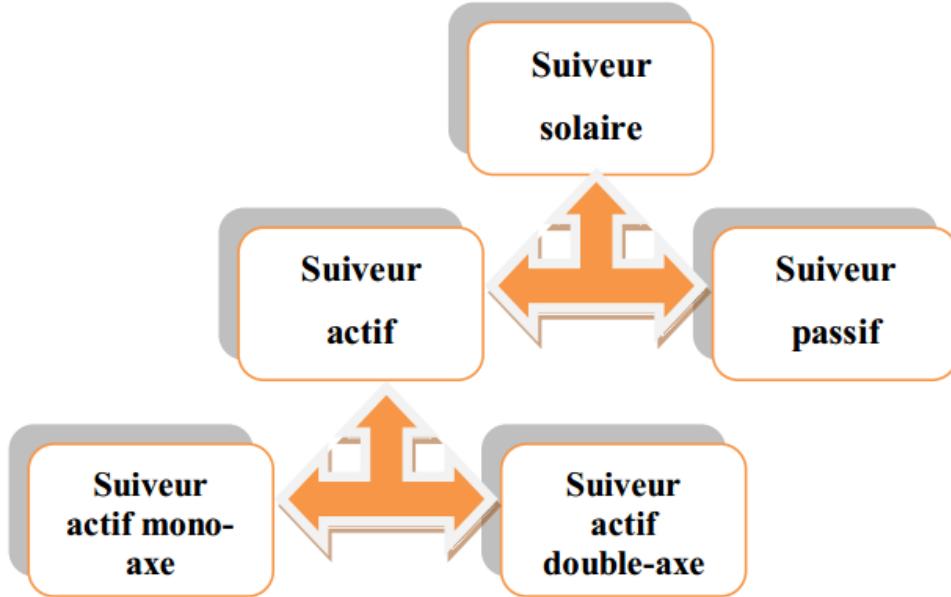


Figure (II.1) : Types de suiveurs solaires.

II.2.1.1. Suiveurs solaire passif :

Un suiveur solaire passif est constitué dans son architecture de deux tubes en cuivre montés sur les côtés Est et Ouest du capteur. Le tube de matière cuivre (figure II.2) est rempli de fluides chimiques capables de se vaporiser à basse température. En effet, lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente, la température d'un côté du panneau augmente et le composé dans le tube en cuivre 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 capteur en le faisant tourner vers la source des rayons solaires. Ce type de suiveur ne consomme aucune énergie pour le repositionnement du panneau [32].

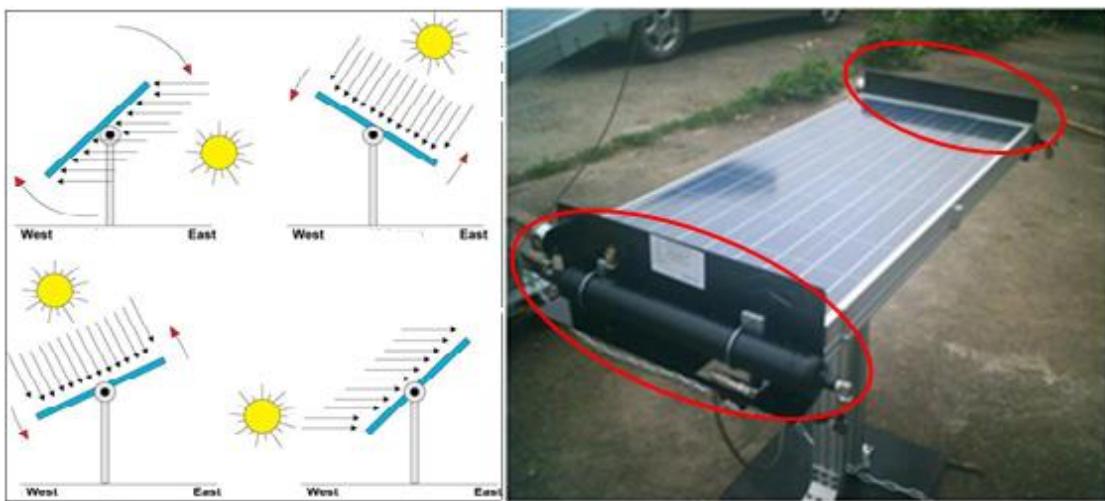


Figure (II.2) : Suiveur solaire passif [32].

II.2.1.2. Suiveur solaire actif :

Les suiveurs solaires actifs usent le principe de détection de la lumière successive la trajectoire solaire tout en s'efforçant d'optimiser au maximum l'angle d'incidence du rayonnement solaire à leur surface. Il existe deux types de trackers : les trackers à un axe et les trackers à deux axes. Ce dernier se caractérise par un contrôle minutieux et ne nécessite aucune intervention manuelle de la part d'un être humain [33].

II.2.1.2.1. Suiveur solaire mono-axe :

Les systèmes de suivi à axe unique réalisent le mouvement d'élévation ou d'azimut du système d'énergie solaire. Lequel de ces mouvements est souhaitable dépend de la technologie utilisée dans le tracker. Le tracker à axe unique ne peut tourner que dans un seul plan - horizontalement ou verticalement. Cela le rend moins complexe et généralement moins coûteux qu'un tracker à deux axes. Les trackers utilisent des actionneurs pour diriger le tracker selon les besoins par un contrôleur qui répond à la direction du soleil [31].

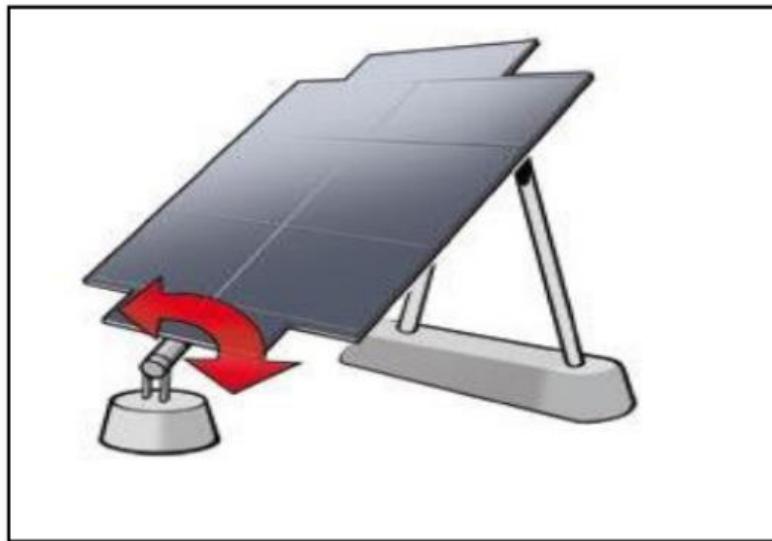


Figure (II.3) : Panneaux solaires avec système de poursuite mono-axiale [31].

II.2.1.2.2. Suiveur solaire double axe :

Contrairement au précédent, ce traqueur solaire possède deux axes ce qui lui permet de ne pas suivre seulement un mouvement en azimut. En effet, grâce à son deuxième axe, le traqueur peut s'orienter en hauteur au gré des saisons. Ainsi ce système suit le soleil sous des angles multiples afin d'être toujours dans la meilleure position à chaque instant pour que le panneau soit irradié au maximum. La méthode de suivi solaire à deux axes est donc idéale puisqu'elle permet de suivre la course du soleil tout au long de la journée en variant la hauteur si nécessaire pour un résultat optimal. Ce type de suiveur est très imposant et fournit de meilleures performances par rapport au suiveur mono-axe [29].



Figure (II.4) : Panneau solaire avec système de poursuite bi-axiale [29].

II.3. Généralité sur d'Arduino

II.3.1. Microcontrôleur [34] :

Un microcontrôleur est un circuit intégré compact conçu pour régir une opération spécifique dans un système embarqué. Un microcontrôleur typique comprend un processeur, une mémoire et des périphériques d'entrée/sortie (E/S) sur une seule puce. Parfois appelés contrôleur intégré ou unité de microcontrôleur, les microcontrôleurs se trouvent dans les véhicules, les robots, les machines de bureau, les appareils médicaux, les émetteurs-récepteurs radio mobiles, les distributeurs automatiques et les appareils électroménagers, entre autres appareils. Ce sont essentiellement de simples ordinateurs personnels miniatures (PC) conçus pour contrôler de petites fonctionnalités d'un composant plus grand, sans système d'exploitation frontal complexe.

Un microcontrôleur est intégré à l'intérieur d'un système pour contrôler une fonction singulière dans un appareil. Pour ce faire, il interprète les données qu'il reçoit de ses périphériques d'E/S à l'aide de son processeur central. Les informations temporaires que le microcontrôleur reçoit sont stockées dans sa mémoire de données, où le processeur y accède et utilise des instructions stockées dans sa mémoire de programme pour déchiffrer et appliquer les données entrantes. Il utilise ensuite ses périphériques d'E/S pour communiquer et exécuter l'action appropriée. Les microcontrôleurs sont utilisés dans un large éventail de systèmes et d'appareils. Les appareils utilisent souvent plusieurs microcontrôleurs qui fonctionnent ensemble dans l'appareil pour gérer leurs tâches respectives [34].

➤ Type de microcontrôleur

Les microcontrôleurs courants incluent le MCS-51 d'Intel, souvent appelé microcontrôleur 8051, qui a été développé pour la première fois en 1985 ; le microcontrôleur AVR développé par Atmel en 1996 ; le contrôleur d'interface programmable (PIC) de Microchip Technology ; et divers microcontrôleurs Advanced RISC Machines (ARM) sous licence.



Figure (II.5) : Le microcontrôleur Microchip Technology ATTiny817 [34].

II.3.2. Partie programme software :

Une telle carte d'acquisition qui se base sur sa construction sur un microcontrôleur doit être dotée d'une interface de programmation comme est le cas de notre carte. L'environnement de programmation open-source pour Arduino peut être téléchargé gratuitement (pour Mac OS X, Windows, et Linux) [35].

II.3.2.1. L'environnement de la programmation : le logiciel (IDE) :

L'environnement de développement intégré (EDI/IDE) est un logiciel qui permet de programmer les cartes Arduino. Il est simple à user pour les nouveaux apprenants, tout en étant assez souple pour que les professionnels puissent en tirer profit également [36].

Le logiciel de programmation de la carte Arduino sert d'éditeur de code (langage proche du C). Une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte à travers de la liaison USB. Le câble USB alimente à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information ce programme appelé IDE Arduino [35].

L'IDE d'Arduino permet :

- D'éditer un programme
- Rassemblé ce programme
- De téléverser le programme dans la mémoire de l'Arduino,
- De communiquer avec la carte Arduino grâce au terminal [35].

II.3.2.2. L'architecture générale du logiciel :

Dans la figure qui suit à un objectif d'éclaircir la structure du logiciel, nous avons partagés la fenêtre en quatre cadres principaux :



Figure (II.6) : L'interface de l'IDE Arduino en détail.

- **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. C'est le **débogueur** [37].

II.3.2.3. Injection du programme :

Avant de transmettre un programme dans la carte, il est obligatoire de sélectionner le type de la carte (Arduino UNO) et le numéro de port USB (COM) comme à titre d'exemple cette figure suivante [38].

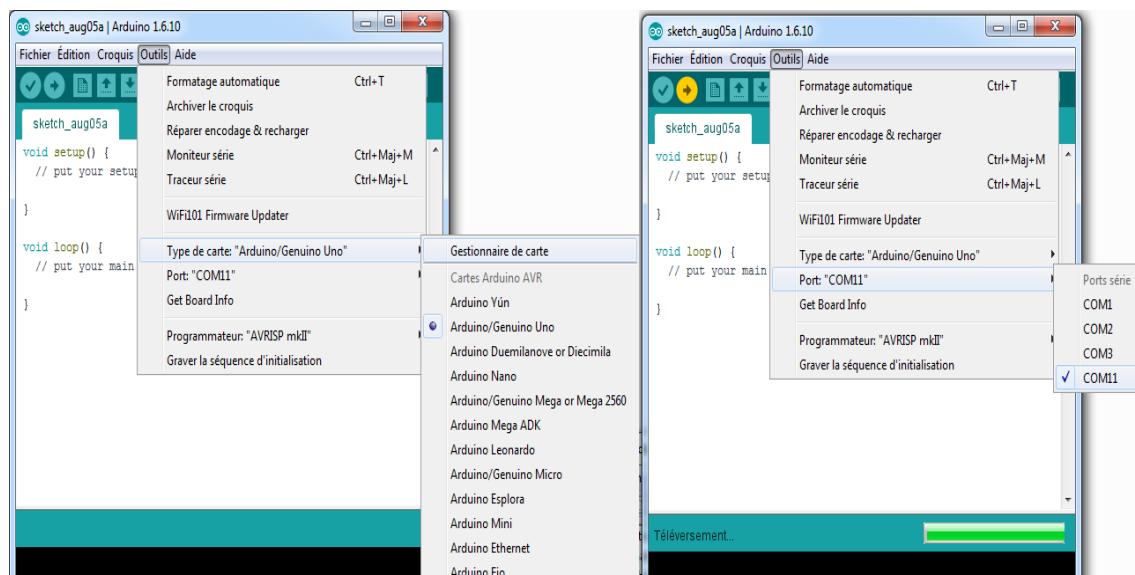


Figure (II.7) : Paramétrage de la carte.

II.3.2.4. Programmation en Arduino :

L'IDE possède principalement deux parties de base : l'éditeur et le compilateur, le premier est employé pour écrire le code requis, et le deuxième est usé pour compiler et télécharger le code dans le module Arduino donné. Les langages C et C ++ sont prise en charge par Cet environnement. Le programme principal est structuré en deux fonctions, dont voici les signatures ultra simples :

- **Void setup ()**
- **Void Loop ()**

Setup () : est appelée une seule fois, au moment de la mise sous tension de la carte.
Loop () : est appelée, en boucle. Elle est lancée après **setup ()**, et tourne à fond à l'infini (tant que la carte est alimentée en tout cas) [36].

Donc pour retourner sur notre programme de base est organisé de la façon suivante (Figure II.8) :

```
sketch_mar22a§
void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
}
```

Figure (II.8) : Structure de programme principal.

II.3.2.5. Les étapes de téléchargement du programme :

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

- On conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel IDE Arduino.
- On vérifie ce programme avec le logiciel Arduino (compilation).
- Si des erreurs sont signalées, on modifie le programme.
- On charge le programme sur la carte.
- On câble le montage électronique.
- L'exécution du programme est automatique après quelques secondes.
- On alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation autonome (Pile 9v).
- On vérifie que notre montage fonctionne [38].

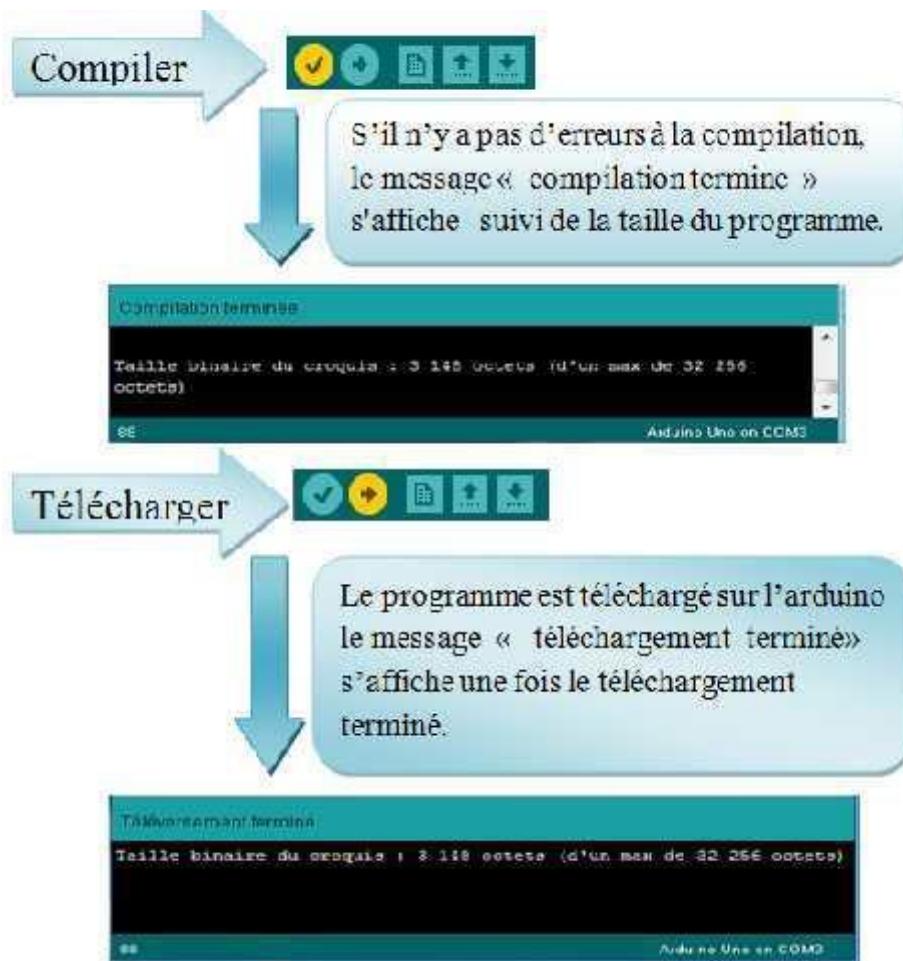


Figure (II.9) : Les étapes de téléchargement du code

II.3.3. Carte d'Arduino :

II.3.3.1. Définition :

La carte Arduino est une carte électronique basée autour d'un microcontrôleur et de composants minimums pour réaliser des fonctions plus ou moins évoluées à bas coût. Elle possède une interface USB pour la programmer. C'est une plateforme open-source qui est basée sur une simple carte à microcontrôleur (de la famille AVR), et un logiciel, véritable environnement de développement intégré, pour écrire, compiler et transférer le programme vers la carte à microcontrôleur.

Arduino est peut-être utilisé pour développer des applications matérielles industrielles légères ou des objets interactifs, et il peut recevoir en entrées une très grande variété de capteurs. Les projets Arduino peuvent être autonomes, ou communiquer avec des logiciels sur un ordinateur (Flash, Processing ou MaxMSP, LabVIEW). Les cartes électroniques peuvent être fabriquées manuellement ou bien être achetées prises assemblées, le logiciel de développement open-source est

téléchargé gratuitement [39]. Chaque module d'Arduino possède un régulateur de tension +5 V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles) [40].

La programmation de la carte Arduino présente les principales fonctionnalités de l'interface de l'application Arduino. L'application Arduino vous permet de créer et éditer un programme (appelé sketch) qui sera compilé puis téléchargé sur la carte Arduino. Ainsi, lorsque vous apportez des changements sur le code, ces changements ne seront effectifs qu'une fois le programme téléchargé sur la carte [39].

II.3.3.2. Caractéristique de la carte Arduino :

Voici quelques-unes des caractéristiques les plus importantes de la carte Arduino :

- **Peu coûteux** : les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses par rapport aux autres plates-formes.
- **Multiplateforme** : l'environnement Arduino, écrit en java, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
- **Un environnement de programmation claire et simple** : l'environnement de programmation Arduino est facile à utiliser pour les débutants, tous en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puissent en tirer profit également.
- **Le logiciel open source est évolutif** : Le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous une licence open source, disponibles et peuvent être complétés par des programmeurs expérimentés.
- **Matériel open source est extensible** : les cartes Arduino sont basées sur les microcontrôleurs Atmel ATMEGA2560, ATMEGA 168, ATMEGA 328, etc. les schémas des modules sont publiés sous une licence créative Commons, et le concepteur de circuits expérimentés peuvent réaliser leurs propres versions des cartes Arduino, en les complétant et en les améliorant.
- La carte Arduino permet le stockage et l'exécution d'un programme.
- La carte reçoit des renseignements analogiques ou numériques sur ces entrées et crée des renseignements analogiques ou numériques.
- Le microcontrôleur traitera ces renseignements et les transmettra aux sorties numériques.
- Récupérer les données du capteur pour les envoyer à l'interface de commande (PC) et traduire les instructions de fonctionnement des actionneurs [41].

II.3.4. Le type d'Arduino :

II.3.4.1. Arduino UNO :

La carte Arduino Uno est un microcontrôleur basé sur l'ATmega328. Il dispose de 14 broches d'entrée/sortie numériques dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM, d'un résonateur céramique 16 MHz, d'un connecteur ICSP, d'une connexion USB, de 6 entrées analogiques, d'une prise d'alimentation et d'un bouton de réinitialisation. Celui-ci contient tout le support requis pour le microcontrôleur. Pour commencer, ils sont simplement connectés à un ordinateur avec un câble USB ou avec un adaptateur AC-DC ou une batterie. La carte Arduino Uno diffère de toutes les autres cartes et elles n'utiliseront pas la puce de pilote FTDI USB-série qu'elles contiennent. Il est présenté par l'Atmega16U2 (Atmega8U2 jusqu'à la version R2) programmé comme un convertisseur USB-série [42].

Le matériel est doté d'une carte matérielle open source conçue autour d'un microcontrôleur Atmel AVR 8 bits ou d'un Atmel ARM 32 bits. Les modèles actuels consistent en une interface USB, 6 broches d'entrée analogiques et 14 broches d'E/S numériques qui permettent à l'utilisateur de connecter diverses cartes d'extension [42].

"Uno" signifie un en italien et a été choisi pour marquer la sortie du logiciel Arduino (IDE) 1.0. La carte Uno et la version 1.0 du logiciel Arduino (IDE) étaient les versions de référence d'Arduino, maintenant évoluées vers des versions plus récentes. La carte Uno est la première d'une série de cartes USB Arduino, et le modèle de référence pour la plate-forme Arduino [43].

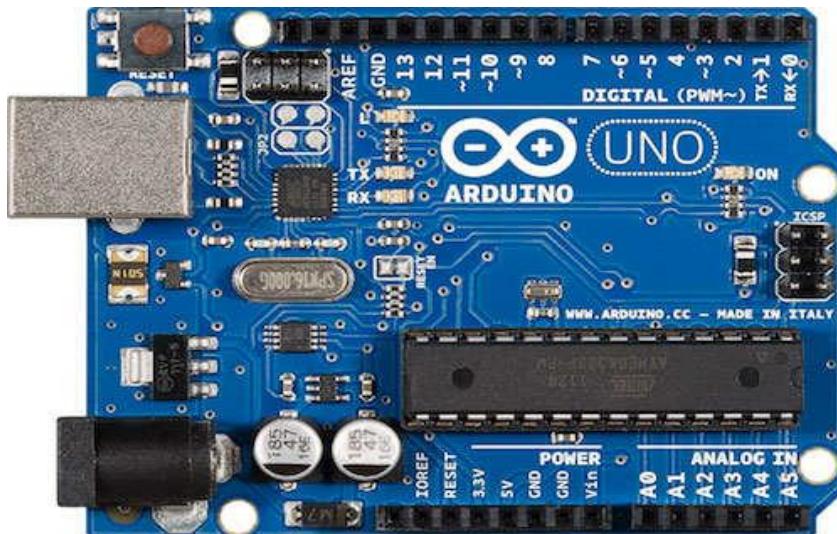


Figure (II.10) : La carte Arduino UNO [44].

➤ Caractéristiques techniques :

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	6entrées analogiques
Courant maxi. Par broche d'E/S (c.c.)	40mA
Courant maxi. Par broche 3,3 V	50mA
Mémoire EEPROM	1 ko
Mémoire SRAM	2 ko
Mémoire FLASH	32 ko
Chargeur d'amorçage	0,5 Ko (en mémoire Flash)
Interface	USB

Tableau (II.1) : Les caractéristiques technique d'Arduino Uno [44].

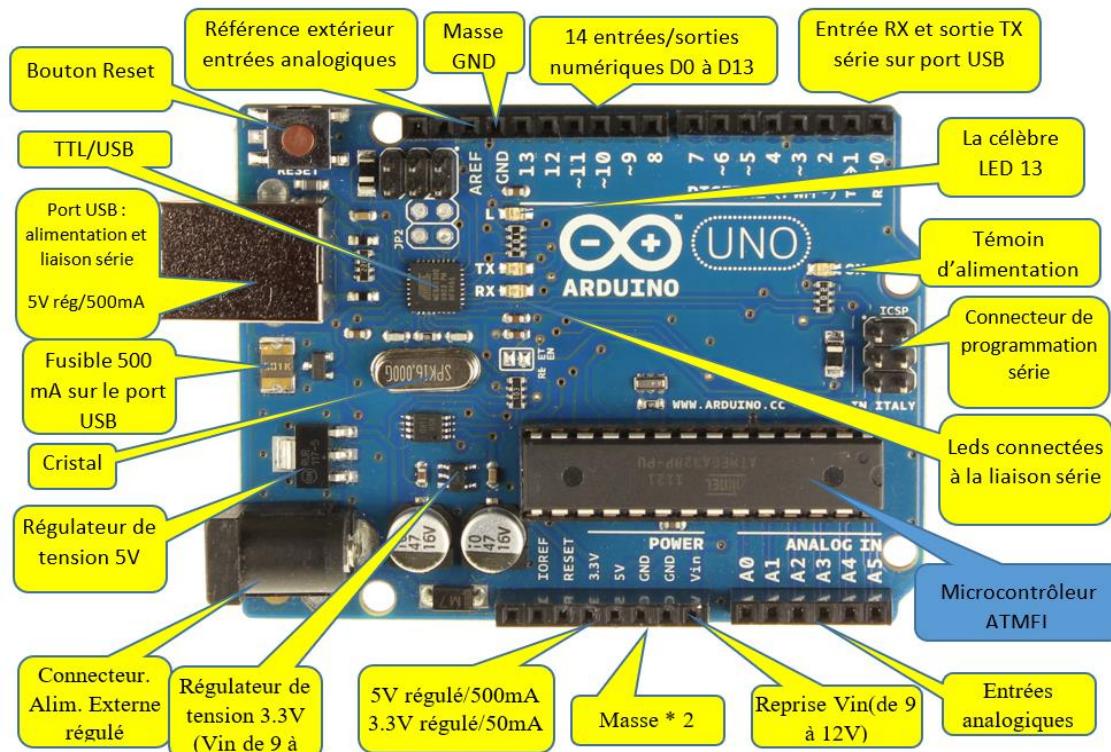


Figure (II.11) : Description de la carte Arduino Uno [45].

II.3.4.2. L'Arduino Nano :

La carte Arduino Nano possède des connecteurs au dos qui permettent de l'enficher facilement sur une plaque d'essais, ce qui évite d'avoir recours à des cavaliers flexibles, comme pour l'Arduino Uno. Ne vous laissez pas abuser par les dimensions de cette minicarte dont les performances n'ont (presque) rien à envier à L'Arduino Uno [44].

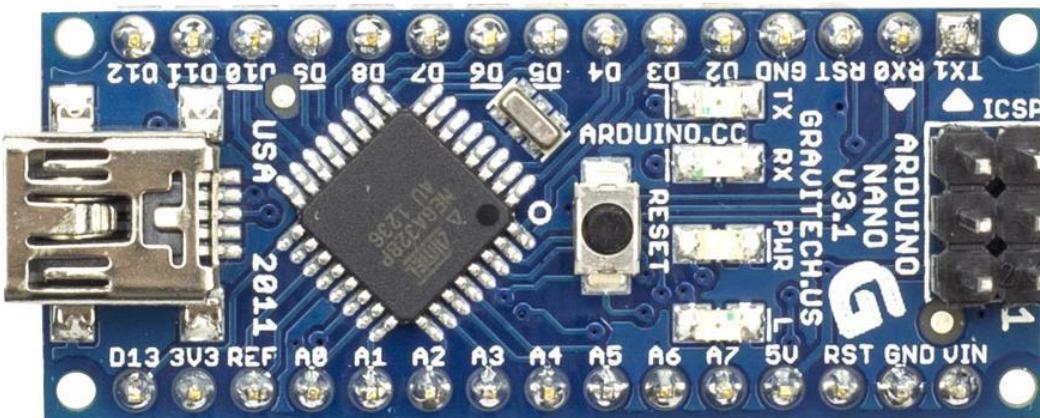


Figure (II.12) : La carte Arduino Nano [44].

➤ Caractéristiques techniques :

Catégorie	Valeur
Microcontrôleur	ATmega 168 OU 328
Fréquence d'horloge	16 MHz
Tension de service	5 V
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	8 entrées analogiques
Courant maxi. Par broche d'E/S (c.c.)	40mA
Mémoire	ATmega 168: 16 Ko memoire Flash 1KoSRAM 512 octets d'EEPROM ATmega 328: 32 Ko memoire Flash

	2KoSRAM 1Ko EEPROM
Chargeur d'amorçage	2Ko (en mémoire Flash)
Interface	USB

Tableau (II.2) : Les caractéristiques technique d'Arduino Nano [44].

II.3.4.3. L'Arduino Mini

L'Arduino Mini utilise lui aussi le microcontrôleur ATmega328P, mais il est encore un peu plus petit que l'Arduino Nano. Il possède huit entrées analogiques (au lieu de six pour l'Arduino Uno), mais il ne possède pas de contrôleur USB. Il faut donc utiliser un contrôleur externe pour le relier à l'ordinateur. Concernant son alimentation, il est plus exigeant, car il accepte seulement les tensions comprises entre 7 et 9 V (à sa borne Vin).

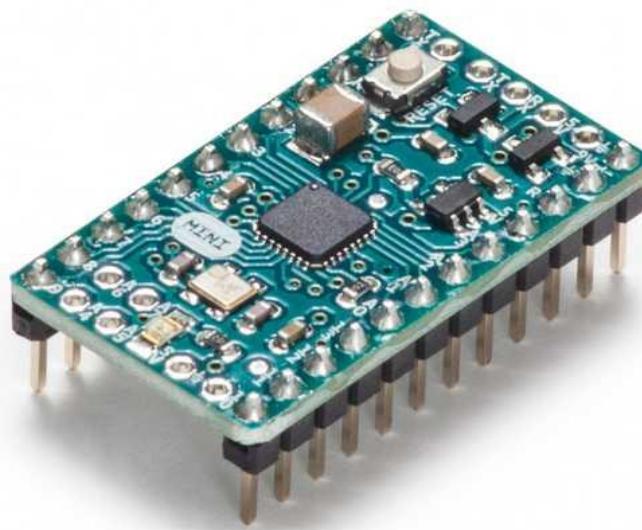


Figure (II.13) : La carte Arduino Mini [46]

- **Caractéristiques techniques :** identiques à l'Arduino Uno (excepté le nombre d'entrées analogiques, la tension d'alimentation et le contrôleur USB).

II.3.4.4. L'Arduino Leonardo :

Il ressemble beaucoup à l'Arduino Uno, mais il intègre un autre microcontrôleur qui assure aussi le rôle de contrôleur USB. Cette particularité lui permet d'être reconnu par l'ordinateur comme un périphérique USB classique (clavier ou souris). Il offre autant d'entrées/sorties que

l'Arduino Uno (20), mais possède quelques entrées analogiques en plus (soit 12 au total). Son format lui donne accès à la plupart des cartes d'extension [47].

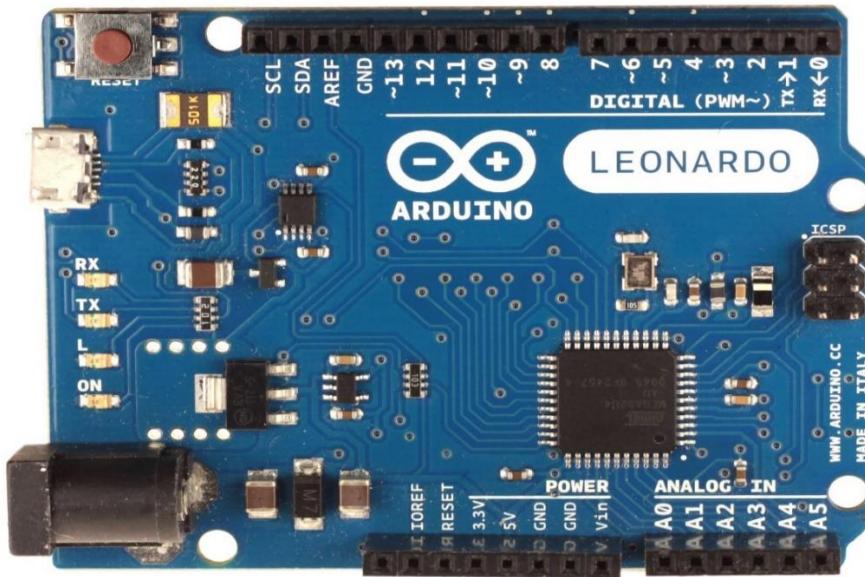


Figure (II.14) : La carte Arduino Leonardo [47].

➤ **Caractéristiques techniques :**

Catégorie	Valeur
Microcontrôleur	ATmega32U4
Tension d'entrée	7V à 12V
Tension de fonctionnement	5V
Fréquence	16 MHz
Entrées analogiques	12
Sorties analogiques virtuelles (PWM)	7
Entrées/sorties numériques	20
Mémoire EEPROM	1ko
Mémoire SRAM	2.5ko
Mémoire FLASH	32 ko
Interface	USB

Tableau (II.3) : Les caractéristiques technique d'Arduino Leonardo [47].

II.3.4.5. L'Arduino Méga 2560 :

Bien que cadencé à la même fréquence que l'Arduino Uno, Son microcontrôleur (ATmega2560l), dispose beaucoup plus de mémoire. Il est plus long, puisqu'il possède beaucoup plus de connecteurs. Néanmoins, Il reste compatible avec les cartes d'extension au format classique tout en profitant de ses propres Shields. Il intègre au moins seize entrées analogiques et de cinquante-quatre entrées/sorties numériques dont quinze sorties analogiques virtuelles(PWM). Grâce à ses nombreux connecteurs, il permet de réaliser des projets beaucoup plus ambitieux que l'Arduino Uno, or il faudra connecter une alimentation externe à la prise jack, car la prise USB de l'ordinateur ne peut fournir que 500 mA, car cela risque d'être insuffisant et peut causer des problèmes de fonctionnement (plantages aléatoires de l'Arduino) [47].

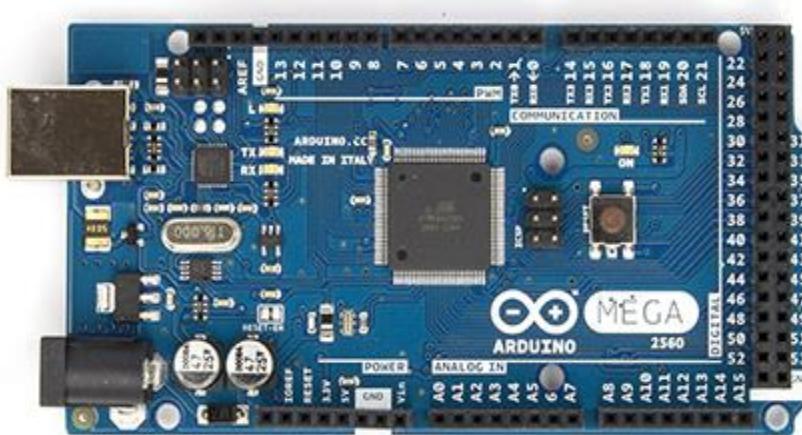
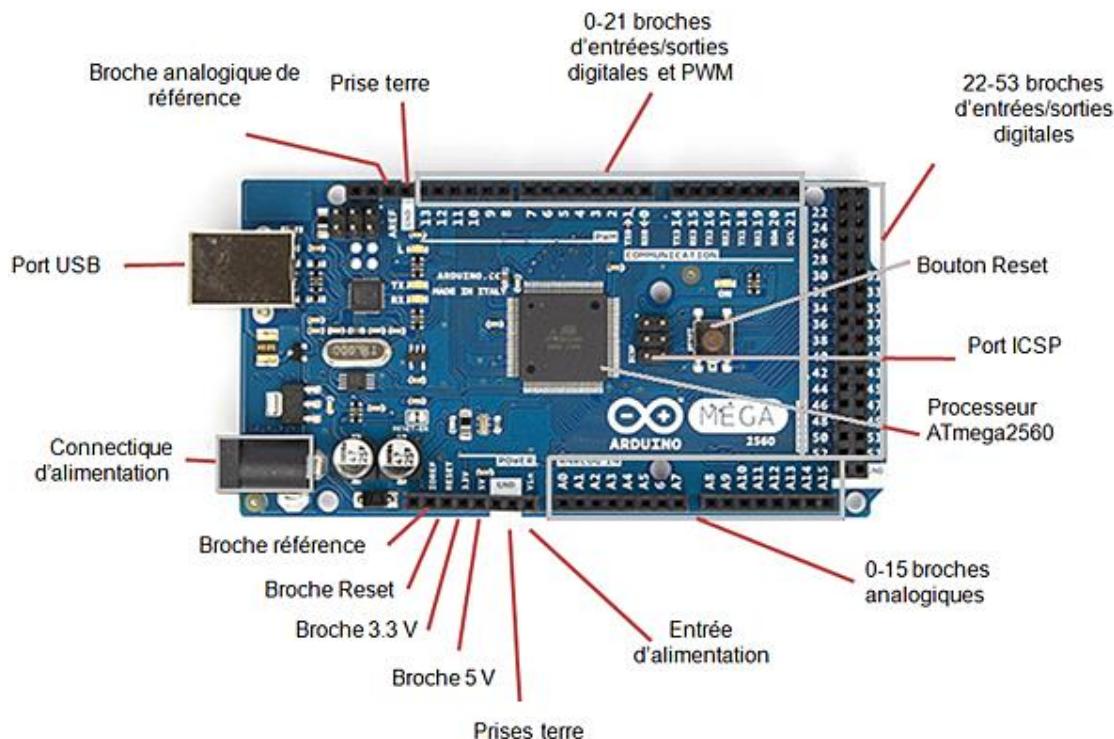


Figure (II.15) : La carte Arduino Méga 2560 [48].

➤ **Caractéristiques techniques :**

Catégorie	Valeur
Microcontrôleur	ATmega2560
Fréquence d'horloge	16MHz
Tension de service	5V
Tension d'entrée (recommandée)	7-12V
Tension d'entrée (limites)	6-20V
Ports numériques	54 entrées et sorties (15 sorties commutables en MLI)
Ports-analogiques	16 entrées analogiques
Courant maxi. Par broche d'E/S (c.c.)	40 mA
Courant maxi. Par broche 3,3 V	50 mA

Mémoire EEPROM	4ko
Mémoire SRAM	8 ko
Mémoire FLASH	256 ko
Chargeur d'amorçage	8Ko (en mémoire Flash)
Interface	USB

Tableau (II.4) : Les caractéristiques technique d'Arduino Méga 2560.[48]**Figure (II.16) :** Description des entrées/sorties de la carte Arduino Méga 2560.

II.3.4.6. L'Arduino due :

Il utilise le même format que l'Arduino Méga, mais il possède quand même un microcontrôleur plus puissant et beaucoup plus de mémoire. Malgré cela, ses entrées/sorties fonctionnent à la tension de 3,3 V (au lieu de 5 V). Chose qui peut le rendre incompatible avec des modules et des connecteurs d'extension destinés pour d'autres modèles.

En fait, c'est l'Arduino idéal, si votre projet exige une grande puissance de calcul et nécessite de nombreuses entrées et sorties. Comme pour l'Arduino Méga. Il faudra certainement ajouter une alimentation externe à la prise jack. Car la prise USB de l'ordinateur, limitée à 800 mA, risque d'atteindre rapidement ses limites [49].

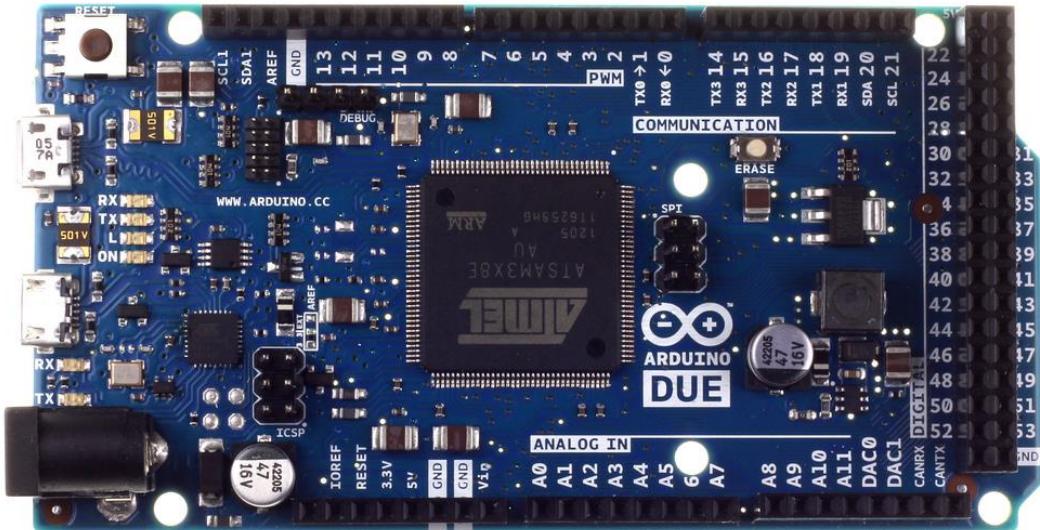


Figure (II.17) : La carte Arduino due [49].

➤ **Caractéristiques techniques :**

Catégorie	Valeur
Microcontrôleur	AT91SAM3X8E
Fréquence d'horloge	84 MHz
Tension de fonctionnement	3.3V
Tension d'entrée (recommandée)	7-12V
Tension d'entrée (limites)	6-20V
Ports numériques	54 (dont 12 fournissent une sortie PWM)
Ports d'entrée analogiques	12
Ports de sortie analogiques	2
Courant de sortie CC total sur toutes les lignes d'E/S :	130 mA
Courant continu Par broche d'E/S 3.3V	800 mA
Courant continu Par broche 5 V	800 mA
Mémoire EEPROM	-
Mémoire SRAM	96 Ko (deux banques : 64 Ko et 32 Ko)
Mémoire FLASH	512 Ko
Interface	USB

Tableau (II.5) : Les caractéristiques technique d'Arduino due

II.3.4.7. Arduino LilyPad :

Il est question d'une carte très spéciale étant donné qu'elle permet d'intégrer un Arduino aux vêtements. Elle est lavable (à condition de retirer l'alimentation), elle contient de nombreux modules spécifiques et utilise du fil de couture un peu spécial (conduisant l'électricité) pour communiquer avec les différents éléments. Il existe quatre modèles de LilyPad, uniquement un seul qui possède un connecteur USB.

Il faut signaler également qu'ces cartes LilyPad utilisent une fréquence plus basse que les cartes classiques pour de réduire la vitesse (et donc la consommation) de la carte [47].

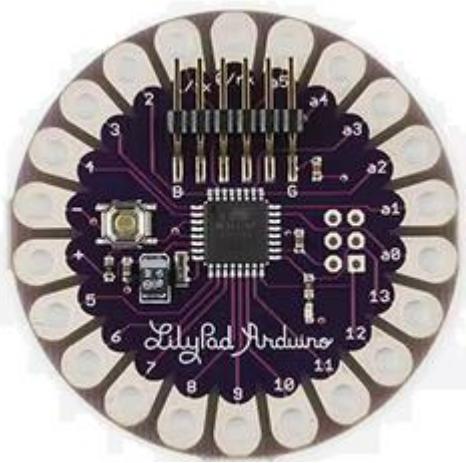


Figure (II.18) : La carte Arduino Lily Pad [47].

➤ Caractéristiques techniques :

Catégorie	Valeur		
Modèle	Lilypad Simple (et SimpleSnap)	LilyPad Main Board	LilyPad USB
Microcontrôleur	ATmega328P	ATmega168 ou ATmega328V	ATmega32u4
Tension d'entrée	2,7V à 5,5 V	2.7V à 5.5V	3.8V à 5V
Tension de fonctionnement	2.7V à 5,5V	2.7V à 5.5 V	3,3V
Fréquence	8 MHz	8MHz	8 MHz
Entrées analogiques	4	6	4
Sorties analogiques virtuelles (PWM)	5	6	4

Entrées/sorties numériques	9	14	9
Mémoire EEPROM	1ko	0,5ko	1ko
Mémoire SRAM	2 ko	1	2.5ko
Mémoire FLASH	32ko	16 ko	32ko
Interface	-	-	USB

Tableau (II.6) : Les caractéristiques technique d'Arduino LilyPad.

L'Arduino LilyPad SimpleSnap possède les mêmes caractéristiques que le LilyPad Simple. La différence est qu'il intègre une batterie rechargeable. Li n'est donc pas lavable, mais ses connecteurs sont des boutons pressions qui permettent de le retirer avant le lavage.

II.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les dernières méthodes de surveillance. Une attention particulière a été portée à la technologie de suivi actif ou contrôlé basée sur le principe du suivi via des capteurs de lumière. La technologie que nous avons adoptée sera étudiée.

Ensuite, nous abordons le microcontrôleur et la carte d'acquisition Arduino, expliquons les raisons de leur choix, puis abordons les différents types de cette dernière. Nous avons également expliqué le principe de fonctionnement de la carte Arduino sans oublier ses caractéristiques et le logiciel utilisé pour la faire fonctionner.

Dans le chapitre suivant, nous parlerons des matériaux utilisés pour fabriquer notre tracker.

CHAPITRE III

Programmation Et Réalisation D'un Suiveur Solaire

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons créer un tracker solaire basé sur une carte Arduino. Cet appareil comprend deux servomoteurs et une carte Arduino UNO.

Le système de guidage est basé sur la programmation de la carte Arduino pour déplacer les panneaux solaires à des intervalles prédefinis (entre le lever et le coucher du soleil) selon la course du soleil pendant la journée afin que le rayonnement solaire soit perpendiculaire à ce tracker solaire afin de maintenir la puissance maximale produite par les panneaux solaires.

III.2. Matériel utilisé dans le projet :

III.2.1. Arduino UNO :

La carte Arduino Uno est un microcontrôleur basé sur l'ATmega328. Il dispose de 14 broches d'entrée/sortie numériques dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM, d'un résonateur céramique 16 MHz, d'un connecteur ICSP, d'une connexion USB, de 6 entrées analogiques, d'une prise d'alimentation et d'un bouton de réinitialisation. Celui-ci contient tout le support requis pour le microcontrôleur. Pour commencer, ils sont simplement connectés à un ordinateur avec un câble USB ou avec un adaptateur AC-DC ou une batterie. La carte Arduino Uno diffère de toutes les autres cartes et elles n'utiliseront pas la puce de pilote FTDI USB-série qu'elles contiennent. Il est présenté par l'Atmega16U2 (Atmega8U2 jusqu'à la version R2) programmé comme un convertisseur USB-série [42].

Le matériel est doté d'une carte matérielle open source conçue autour d'un microcontrôleur Atmel AVR 8 bits ou d'un Atmel ARM 32 bits. Les modèles actuels consistent en une interface USB, 6 broches d'entrée analogiques et 14 broches d'E/S numériques qui permettent à l'utilisateur de connecter diverses cartes d'extension [42].

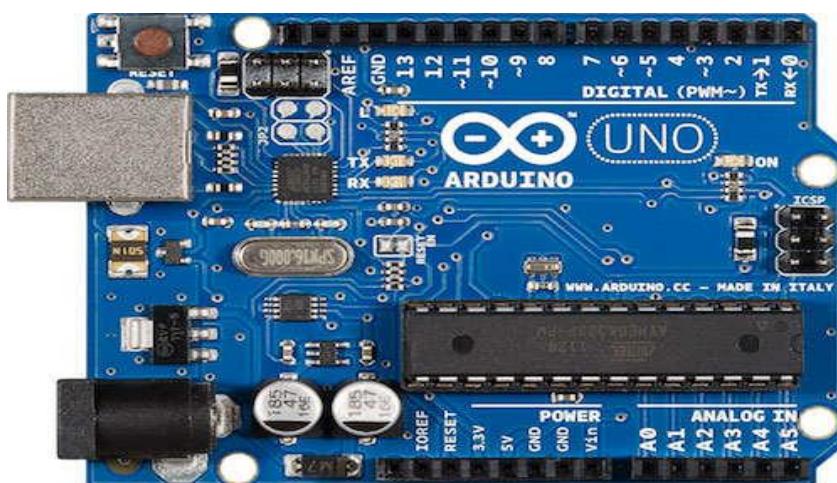


Figure (III.1) : La carte Arduino UNO [44].

➤ **Caractéristiques techniques :**

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	6entrees analogiques
Courant maxi. Par broche d'E/S (c.c.)	40mA
Courant maxi. Par broche 3,3 V	50mA
Mémoire EEPROM	1 ko
Mémoire SRAM	2 ko
Mémoire FLASH	32 ko
Chargeur d'amorçage	0,5 Ko (en mémoire Flash)
Interface	USB
Dimensions	6,86 cm x 5,3 cm

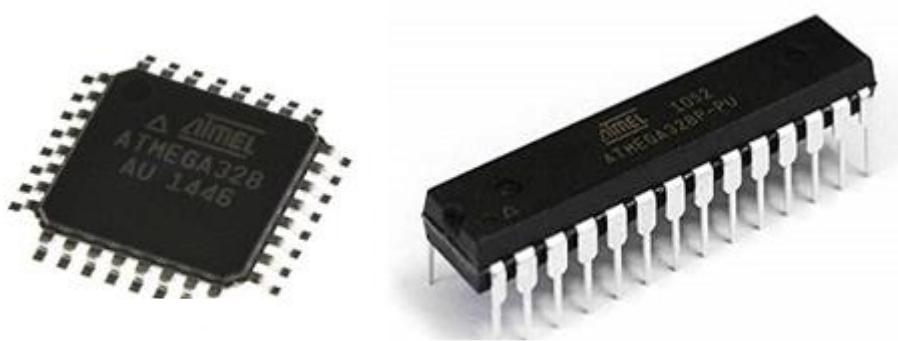
Tableau (III.1) : Les caractéristiques technique d'Arduino Uno [44].

III.2.1.1. La constitution de la carte Arduino UNO :

Un module Arduino est souvent composé d'un microcontrôleur ATMEL AVR et de composants supplémentaires qui facilitent la programmation et la connexion avec d'autres circuits. Un régulateur linéaire 5V et un oscillateur à cristal 16 MHz sont inclus dans chaque module. Un programmeur séparé n'est pas nécessaire car le microcontrôleur est préprogrammé avec un chargeur de démarrage.

III.2.1.1.1. Le Microcontrôleur ATMEga328 :

Un microcontrôleur ATMEga328 est un circuit intégré qui rassemble sur une puce plusieurs éléments complexes dans un espace réduit au temps des pionniers de l'électronique. De nos jours, par la soudure de nombreux composants volumineux ; tels que les transistors ; les résistances et les condensateurs tout peut être logé dans un petit boîtier en plastique noir muni d'un certain nombre de broches dont la programmation peut être réalisée en langage C. la figure III.2 montre un microcontrôleur ATmega 328, qu'on trouve sur la carte Arduino [50].



La composant CMS

La composant classique

Figure (III.2) : Microcontrôleur ATmega328.

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

- **La mémoire Flash** : C'est celle qui contiendra le programme à exécuter. Cette mémoire est effaçable et réinscriptible mémoire programme de 32Ko (dont bootloader de 0.5 ko).
- **RAM** : c'est la mémoire dite "vive", elle va contenir les variables du programme. Elle est dite "volatile" car elle s'efface si on coupe l'alimentation du microcontrôleur. Sa capacité est 2 ko.
- **EEPROM** : C'est le disque dur du microcontrôleur. On y enregistre des infos qui ont besoin de survivre dans le temps, même si la carte doit être arrêtée. Cette mémoire ne s'efface pas lorsque l'on éteint le microcontrôleur ou lorsqu'on le reprogramme [51].

III.2.1.1.2. Les sources de l'alimentation de la carte :

La carte Arduino UNO peut être alimentée par l'USB ou par une alimentation externe. La source est sélectionnée automatiquement. La tension d'alimentation extérieure (hors USB) peut venir soit d'un adaptateur AC-DC ou de piles.

L'adaptateur peut être connecté grâce à un ‘jack’ de 2.1mm positif au centre. Le raccordement vers un bloc de piles peut utiliser les bornes Gnd et Vin du connecteur d'alimentation (POWER). La carte peut fonctionner à l'aide d'une tension extérieure de 7 à 12 volts. Les broches (pins) d'alimentation sont les suivantes :

- **VIN** : La tension d'entrée positive lorsque la carte Arduino est utilisée avec une source de tension externe (à distinguer du 5V de la connexion USB ou autre source 5V régulée). Vous pouvez alimenter la carte à l'aide de cette broche, ou, si l'alimentation est fournie par le jack d'alimentation, accéder à la tension d'alimentation sur cette broche.
- **5V** : La tension régulée utilisée pour faire fonctionner le microcontrôleur et les autres composants de la carte (pour info : les circuits électroniques numériques nécessitent une tension d'alimentation parfaitement stable dite « tension régulée » obtenue à l'aide d'un composant appelé un régulateur et qui est intégré à la carte Arduino). Le 5V régulé fourni par cette broche peut donc provenir soit de la tension d'alimentation VIN via le régulateur de la carte, ou bien de la connexion USB (qui fournit du 5V régulé) ou de tout autre source d'alimentation régulée.
- **3.3V** : Une alimentation de 3.3V fournie par le circuit intégré FTDI (circuit intégré faisant l'adaptation du signal entre le port USB de votre ordinateur et le port série de l'Atmega) de la carte est disponible : ceci est intéressant pour certains circuits externes nécessitant cette tension au lieu du 5V). L'intensité maximale disponible sur cette broche est de 50mA
- **GND**. Broche de masse (ou 0V) [52].

III.2.1.1.3. Les entrées & sorties :

Cette carte possède 14 broches numériques (numérotée de 0 à 13) peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, en utilisant les instructions pinMode (), digitalWrite () et digitalRead () du langage Arduino. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir un maximum de 40mA d'intensité et dispose d'une résistance interne de "rappel au plus" (pull-up) (déconnectée par défaut) de 20-50 KOhms. Cette résistance interne s'active sur une broche en entrée à l'aide de l'instruction digital Write (broche, HIGH). [53]

- **Interruptions Externes** : Broches 2 et 3. Ces broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, sur un front montant ou descendant, ou sur un changement de valeur.
- **Impulsion PWM** (largeur d'impulsion modulée) : Broches 3, 5, 6, 9, 10, et 11. Fournissent une impulsion PWM 8-bits à l'aide de l'instruction analogWrite () .
- **SPI** (Interface Série Périphérique) : Broches 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Ces broches supportent la communication SPI (Interface Série Périphérique) disponible

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

- **I2C** : Broches 4 (SDA) et 5 (SCL). Supportent les communications de protocole I2C (ou interface TWI (TwoWire Interface - Interface "2 fils"), disponible en utilisant la librairie Wire/I2C (ou TWI - Two-Wire interface interface "2 fils").
- **LED** : Broche 13. Il y a une LED incluse dans la carte connectée à la broche 13. Lorsque la broche est au niveau HAUT, la LED est allumée, lorsque la broche est au niveau BAS, la LED est éteinte [53].
- **Autres broches** :
 - Il y a deux autres broches disponibles sur la carte :
 - **AREF** : Tension de référence pour les entrées analogiques (si différent du 5V), utilisée avec l'instruction **analogReference ()**. Elle s'utilise pour réduire
 - **Reset** : Mettre cette broche au niveau BAS entraîne la réinitialisation du microcontrôleur. Typiquement, cette broche est utilisée pour ajouter un bouton de réinitialisation sur le circuit qui bloque celui présent sur la carte [54].

III.2.2. Servomoteur :

III.2.2.1. Présentation :

Les servomoteurs sont un petit moteur spécial, qui peut pivoter avec une liberté d'environ 180° et maintenir relativement précis l'angle de rotation que nous voulons obtenir.

Les servomoteurs sont également couramment utilisés en robotique pour fabriquer des minirobots, des actionneurs ou des indicateurs rotatifs. [55].

Un servomoteur est composé d'un :

- Un micro moteur à courant continu.
- Un réducteur en sortie de ce moteur diminuant la vitesse et augmentant le couple.
- Un potentiomètre (faisant fonction de diviseur résistif) qui génère une tension variable, proportionnelle à l'angle de l'axe de sortie.
- Un axe dépassant hors du boîtier avec différents bras ou roues de fixation.
- Une carte électronique le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du MCC [56].

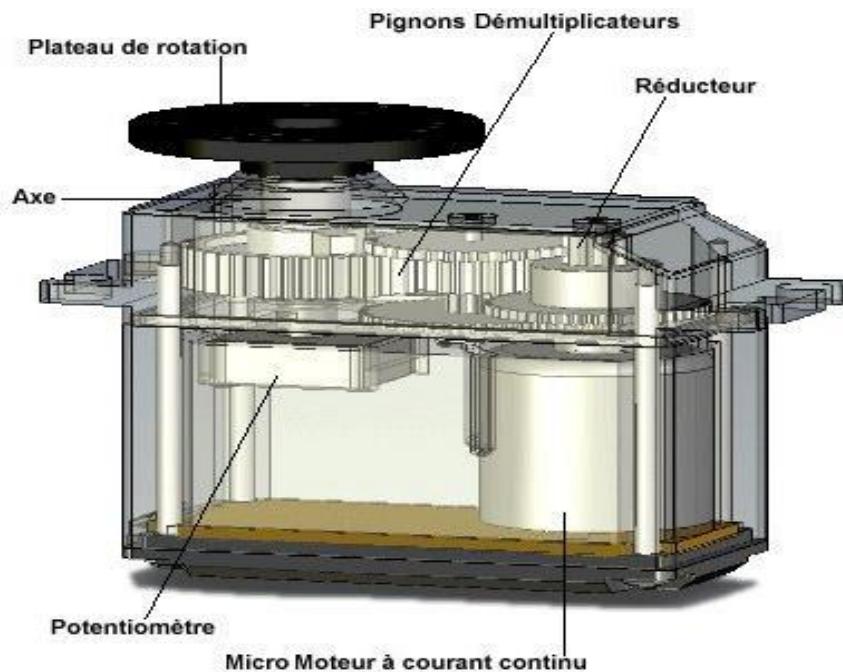


Figure (III.3) : Composition d'un servomoteur [56].

Dans l'univers Arduino, le servomoteur est essentiellement utilisé dans les applications robotiques. Le servomoteur possède trois fils de connexion pour pouvoir fonctionner, deux fils servent à son alimentation, le dernier étant celui qui reçoit le signal de commande :

- Rouge : pour l'alimentation positive (4.5V à 6V en général).
- Noir ou marron : pour la masse (0V).
- Orange, jaune, blanc, ... : entrée du signal de commande [56].

Un servomoteur de modélisme se présente sous la forme d'un petit rectangle avec deux languettes sur les côtés pour la fixation et un axe décentré avec un bras (interchangeable) pour la liaison mécanique [55].

Il existe différents types de servomoteurs, qui diffèrent par leur taille, leur poids et leur couple (force). (Figure III.4).



Figure (III.4) : Servomoteur Futuba S3003.

III.2.2.2. Fonctionnements des servomoteurs :

Le servomoteur se compose d'un moteur à courant continu, d'un système d'engrenage, d'un capteur de position et d'un circuit de commande. Les moteurs à courant continu sont alimentés par une batterie et fonctionnent à grande vitesse et à faible couple. L'ensemble engrenage et arbre connecté aux moteurs à courant continu abaisse cette vitesse à une vitesse suffisante et à un couple plus élevé. Le capteur de position détecte la position de l'arbre à partir de sa position définie et transmet les informations au circuit de commande. Le circuit de commande décode en conséquence les signaux du capteur de position et compare la position réelle des moteurs avec la position souhaitée et contrôle en conséquence le sens de rotation du moteur à courant continu pour obtenir la position requise. Le servomoteur nécessite généralement une alimentation CC de 4,8 V à 6 V.

Le servomoteur a l'avantage d'être asservi angulairement, ce qui implique que l'axe de sortie du servomoteur obéira à la consigne fournie à son entrée, même si un obstacle intervient pour modifier le sens de la trajectoire. Le moteur et sa commande sont équipés d'un système de mesure qui détermine l'emplacement actuel pour un positionnement exact [56].

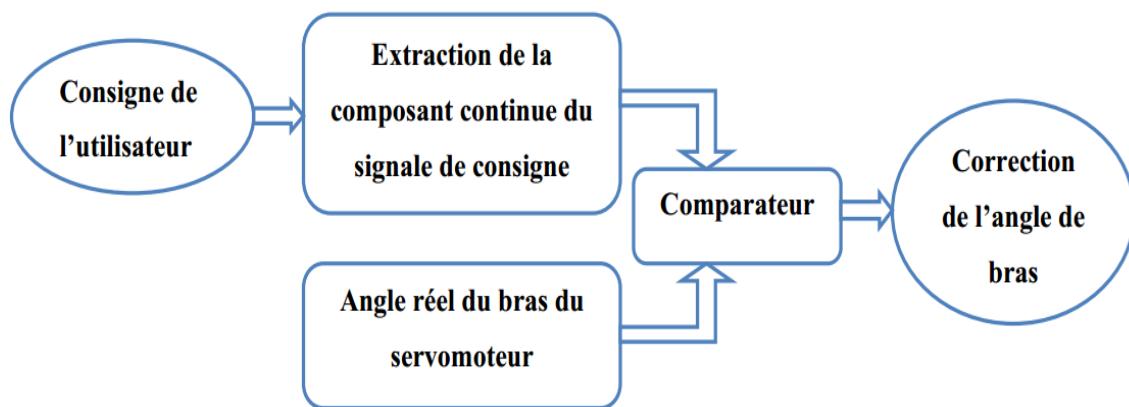


Figure (III.5) : Fonctionnement d'un servomoteur.

Réglez simplement le servomoteur ("rester à 45 degrés" par exemple) qui fera de son mieux pour rester le plus près possible de ce réglage.

Le servomoteur essaiera de se tenir le plus près possible de ce point de consigne. Pour être plus précis, cette commande est envoyée via un signal numérique (une impulsion). Pour que le servomoteur reste à une position donnée, il faut transmettre toutes les 20 millisecondes (soit à une fréquence de 50Hz) une impulsion d'une longueur comprise entre 1 et 2 millisecondes [57].

- Une impulsion de 1 milliseconde correspond à un angle de 0°.
- Une impulsion de 2 millisecondes correspond à un angle de 180°.
- En envoyant une impulsion d'une longueur intermédiaire, on obtient des angles différents, par exemple l'angle 90° est obtenu avec une impulsion de 1.5 milliseconde [57].

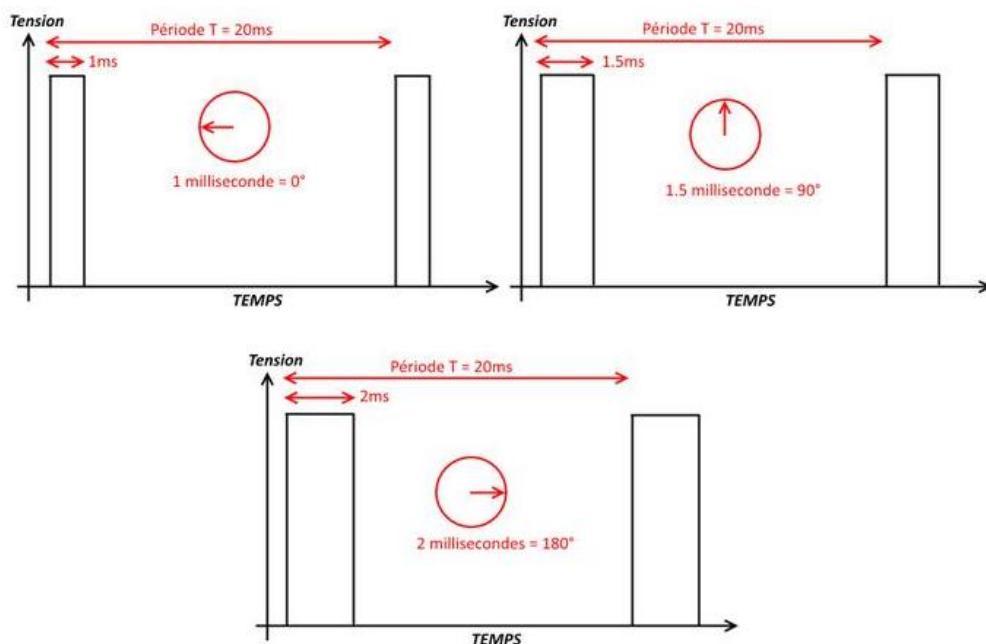


Figure (III.6) : Illustration Signal de contrôle [57].

III.2.3. Photorésistance LDR :

Une photorésistance (PhotoCells en anglais) est un composant électronique avec une résistance qui dépend du flux lumineux auquel il est exposé. Elles se nomment aussi LDR (Light-Dépendent Résistor) ou encore cellules photoconductrices. Elles permettent de détecter la lumière. On l'utilise principalement pour mesurer l'intensité lumineuse, la valeur de cette dernière diminue quand l'intensité de la luminosité augmente et vice-versa. Ces capteurs répondent à des lumières de longueur d'onde variant entre 400 nm (violet) et 600 nm (orange), avec un pic à environ 520 nm (vert). On peut donc les utiliser pour capter la lumière visible (dont la longueur d'onde λ se situe entre 400 et 600 nm). Ils sont également de petite taille (quelques centimètres carrés), économiques, tout en étant faciles à mettre en place dans un montage. Les photorésistances sont notamment utilisées dans le déclenchement automatique d'éclairage. Ils sont alors insérés dans des relais optiques [58].



Figure (III.7) : Symbole LDR.

III.2.3.1. Principe de fonctionnement :

Un cristal semi-conducteur à une 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 on aura de plus en plus d'électrons libres car les électrons de valence reçoivent une énergie thermique assez importante pour briser les liaisons covalentes et se libérer de l'atome pour participer à la conduction électrique. A une 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 les 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, la figure ci-dessous représente un circuit diviseur de tension ou un capteur LDR est utilisé [59].

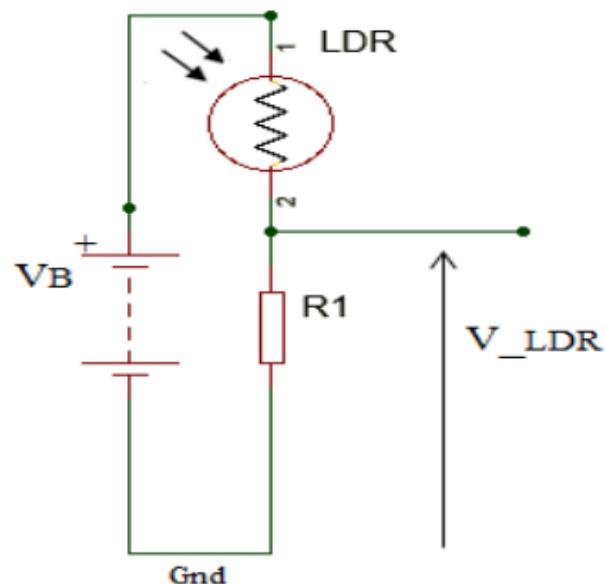


Figure (III.8) : Circuit équivalent de la photorésistance utilisé [59].

III.2.4. Résistance :

Une résistance (appelée aussi résistor) est un composant électronique (un dipôle) qui, comme son nom l'indique, résiste au passage du courant électrique.

Elle a donc pour rôle de LIMITER l'intensité du courant électrique dans un circuit. Une tension (ou différence de potentiel) apparaît entre ses bornes. Cette tension dépend de la valeur de la résistance et du courant qui la traverse.

- Quatre résistances de 10 k ohm sont utilisées afin de protéger les entrées de la carte d'un 'interface [60].

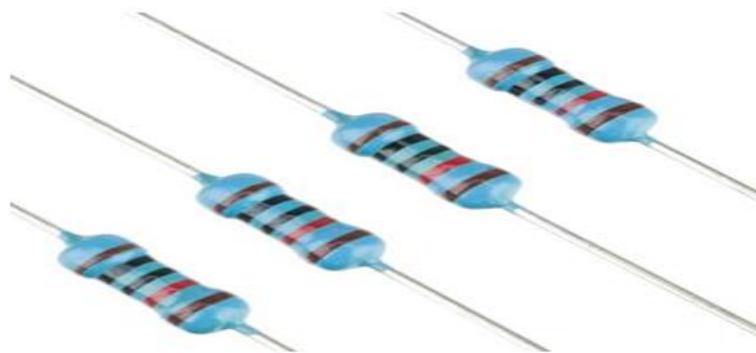


Figure (III.9) : Résistance 10 kOhm.

III.2.5. Mini panneau solaire :

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



Figure (III.10) : Panneau solaire.

III.3. La conception et la réalisation du système de poursuite :

Après avoir décrit la partie matérielle de notre système, nous sommes arrivés à la partie la plus importante de notre mémoire qui est la conception et la réalisation du système de poursuite.

III.3.1. Partie simulation :

L'utilisation de logiciel Proteus La simulation de notre montage globale est faite :

III.3.1.1. Présentation de logiciel ISIS Proteus :

Le Proteus programme est une application de simulation très populaire utilisée par les ingénieurs et les développeurs. Le logiciel Proteus simule des circuits électriques et est utilisé pour la conception et la modélisation assistées par ordinateur de microprocesseurs, microcontrôleurs et autres dispositifs programmables [61].

Le logiciel Proteus est formé de trois outils :

- Editeur de Schéma ISIS.
- Le simulateur LISA.
- L'outil de conception de circuit imprimé Ares.

ISIS : produit d'une part une liste d'équipements qui peut être utilisées par le simulateur LISA et l'outil de conception de circuit imprimé ARES, d'autre part, une liste de matériel et des rapports de contrôle des règles électriques.

LISA : c'est un ensemble de modules de simulation lié à ISIS. Le noyau de simulation PROSPICE est basé sur la version 3F5 du moteur SPICE publié par l'université de Berkeley.

ARES : c'est un module de conception de circuit imprimé. Il permet le placement des composantes et le routage des liaisons en mode automatique, manuel ou semi-automatique [62].

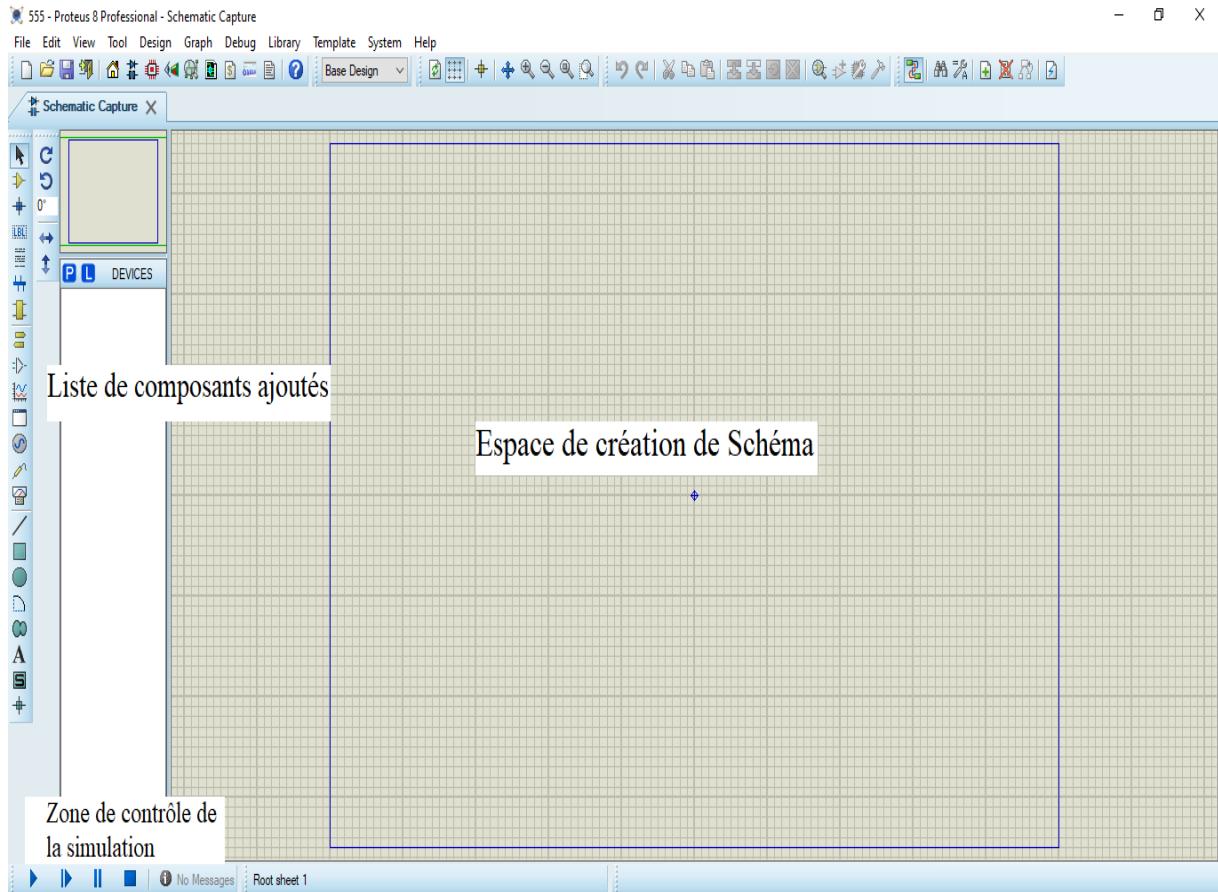


Figure (III.11) : Interface principale de Logiciel Proteus.

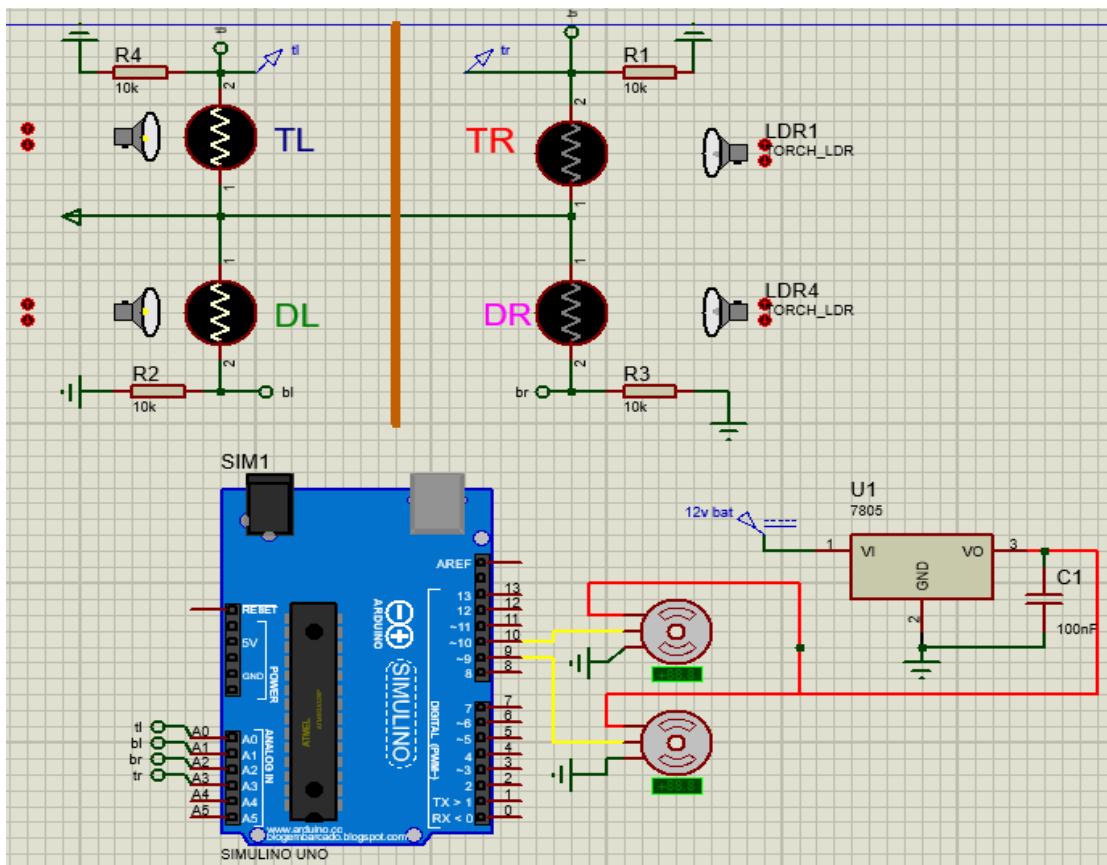


Figure (III.12) : Schéma de suiveur solaire (Proteus).

III.3.2. Partie programmation :

```
#include <Servo.h> //include the software library required to control the servo motors

#define THRESHOLD 100
#define DTIME 50

#define SENSOR_TL 0 //Top Left sensor pin
#define SENSOR_TR 3 //Top Right sensor pin
#define SENSOR_DL 1 //Bottom Left sensor pin
#define SENSOR_DR 2 //Bottom Right sensor pin

#define HORIZONTAL_LIMIT 160 //Horizontal limit should be the full rotation of a servo
#define VERTICAL_LIMIT 160 //The value is determined depending on the mechanical setup (the angle at which the vertical servo keeps the panel parallel to ground)

Servo horiz; //Servo for horizontal movement
Servo vert; //Servo for vertical movement
int horizpos;
int vertpos;
```

```
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    horiz.attach(9);
    vert.attach(10);
    vert.write(90);
    horiz.write(90);
    delay(1000);
}

void loop() {
    track();
}

void track(){
    int tl = analogRead(SENSOR_TL); //Read the value of the TL sensor
    int tr = analogRead(SENSOR_TR); //Read the value of the TR sensor
    int bl = analogRead(SENSOR_DL); //Read the value of the DL sensor
    int br = analogRead(SENSOR_DR); //Read the value of the DR sensor
    int average_top = (tl + tr) / 2;
    int average_button = (dl + dr) / 2;
    int average_left = (tl + dl) / 2;
    int average_right = (tr + dr) / 2;

    int dif_vert = average_top - average_button;
    int dif_horz = average_left - average_right;

    if ( ((-1 * THRESHOLD) <= dif_vert) && (dif_vert <= THRESHOLD) )
        vert.detach();
    else
        vert.attach(10);

    if (average_top > average_button)
    {
        vertpos = --vertpos;
        if (vertpos > VERT_LIMIT)
    }
        vert.detach ();
    vertpos = VERT_LIMIT;
}
}
```

```
        else if (average_top < average_button)
    }

    vertpos = ++vertpos;
    if (vertpos < 0)
}

vert.detach();()

vertpos = 0;

{

{

    else if (average_top == average_button)
}

//    nothing
{

    vert.write(vertpos);
}

if ( ((-1 * THRESHOLD) <= dif_horz) && (dif_horz <= THRESHOLD ) )
    horiz.detach();()

{
else}
    horiz.attach ;(9)

    if (average_left > average_right)
}

horizpos = --horizpos;
if (horizpos < 0)
{
horiz.detach();
    horizpos = 0;
}

}

else if (average_left < average_right)
{
horizpos = ++horizpos;
if (horizpos > HORIZ_LIMIT)
}
```

```

horiz.detach();  

horizpos = HORIZ_LIMIT;  

}  

}  

else if (average_left == average_right)  

}  

{
    horiz.write(horizpos);  

}  

delay(DTIME);  

}

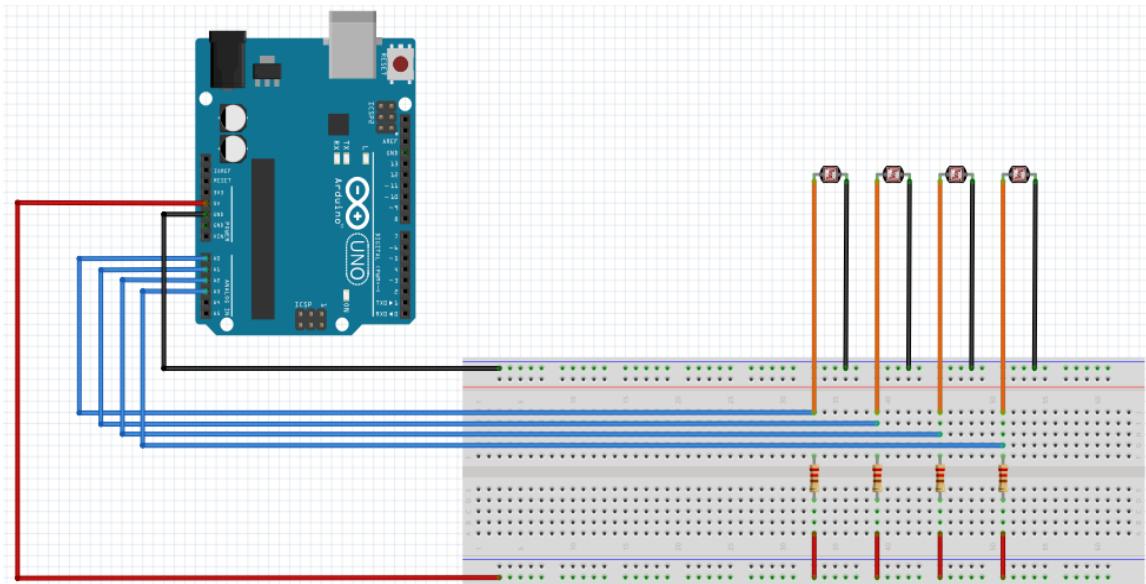
```

Figure (III.13) : Programmation sur Arduino

III.3.3. Partie électronique :

III.3.3.1. Branchement de LDR :

Le montage de LDR dans notre system suiveur

**Figure (III.14) :** Brochage de LDR à l'Arduino.

III.3.3.2. Branchement de servomoteurs :

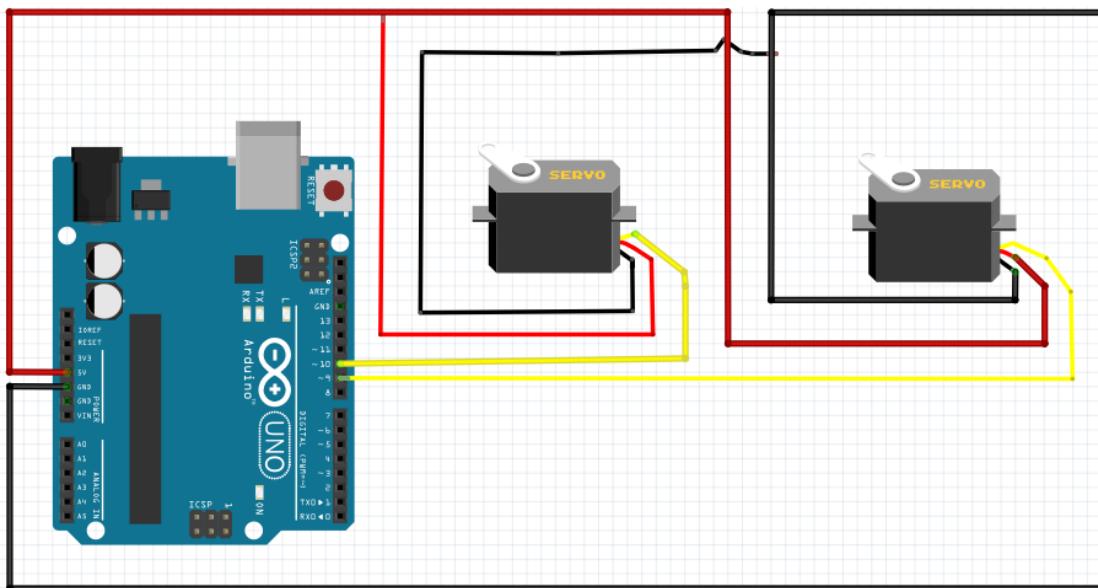


Figure (III.15) : montage circuit électrique des servomoteurs (fritzing).

III.3.3.3. Réalisation du circuit électrique :

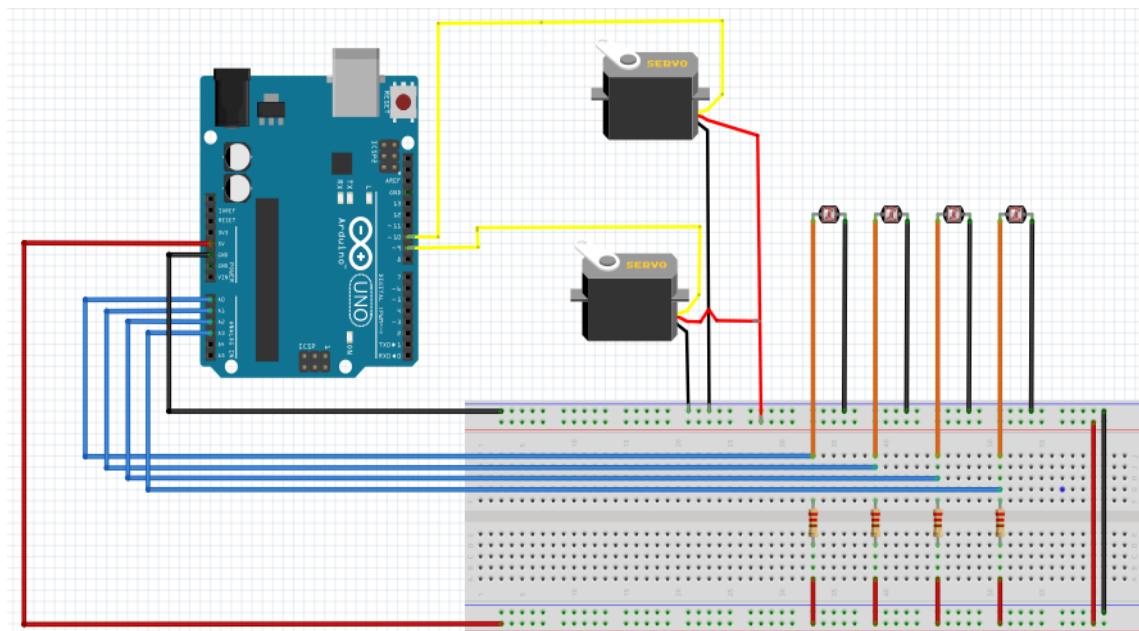


Figure (III.16) : Circuit électrique de suiveur.

III.3.3.4. L'Alimentation :

Notre système est fourni à la base avec un câble USB qui peut être branché à une extension d'alimentation USB de 5V - 1A à usages de piles externes ou PC.

III.3.4. Partie mécanique :

Nous créons ici la structure du tracker solaire, composée de deux parties, l'une destinée à tourner sur l'axe horizontal et l'autre sur l'axe vertical.

III.3.4.1. Conception de la partie inférieure (base du projet) :

Nous avons prévu et découpé deux disques en bois d'un diamètre de 20 cm pour faire la base.

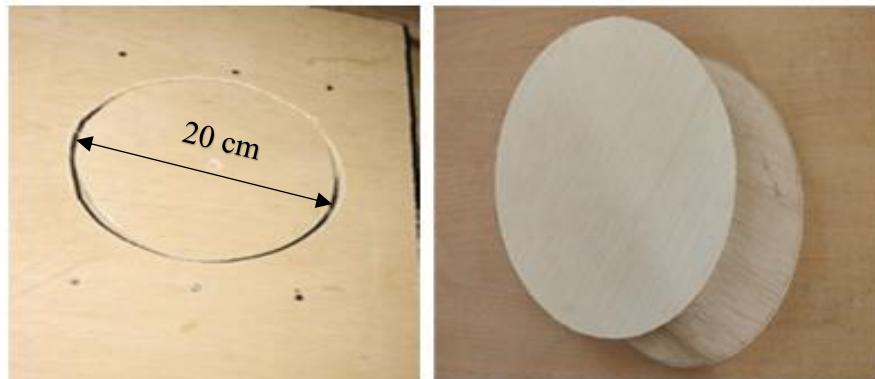


Figure (III.17) : Début de la conception de base.

Ensuite, nous installons les roues dans l'une des deux plaques pour faciliter la rotation, et nous avons également fait un trou pour installer le servomoteur dans l'autre plaque.

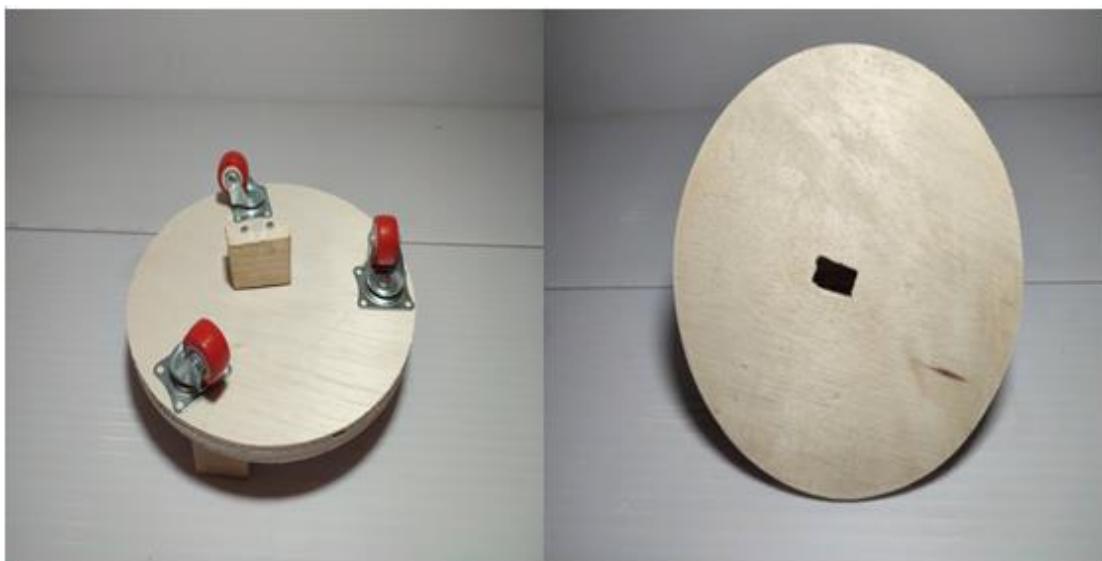


Figure (III.18) : Pièces de base.

III.3.4.2. Conception supérieure (Support de panneau solaire) :

Le support de panneau solaire est conçu en fonction des dimensions du panneau utilisé dans le projet.

Il se compose donc de deux arbres dont l'un porte un servomoteur et l'autre sert à régler l'arbre pour assurer la bonne rotation du panneau solaire.



Figure (III.19) : Support de panneau solaire.

III.3.4.3. Comment installer des photorésistances (LDR) :

Des résistances photoélectriques sont installées dans une carte électronique et connectées aux fils selon le schéma précédemment considéré à l'aide du programme Proteus.

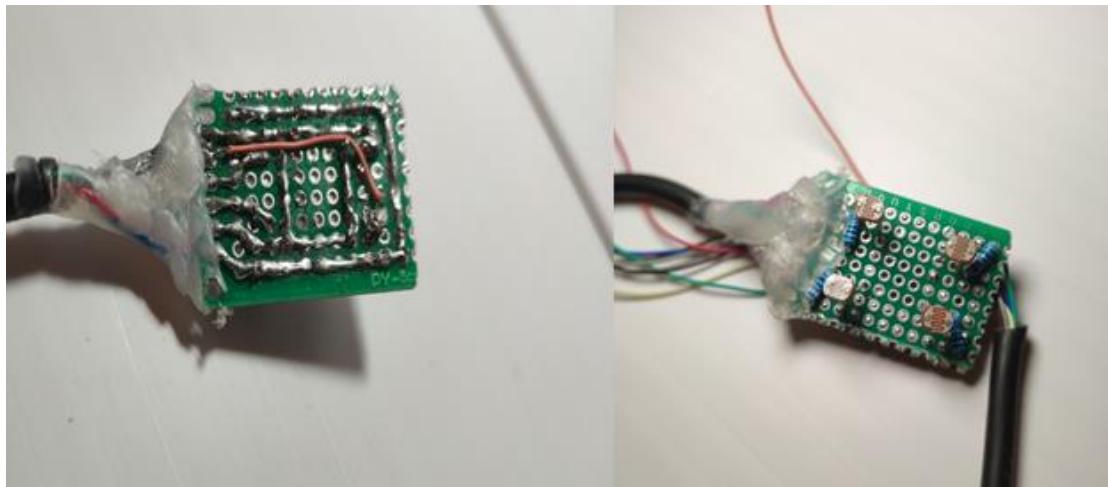


Figure (III.20) : Installation du capteur de lumière (LDR).

III.3.4.4. Position des photorésistances (LDR) :

Nous installons les capteurs en forme de plus (+) pour les isoler et couvrir toutes les directions pour une meilleure précision et pour faire fonctionner notre modèle en calculant la différence de potentiel entre les capteurs.

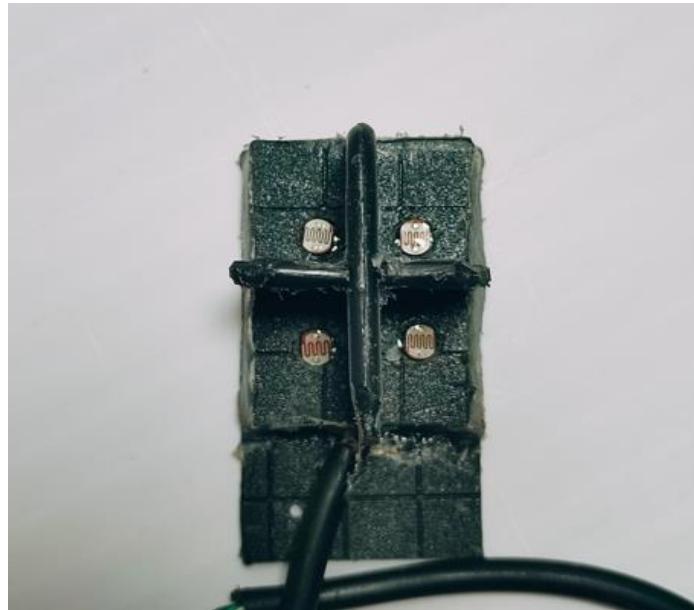


Figure (III.21) : Prototype des capteurs.

III.3.4.5. Assemblage des pièces du projet :

À partir de là, nous assemblons chaque partie du tracker solaire (partie supérieure, partie inférieure, photorésistance (LDR), deux servomoteurs, panneau solaire)



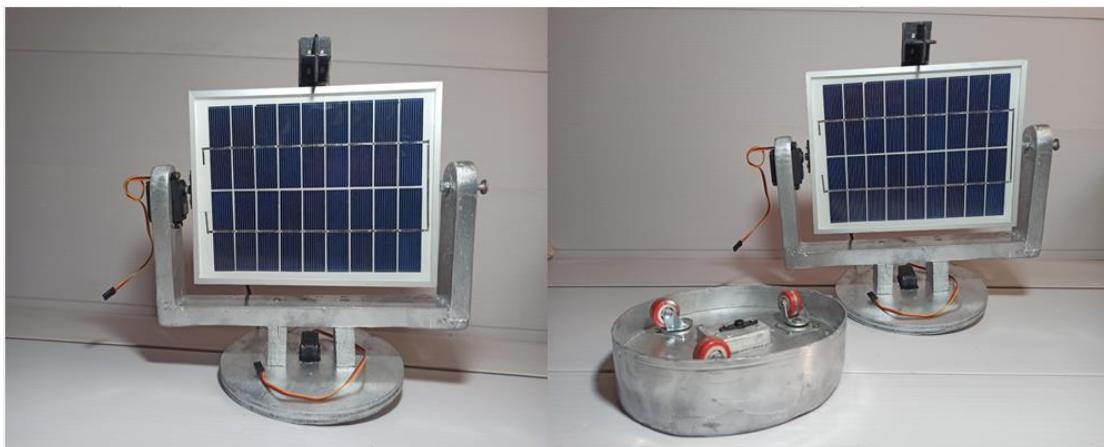


Figure (III.22) : Pièces de traqueur solaire.

III.3.4.6. Schéma final de notre suiveur :

La mise en place de la partie supérieur avec la partie inférieure d'un servo moteur et la mise en place de la partie supérieur avec la plaque solaire du moteur servo et l'axe.

Après avoir terminé le processus d'assemblage, nous connectons les fils à chacun des : Arduino, les photorésistances, les servomoteurs, régulateur, batterie.

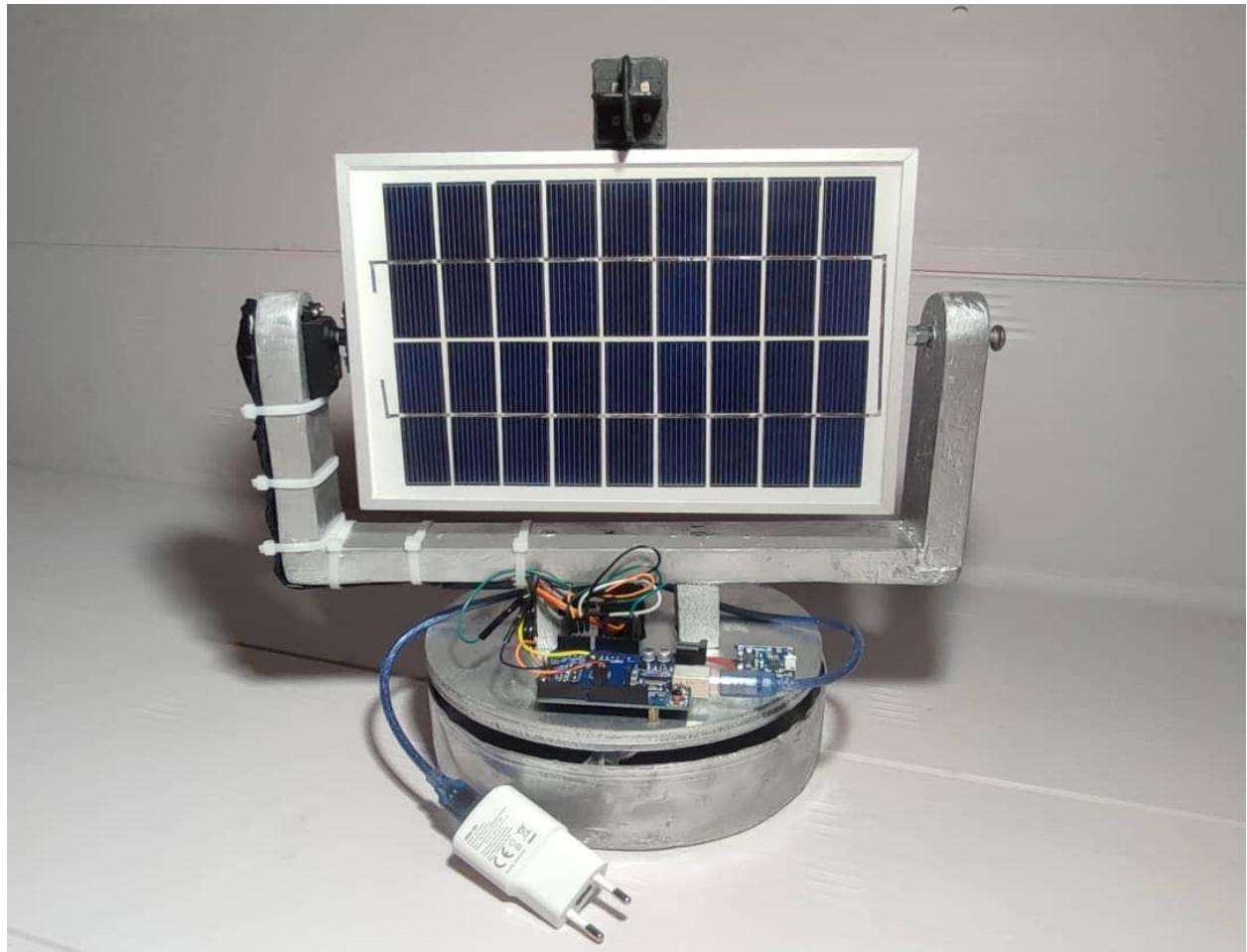


Figure (III.23) : La forme finale de Suiveur Solaire.

III.4. Explication du principe de fonctionnement du projet :

Le système suit la lumière émise par la lumière du soleil et atteint la puissance de sortie maximale du panneau solaire lorsque le diamètre du soleil est perpendiculaire au panneau solaire, pour y parvenir, nous avons mis en œuvre un projet en deux parties :

Partie mécanique :

Base en bois, support de panneau solaire.

Partie électrique :

Carte Arduino UNO, fils de connexion, panneau solaire, capteur LDR, servomoteur, batterie.

Le principe de fonctionnement de ce projet est de mesurer la tension produite par la luminosité de la lumière sur les résistances où la différence de potentiel entre les résistances est calculée en connectant les ports de la broche A0 à A3 sur la carte.

III.5. Conclusion :

La réalisation du suiveur solaire nous demande un bon choix des composants électroniques utilisés pour ne pas compliquer le principe de la commande et pour baisser l'absorption énergétique du suiveur. Notre but principal faire fonctionner un suiveur solaire, s'adaptant aux trajectoires du soleil afin de rattraper le maximum d'énergie possible, a été exécuté en plein succès c'est la victoire de notre projet.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce modeste travail est lié à la présentation : "Etude et réalisation d'un suiveur solaire PV" utilisant des composants électroniques, c'est-à-dire des servomoteurs pilotés par LDR, Arduino, ATMEGA et des composants mécaniques (assemblage, etc.).

Le système de suivi solaire est utilisé pour pointer le capteur vers le soleil en continu, ce qui est essentiel pour les grands systèmes de focalisation et améliore considérablement les performances du capteur.

Le but de ce projet est de mettre en place une solution technique pour convertir un panneau PV fixe en un panneau PV mobile en utilisant un tracker solaire pour améliorer ses performances.

Notre solution consiste à utiliser quatre collecteurs PV (LDR) placés selon une géométrie très précise sur un stent PV. Les signaux de ces quatre capteurs sont traités par l'Arduino qui contrôle les servomoteurs via un circuit de contrôle.

La thèse de fin d'université propose des majeures interdisciplinaires dans de nombreux domaines, notamment l'électronique, la mécanique, l'automatisation, la programmation et les énergies renouvelables.

Pour contrôler correctement la puissance lorsqu'elle est définie, vous pouvez ajouter un contrôleur MPP capable d'extraire la puissance maximale.

Comme possibilité, nous envisageons le passage d'un système expérimental à un système réel utilisant des moteurs pas à pas plus précis et un châssis avec une conception mécanique adaptée.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Grine Abderrahmane, « Etude caractéristique des panneaux photovoltaïque système Arduino » Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2020.
- [2] BOUKHERS Djamil, « OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE APPLICATIOW AU POMPAGE » Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [3] NAFFOUTI Seif Eddine « Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque » Projet de fin d'étude, Université de Monastir Tunisie 2011/2012.
- [4] http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaïque.asp
- [5] M. Dankassoua, S. Madougou, A. Aboubacar, A. Foulani « Etude du rayonnement solaire global à Niamey de la période de pré mousson et de la mousson de l'année 2013 (mai à octobre) ». Energies Renouvelables Vol. 20 N°1 (2017) 131 – 146.
- [6] MEZIANE Manal, « Conception et réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino » Master Académique, Université Larbi Ben M'hidi - Oum El bouaghi 2020/2021.
- [7] A. Labouret, M. Villoz, « Installations photovoltaïques » 5^e édition, Dunod 2012.
- [8] A. Labouret, M. Villoz, « Energie solaire photovoltaïque », 2^e édition, Dunod 2006.
- [9] R. Tadili et M. N. Bargach, « Une méthode d'estimation du rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée ». Laboratoire d'énergie solaire et d'environnement - Faculté des sciences de Rabat B. P. 1014, Rabat, MAROC. La Météorologie - n° 50 - août 2005.
- [10] <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8>
- [11] Melle DEBILI Narimene, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque », Thèse Magister, Université Constantine I 2014/2015.
- [12] MADANI Hossem, SOLTANI souhib « Etude comparative entre différentes structures de cellules solaires à hétérojonction ». Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf Msila 2020/2021.
- [13] Mlle BENMOHAMMADI Zahra « étude, conception et réalisation d'une commande d'un tracker solaire (suiveur solaire) » Mémoire De Fin D'étude « Master ». Université Sidi Mohammed Ben Abdellah 2013/2014.

Bibliographie

- [14] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Projet De FIN D'étude « Master ». Université Kasdi Merbah–Ouargla 2011/2012.
- [15] A. Labouret, P. Cumunel, J.P. Braun, B. Faraggi, « Cellules solaires – les bases de l'énergie photovoltaïque », Dunod, 2005.
- [16] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>
- [17] Melle AMARA Karima, « Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension », Mémoire de Magister, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2014/2015.
- [18] Sofiane FELLOUAH, Siham MESBAHI « Etude d'un system photovoltaïque connecte au réseau », Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2015.
- [19] Amandine, Jan 20,2021« Energie renouvelable :15 points à retenir sur les centrales solaires »
- [20] Mohamed Lakhdar LOUAZENE, « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla », Thèse de Doctorat en Sciences, Université El hadj Lakhdar – Batna 2014/2015.
- [21] F. Guessoumi, A. Saadi, « Commande de panneau solaire à l'aide d'une carte à PIC », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2010.
- [22] M^elle Yousra AMMOUR, M^elle Madiha KENOUCHE, « conception et réalisation d'un régulateur de charge par panneaux photovoltaïque ». Mémoire de Master. Université Mohammed Seddik Ben Yahia -Jijel, 2019.
- [23] BRAHIMI Rania, BOUCHENIRE Yasmina, « Etude et réalisation d'un régulateur de charge solaire ». Mémoire de Master, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj, 2021.
- [24] Meghellet Hanine, Hocine Lynda « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque » Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira 2017/2018.
- [25] Othmane Benseddik, Fathi Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Kasdi Marbah- Ouargala, 2012.

Bibliographie

- [26] Long BUN, « Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV », thèse de doctorat, L'université de Grenoble, 2011.
- [27] Abdesslam Belaout, « Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension », thèse magister, université – Setif-1- U-S-1 (Algérie) ,2014.
- [28] Helali Kamelia, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative ». Mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.
- [29] Sukhraj Singh Cheema, «Simulation Studies on Dual Axis Solar Photovoltaic Panel Tracking System ». Thapar University Patiala 2012.
- [30] MOUSSAOUI Zineb, SAHBI Meriem, « Simulation et réalisation d'un radar de détection d'objets à base d'Arduino ». Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued 2019/2020.
- [31] SINI BOUKROUT Abd El Raouf, LAMRI Mohamed Lamine « Etude et conception d'un suiveur du soleil pour un générateur photovoltaïque » Mémoire de Master, Université Akli Mohand OULHADJ, Bouira 2017.
- [32] Mr Arafa Kaddouri, « Conception et réalisation d'un suiveur solaire à deux axes ». Projet de fin d'étude, Université sidi Mohammed ben Abdallah, Fès, Maroc 2015.
- [33] BOUZIANE Rabeh, DOKKAR Ayoub « Conception et Réalisation d'un Suiveur Solaire Bi-axial à Base De capteurs de lumière ». Mémoire de Master, Kasdi Merbah Ouargla 2015/2016.
- [34] Ben Lutkevich, « microcontroller (MCU) » 07 Nov 2019.
- [35] AIT MEZIANI Aghiles, DECHOUN Daou, « Etude et réalisation d'une Horloge Géante pour la FSSA ». Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj Bouira,2017/2018.
- [36] Mlle RAHOUI Zineb, Mlle SENOUS Farah Ibtissem, « Etude et conception d'un système de surveillance médicale basé sur Arduino ». Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2019/2020.
- [37] BENSAOUCHA Seyf, DJLOUD Snoussi, « Réalisation d'un suiveur solaire à base d'Arduino ». Mémoire de Master, Université de M'sila, 2019/2020.

Bibliographie

- [38] ZERROUKI Mohamed Amin, NESNAS Riadh. « Conception et réalisation d'un system de command d'une habitation ». Mémoire de Master, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017/2018.
- [39] BENTALEB Mokhtar, GASMI Elhadi « Réalisation et commande d'une machine cnc à base des moteurs pas à pas ». Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla 2015/2016.
- [40] AMMARKHODJA Nassim, « Etude et réalisation d'une alarme de température à base d'une carte Arduino ». Mémoire de Master, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017/2018.
- [41] AOUINE Abdelkrim, « Conception et Réalisation d'un tracker solaire intelligent à Bas d'une Carte Arduino-Uno ». Mémoire de Master, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2016/2017.
- [42] <https://www.atg.world/view-article/Arduino%20UNO-26094/arduino-uno>
- [43] Alaa-eddine Bordjiba « Conception et réalisation d'un Régulateur PID numérique de température avec ARDUINO ». Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 Guelma, 2019.
- [44] Le grand livre d'Arduino, Patrick Chantreau et Erik Bartmann, 2éd. Eyrolles, 2015.
- [45] Robert.Tomczak, « Etude électronique de la carte Arduino ». 24 February 2021.
- [46] <http://docs.arduino.cc/retired/boards/arduino-mini-05>
- [47] Jean-Christophe QUETIN, « Arduino Apprivoisez l'électronique et le codage ». 2^e édition.
- [48] LAOUAR Bachir, AYACHI AMOR Hamza, « Etude et Réalisation d'une Commande Domotique par ARDUINO Via Infrarouge ». Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2017.
- [49] <https://community.element14.com/members-area/personalblogs/b/blog/posts/arduino-due-overview>
- [50] KRAMA Abdelbasset, GOUGUI Abdelmoumen, « Etude et réalisation d'une carte de contrôle par Arduino via le système Androïde ». Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2015.
- [51] Simon Landrault, Hippolyte Weisslinger « Arduino : Premiers pas en informatique embarquée ». Édition 01 juin 2014.

Bibliographie

- [52] AMMOUR Mouloud, « Etude et conception d'une carte de contrôle à base d'ARDUINO pour des applications domotique ». Mémoire de MASTER, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2018.
- [53] ZAOUI Med EL Amine, SEDDIKI Saif Eddine, « ETUDE ET REALISATION D'UNE INTERFACE DE MESURE DE LA PRESSION ARTERIELLE ». Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2015/2016.
- [54] Boudjenah Djamel, « Conception, étude et réalisation d'un banc de mesure pour la surveillance d'un moteur à base de la carte de développement ARDUINO UNO ». Mémoire de fin d'études, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2013/2014.
- [55] skywodd, « Contrôler un servomoteur avec une carte Arduino / Genuino » Feb. 21, 2017.
- [56] BOUZIR Rami, KACIMI Athman « Réalisation d'un bras manipulateur à base d'Arduino », Mémoire de Master Université Akli Mohand OULHADJ, Bouira 2018/2019.
- [57] BELKEBIR KATIA 'CHAABI SIHAM « Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil à Base d'une Carte Arduino UNO » Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou ,2016/2017.
- [58] Mathieu Bour, Émilie Laurent, Marine Matton, « Les capteur », Lycée Fabert.
- [59] Mlle ABBAS Nassima « Conception et réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino nano ». Mémoire de Master, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2018.
- [60] Hanifi Mohammed El Amine « Conception d'une carte Electronique pour système de poursuite solaire ». Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2017/2018.
- [61] Olga Weis « Working with the Serial Port model in Proteus » Nov 27, 2019.
- [62] KARA ALI REDHA, « Etude, Conception et Réalisation d'une Imprimante 3D à Dépôt de la Matière ». Mémoire de Master, Université M'Hamed Boumerdes 2016/2017.