



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de d'Électronique et Télécommunications



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

Filière : Électronique

Spécialité : Instrumentation

Par: - DEMMANE Mohammed Amine
- HANNACHI Rachid

THEME

Conception et Réalisation d'un Système Suiveur de Rayonnement Solaire Piloté par Arduino

Présenté et évalué, le 12/06/2024, par le jury composé de :

| Nom et prénom | Grade | Qualité |
|---------------------|-------|--------------|
| M. Hassene NEZZARI | MCA | Président |
| M. Seddik BOUABIDA | MAB | Rapporteur |
| Mme. Amel BOUCHEMHA | MCA | Examinatrice |

Promotion : 2023/2024



Remerciements

Nous remercions ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude à mon encadreur **Dr. BOUBIDA Seddik** pour tous ses conseils, son soutien, son aide, et ses orientations.

Nous tiens également à remercier le **Dr. HASSENE Nezzari** et **Dr. MAHMOUD Maamri** et **Melle. HAMIDA** de labo GE pour tous les conseils et orientation qu'il nous a prodigués.

Nous tenons également à remercier le **Dr. HASSENE Nezzari**, le **Dr. MAHMOUD Maamri** et **Mlle. HAMIDA** du laboratoire GE pour tous les conseils et orientations qu'ils nous ont prodigués.

Nous remercions tous les enseignants du département d'électronique et télécommunication, ainsi que mes collègues de la promotion 2024 du Master en Électronique et Instrumentation.

Nos plus chaleureux remerciements vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Mohammed Amine et Rachid



Dédicaces

*A cœur vaillant rien d'impossible conscience tranquille
tout est accessible.*

*Quand il y a la soif d'apprendre Tout vient à point
à qui sait attendre.*

*Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs
années de travail et de patience:*

*À mes très chers parents **DEMMANE Mohamed Zoubir**
et **AHMED CHAOUCH Noura**, pour leur aide et leur
soutien tout au long de mes études, et qui ont fait de
moi ce que je suis aujourd'hui et j'espère qu'un jour je
serai capable de leur donner au moins le minimum car
quoi qu'on fasse on n'arrivera jamais à leurs rendre tout.*

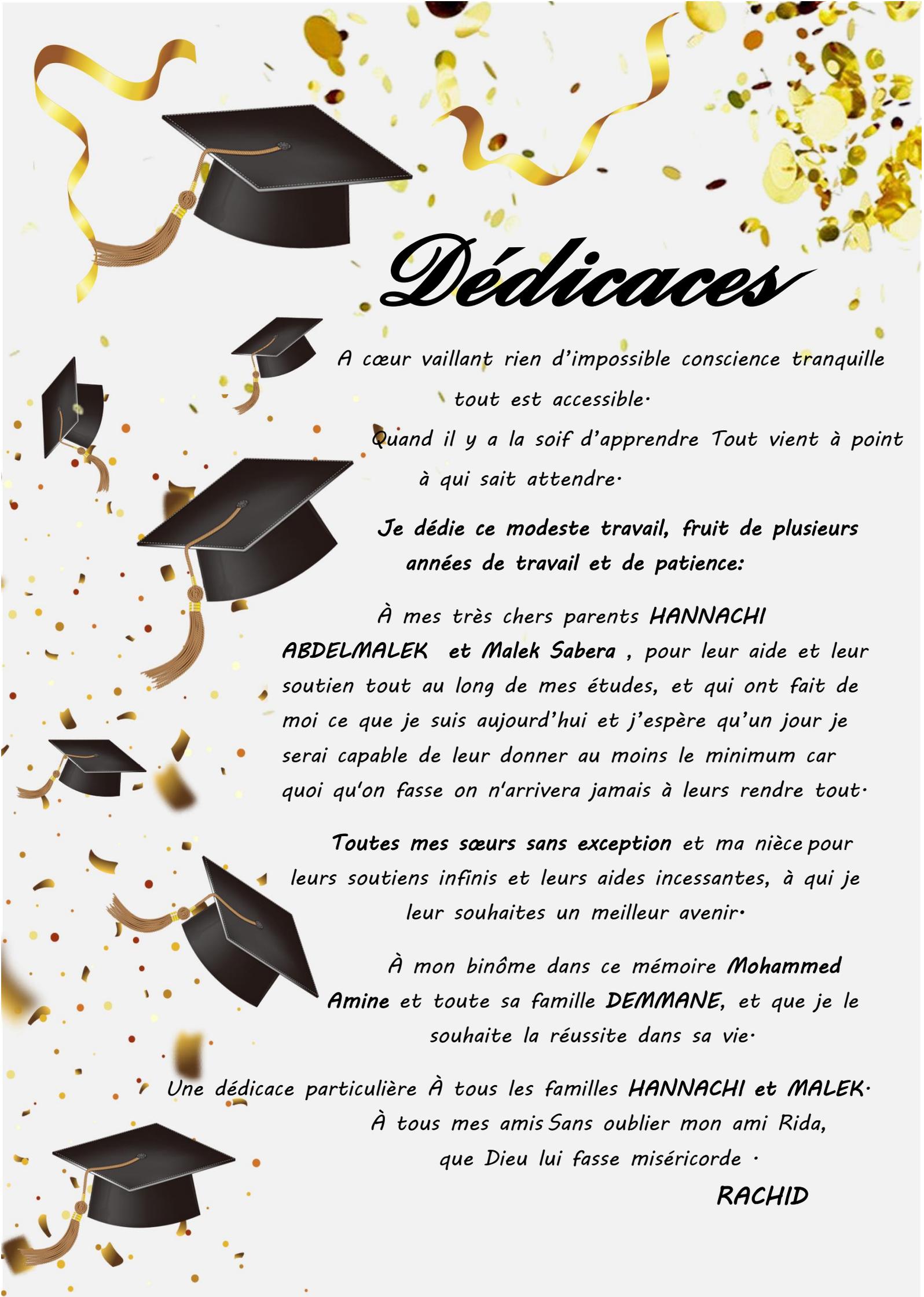
*Toutes mes sœurs sans exception et ma nièce
Kaouter Alaa pour leurs soutiens infinis et leurs aides
incessantes, à qui je leur souhaite un meilleur avenir.*

*À mon binôme dans ce mémoire **Rachid** et toute
sa famille **HANNACHI**, et que je le souhaite la
réussite dans sa vie.*

*Une dédicace particulière À tous les familles
DEMMANE et **AHMED CHAOUCH**.*

À tous mes amis.

MOHAMMED AMINE



Dédicaces

*A cœur vaillant rien d'impossible conscience tranquille
tout est accessible.*

*Quand il y a la soif d'apprendre Tout vient à point
à qui sait attendre.*

*Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs
années de travail et de patience:*

*À mes très chers parents **HANNACHI**
ABDELMALEK et **Malek Sabera** , pour leur aide et leur
soutien tout au long de mes études, et qui ont fait de
moi ce que je suis aujourd'hui et j'espère qu'un jour je
serai capable de leur donner au moins le minimum car
quoi qu'on fasse on n'arrivera jamais à leurs rendre tout.*

*Toutes mes sœurs sans exception et ma nièce pour
leurs soutiens infinis et leurs aides incessantes, à qui je
leur souhaite un meilleur avenir.*

*À mon binôme dans ce mémoire **Mohammed**
Amine et toute sa famille **DEMMANE**, et que je le
souhaite la réussite dans sa vie.*

*Une dédicace particulière À tous les familles **HANNACHI** et **MALEK**.
À tous mes amis Sans oublier mon ami Rida,
que Dieu lui fasse miséricorde .*

RACHID

Sommaire

Sommaire

Liste des figures

Liste des abréviations

ملخص

Résumé

Abstract

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralité sur l'Énergie Photovoltaïque

Introduction3

I.1. Historique de la cellule photovoltaïque.....3

I.2. Energie et environnement6

I.2.1. Définition de l'énergie6

I.2.2. Types d'énergies et leurs transformations.....7

I.2.2.1. Energie Potentielle7

I.2.2.2. Energie cinétique7

I.2.3. Sources d'énergie8

I.2.3.1. Energie fossile8

I.2.3.2. Energie nucléaire8

I.2.3.3. Les énergies renouvelables.....8

I.3. Le potentiel d'énergie en Algérie.....9

I.3.1. Energie solaire9

I.3.2. Le rayonnement solaire10

I.3.2.1. Définition10

I.3.2.2. Types de rayonnements11

I.3.2.2.1. Rayonnement direct.....11

I.3.2.2.2. Rayonnement diffus.....12

I.3.2.2.3. Rayonnement solaire réfléchi12

I.3.2.2.4. Rayonnement global12

I.3.2.3. Rayonnement en Algérie13

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.4. La cellule photovoltaïque | 13 |
| I.4.1. Technologie photovoltaïque | 13 |
| I.4.2. Principe de fonctionnement..... | 14 |
| I.4.3. Les différents types de panneaux photovoltaïques..... | 16 |
| I.4.3.1. Les panneaux photovoltaïques poly cristallins..... | 16 |
| I.4.3.2. Les panneaux photovoltaïques monocristallins..... | 17 |
| I.4.3.3. Les panneaux solaires amorphes | 18 |
| I.4.3.4. Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS | 19 |
| I.4.3.5. Cellue multijonction | 20 |
| I.4.4. Regroupement des cellules photovoltaïques | 21 |
| I.4.4.1. Cellules mise en série | 21 |
| I.4.4.2. Cellules Mise en parallèle | 22 |
| I.4.4.3. Regroupement (série et parallèle)..... | 23 |
| I.5. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque | 24 |
| I.6. Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ | 26 |
| I.6.1. Influence de l'éclairement et de la température..... | 26 |
| I.6.1.1. Influence de l'éclairement sur un PV..... | 26 |
| I.6.1.2. Influence de la température sur un PV | 27 |
| I.7. Module photovoltaïque | 28 |
| I.7.1. Panneau photovoltaïque | 30 |
| I.7.2. Système photovoltaïque | 32 |
| I.7.2.1. Système photovoltaïque autonomes | 32 |
| I.7.2.2. Système photovoltaïque raccordé à un réseau..... | 33 |
| I.7.2.3. Système photovoltaïque hybride | 34 |
| I.8. Protection des modules photovoltaïques | 35 |
| I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie PV..... | 36 |
| I.9.1. Avantage..... | 36 |
| I.9.2. Inconvénients | 37 |
| I.10. Secteurs d'application | 38 |

Conclusion.....38

Chapitre II : Le système suiveur et le système de refroidissement

II.1. Introduction.....39

II.2. Systeme suiveur solaire.39

 II.2.1. Définition et fonctionnement39

 II.2.2. Les type de suiveurs solaires.....40

 II.2.2.1. Suiveur passif40

 II.2.2.2. Suiveur actif41

 II.2.3. Les différents système de suiveur solaire(selon l’axe).....42

 II.2.3.1. Un Suiveur à axe horizontal42

 II.2.3.2. Suiveur à axe vertical incliné..... 43

 II.2.3.3. Suiveur à deux axes43

 II.2.4. La différence entre l’installation avec suiveur et l’installation fixe.....43

 II.2.5. Les moyens de contrôle de l’augmentation d’énergie par traqueur 44

 II.2.6. Les avantages et inconvénient de suiveur.....44

II.3. Systeme de refroidissement panneau solaire45

 II.3.1. Refroidissement de PV à air46

 II.3.2. Système de refroidissement à eau47

 II.3.2.1. principe de fonctionnement47

II.4. Nettoyage et entretien des panneaux solaires48

II.5. Conclusion49

Chapitre III : Conception et réalisation du dispositif

III.1. Introduction50

III.2. Outils de développement50

 III.2.1. Composants du notre prototype.....50

 III.2.1.1. Présentation de la Carte ARDUINO UNO 50

 III.2.1.2. Résistances..... 52

 III.2.1.3. Photoresistance LDR (Light Dependent Resistor) 52

 III.2.1.4. Mini panneau solaire 55

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| III.2.1.5. Mini servo 9G SG-90 | 56 |
| III.2.1.6. Mini pompe à eau | 58 |
| III.2.1.7. Module de relais déclencheur 5v | 59 |
| III.2.1.8. Capteur de température étanche DS18B20 | 60 |
| III.2.1.9. Circuit de charge modèle TP4056 | 61 |
| III.2.1.10. Mini Câble USB | 62 |
| III.2.1.11. Batterie lithium 18650 | 62 |
| III.2.1.12. Afficheur LCD | 63 |
| III.2.1.13. Convertisseurs DC-DC élévateur (boost converter) MT3608 | 64 |
| III.3. Réalisation du dispositif | 65 |
| III.3.1. Cahier des charges | 65 |
| III.4. Principe de Fonctionnement du système | 65 |
| III.5. Les étapes du Réalisation | 65 |
| III.5.1. Partie électronique | 65 |
| III.5.1.1. Réalisation système suiveur | 65 |
| III.5.1.2. Système de refroidissement | 69 |
| III.5.2. Partie programmation | 72 |
| III.5.3. Partie simulation (PROTEUS_ISIS) | 74 |
| III.6. Conclusion | 75 |
| Conclusion générale | 76 |
| Annexes | |
| Bibliographie | |

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.1: Photo Alexandre Edmond | 4 |
| Figure I.2: Photo de trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince | 5 |
| Figure I.3: Premier satellite américain | 5 |
| Figure I.4: Des produits fonctionnant grâce à l'énergie solaire | 6 |
| Figure I.5: Toits photovoltaïques | 6 |
| Figure I.6: Sources d'énergies primaires et leurs transformations | 7 |
| Figure I.7: Schéma montrant quelques sources renouvelables | 9 |
| Figure I.8: La carte de l'irradiation solaire en Algérie | 10 |
| Figure I.9: Répartition du spectre solaire au-dessus de l'atmosphère terrestre | 11 |
| Figure I.10: Le différent type du rayonnement solaire | 12 |
| Figure I.11: Les différentes zones énergétiques dans l'Algérie | 13 |
| Figure I.12: Centrale photovoltaïque | 14 |
| Figure I.13: Structure d'une cellule photovoltaïque | 14 |
| Figure I.14: Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque | 15 |
| Figure I.15: Structure d'un panneau photovoltaïque | 16 |
| Figure I.16: Panneau poly cristallin | 17 |
| Figure I.17: Panneau monocristallin | 18 |
| Figure I.18: Panneau amorphe | 19 |
| Figure I.19: Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre | 20 |
| Figure I.20: Cellule multi-jonction | 20 |
| Figure I.21: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série | 21 |
| Figure I.22: Caractéristique résultantes d'un groupement de N_s cellules en série | 22 |
| Figure I.23: schéma de 3 cellules photovoltaïque associer en parallèle | 22 |
| Figure I.24: Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle | 23 |
| Figure I.25: Groupement des cellules en série-parallèle | 24 |
| Figure I.26: Caractéristique résultantes d'un groupement de N_s - N_p cellules en série-parallèle | 24 |
| Figure I.27: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque | 24 |
| Figure I.28: Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes valeur de l'éclairemen | 27 |
| Figure I.29: Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeur de l'éclairement | 27 |
| Figure I.30: Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes valeur de température | 28 |
| Figure I.31: Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeur de température | 28 |
| Figure I.32: Module photovoltaïque | 29 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.33: Panneaux photovoltaïques | 31 |
| Figure I.34: Composants d'un champ de modules photovoltaïques | 31 |
| Figure I.35: Schéma d'un système photovoltaïque | 32 |
| Figure I.36: Système photovoltaïque autonome..... | 33 |
| Figure I.37: Système photovoltaïque raccordé aux réseaux..... | 34 |
| Figure I.38: Système hybride PV-Eolienne..... | 34 |
| Figure 1.39: Protections d'un module PV | 35 |
| Figure 1.40: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V) d'un générateur PV | 36 |

Chapitre II

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II.1: Les types de suiveurs solaires. | 40 |
| Figure II.2: Suiveur passif..... | 41 |
| Figure II.3: Suiveur solaire automatique..... | 42 |
| Figure II.4: Suiveur à axe horizontal..... | 42 |
| Figure II.5: Suiveur à axe vertical incliné | 43 |
| Figure II.6: Suiveur à deux axes..... | 43 |
| Figure II.7: Comparaison Production électrique | 44 |
| Figure II.8: Panneau Aerovoltaïque | 46 |
| Figure II.9: Refroidissement à ventilation forcer | 46 |
| Figure II.10: Panneau solaire refroidie..... | 47 |
| Figure II.11: Système de refroidissement..... | 47 |
| Figure II.12: différence entre panneau encrasse et panneau nettoyer. | 48 |

Chapitre III

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III.1: Carte ARDUINO | 51 |
| Figure III.2: Photographie de résistances de 10 kΩ, 1/6 W, tolérance 5% | 52 |
| Figure III.3: Photographie de photoresistance LDR (Light Dependent Resistor)..... | 53 |
| Figure III.4: Courbe caractéristique de photoresistance LDR..... | 53 |
| Figure III.5: Schéma de branchements de photoresistance LDR | 54 |
| Figure III.6: Panneau solaire | 55 |
| Figure III.7: Servomoteur SG-90 | 56 |
| Figure III.8: Câble servomoteur. | 58 |
| Figure III.9: Mini pompe à eau | 58 |
| Figure III.10: Module de relais déclencheur 5 V | 59 |
| Figure III.11: Capteur de température étanche DS18B20..... | 60 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III.12: Circuit de charge modèle TP4056 | 61 |
| Figure III.13: Micro câble USB | 62 |
| Figure III.14: Batterie lithium 18650 de 6800 mA | 62 |
| Figure III.15: Afficheur LCD | 63 |
| Figure III.16: Le module d'alimentation DC-DC MT3608 | 64 |
| Figure III.17: Schéma de connexion des LDR à l'Arduino | 66 |
| Figure III.18: Montage Circuit électrique des servomoteurs | 66 |
| Figure III.19: Les étapes à suivre pour test servomoteur | 67 |
| Figure III.20: Programme Arduino pour test Servomoteur | 67 |
| Figure III.21: Montage du circuit électrique du système suiveur (réalisé avec Fritzing) | 68 |
| Figure III.22: Montage réel du système suiveur solaire | 68 |
| Figure III.23: Montage système de refroidissement | 69 |
| Figure III.24 : Montage réel système de refroidissement | 70 |
| Figure III.25: Montage globale (Système suiveur solaire + système de refroidissement) | 70 |
| Figure III.26: Aperçu du prototype | 71 |
| Figure III.27: le système global à l'intérieur | 71 |
| Figure III.28: Programme Arduino du système élaboré | 72 |
| Figure III.29: Interface du logiciel Arduino | 73 |
| Figure III.30: Organigramme principal | 73 |
| Figure III.31: Montage du système simulé sous PROTEUS-ISIS | 74 |

Liste des abréviations

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque.

N_S : Nombre des cellules en série.

N_P : Nombre des cellules en parallèle.

I_{cc} : Courant de court circuit.

V_{co} : Tension du circuit ouvert.

V_{op} : Tension optimale du panneau.

I_{pv} : Courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.

V_{pv} : Tension aux bornes de cette même cellule.

I_{ph} : Photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou Bien courant de (court-circuit).

R_{sh} : Résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

R_s : Résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de Connexions.

I_d : Rourant qui traverse la diode.

DC : Direct courant.

AC : Alternatif courant.

V_{sco} : Tension de circuit ouvert pour N_s.

I_{pcc} : Courant de court circuit pour N_p.

V_{pco} : Tension de circuit ouvert pour N_p.

K : Constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$ j/K).

T : Température effective des cellules en Kelvin (K).

E : Éclairement en w/m^2 .

N : Facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n$).

P_m : Puissance maximale fournie par la cellule.

V_m : Tension maximale.

P-N : Junction.

GPV : Groupe des cellules photovoltaïques.

I_{scc} : Courant de court circuit pour Ns.

V_m : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

FF : Facteur de Forme.

V_{out} : Tension de sortie dans le convertisseur élévateur (V).

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

N : Rendement de conversion.

العنوان: تصميم وتنفيذ نظام متتبع لإشعاع الشمس يتحكم فيه بواسطة أردوينو.

نظام تتبّع الطاقة الشمسية مع نظام التبريد يمثل تقنية متطورة في مجال الطاقة المتجددة والاستدامة. يستخدم هذا النظام أحدث التقنيات لزيادة كفاءة استخدام الطاقة الشمسية وتحسين أدائها.

في البداية، يتم استخدام ألواح شمسية متحركة تتبّع حركة الشمس على مدار اليوم وتتجه نحوها بشكل دقيق. هذا يتيح للألواح الشمسية الاستفادة القصوى من ضوء الشمس، مما يعزز كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء.

ومع ذلك، فإن درجات الحرارة المرتفعة يمكن أن تؤثر سلبًا على أداء الألواح الشمسية. هنا يأتي دور نظام التبريد، الذي يستخدم تقنيات مثل التبريد السائل لتقليل درجة حرارة الألواح. هذا يساعد في منع فقدان كفاءة الألواح بسبب الحرارة الزائدة ويزيد من عمرها الافتراضي.

بالجمع بين تقنيات التتبع والتبريد، يمكن للنظام تحقيق أداء متفوقًا وكفاءة ممتازة في توليد الطاقة الشمسية. وبفضل هذه التقنيات المتقدمة، يمكن تحسين الاستدامة البيئية وتقليل التكاليف للمشروعات الشمسية، مما يعزز من جاذبيتها كخيار لتوليد الطاقة النظيفة والموثوقة.

الكلمات المفتاحية:

الطاقة الشمسية، أردوينو، نظام تتبّع الطاقة الشمسية، مقاومة متغيرة للضوء، نظام التبريد.

Titre : Conception et Réalisation d'un Système Suiveur de Rayonnement Solaire Piloté par Arduino.

Un système de suivi solaire avec système de refroidissement est une technologie avancée dans le domaine des énergies renouvelables et de la durabilité. Ce système utilise les dernières technologies pour augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'énergie solaire et améliorer ses performances.

Tout d'abord, des panneaux solaires mobiles sont utilisés pour suivre le mouvement du soleil tout au long de la journée et s'orienter précisément vers lui. Cela permet aux panneaux solaires de tirer pleinement parti de la lumière du soleil, ce qui renforce l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité.

Cependant, les températures élevées peuvent avoir un impact négatif sur les performances des panneaux solaires. C'est là qu'intervient le système de refroidissement, qui utilise des techniques telles que le refroidissement liquide pour abaisser la température des panneaux. Cela aide à éviter la perte d'efficacité des panneaux due à la chaleur excessive et prolonge leur durée de vie.

En combinant les techniques de suivi et de refroidissement, le système peut atteindre des performances supérieures et une efficacité excellente dans la génération d'énergie solaire. Grâce à ces technologies avancées, il est possible d'améliorer la durabilité environnementale et de réduire les coûts pour les projets solaires, ce qui renforce leur attrait en tant qu'option de génération d'énergie propre et fiable.

Mots clés :

Photovoltaïque, Arduino UNO, Suiveur solaire, LDR, Système de refroidissement.

**Title: Design and Implementation of a Solar Radiation Tracking System
Controlled by Arduino.**

A solar tracking system with a cooling system is an advanced technology in the field of renewable energy and sustainability. This system utilizes the latest technologies to increase the efficiency of solar energy utilization and enhance its performance.

Firstly, movable solar panels are used to track the sun's movement throughout the day and accurately orient themselves towards it. This allows the solar panels to fully capitalize on sunlight, thereby enhancing the efficiency of converting solar energy into electricity.

However, high temperatures can negatively impact the performance of solar panels. This is where the cooling system comes into play, utilizing techniques such as liquid cooling to lower the temperature of the panels. This helps prevent efficiency loss due to excessive heat and extends their lifespan.

By combining tracking and cooling techniques, the system can achieve superior performance and excellent efficiency in solar energy generation. With these advanced technologies, it's possible to enhance environmental sustainability and reduce costs for solar projects, thereby bolstering their appeal as a clean and reliable energy generation option.

Keywords:

Photovoltaic, Arduino UNO, Solar tracker, Light-dependent resistor (LDR), Cooling system.

Introduction générale

Introduction générale

Il est évident que la majeure partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, ainsi que de l'énergie nucléaire. Cependant, des études et des prévisions récentes alertent sur le fait que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à leur épuisement total. De plus, tout le monde est conscient du danger que représente ce processus pour l'environnement.

Face à ce constat, il est devenu nécessaire de rechercher d'autres sources d'énergie de remplacement. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique, se présentent comme d'excellentes alternatives et sont de plus en plus utilisées de nos jours. Ce type d'énergie n'est pas seulement gratuit et inépuisable, mais il est également très propre pour l'environnement. L'énergie solaire apparaît comme une source importante, car la quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre en une journée est beaucoup plus que la quantité consommé.

La puissance électrique produite par un capteur solaire dépend de l'intensité du flux lumineux selon la position du soleil qui varie tout au long de la journée.

Afin de collecter le maximum d'énergie, on utilise des dispositifs appelés systèmes de suivi solaire ou "trackers solaires".

Le système de suivi solaire doit être ajusté de sorte qu'il oriente, autant que possible, le capteur perpendiculairement aux rayons solaires.

Actuellement, deux types de systèmes se partagent le marché: les systèmes à un seul axe et les systèmes à deux axes. Les systèmes à un seul axe sont moins coûteux et leur commande est facile à mettre en œuvre, par contre leur efficacité est inférieure à celle des systèmes de suivi à deux axes qui eux sont plus coûteux.

Dans ce contexte, L'objectif principal de ce projet est de concevoir et de construire un suiveur solaire à deux axes en utilisant la carte Arduino UNO. L'objectif ultime est d'améliorer de manière significative l'efficacité énergétique des panneaux photovoltaïques, en assurant une orientation optimale par rapport au soleil tout au long de la journée et de l'année.

Pour mener à bien ce travail, la représentation du mémoire est structurée en trois chapitres, et répartie comme suit :

Le premier chapitre présente les notions de base concernant les énergies et les systèmes photovoltaïques.

Le deuxième chapitre est dédié à la compréhension d'un suiveur solaire et le système de refroidissement.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté les composants essentiels constituant le dispositif photovoltaïque, ainsi que la réalisation du suiveur solaire et son système de refroidissement.

Ainsi les chapitres, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I:
Généralité sur l'Énergie
Photovoltaïque

Introduction

De nos jours, l'homme dispose sur la Terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz) parce qu'elles sont faciles à exploiter et rentables. Cependant, ces énergies émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone notamment), ce qui contribue fortement au réchauffement planétaire, devenant ainsi un problème grandissant pour la Terre et les êtres vivants.

Mais il existe d'autres énergies non polluantes, renouvelables et abondantes partout sur la surface du globe qui pourraient pourtant être utilisées par l'homme. En outre, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire.

De ces énergies la plus raisonnable à exploiter est l'énergie solaire, disponible partout à la surface du globe, en quantité égale dans l'année, et un bon rendement grâce à la technologie actuelle. Elle est de plus en plus facile à exploiter et semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. L'énergie photovoltaïque a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable [1].

C'est pour cela que nous avons décidé de l'étudier plus en détail. Mais comment exploiter au mieux cette énergie ? Et quels sont les enjeux liés à son utilisation ?

I.1. Historique de la cellule photovoltaïque

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

La conversion de la lumière en électricité, appelé effet photovoltaïque, a été découverte en 1839 par un physicien français, Alexandre Edmond "Becquerel" (en irradiant une électrode en argent dans un électrolyte, il obtient une tension électrique).

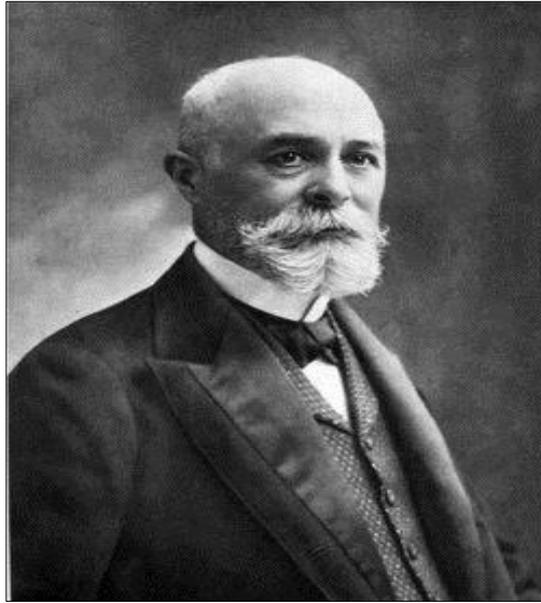


Figure I.1 : Photo d'Alexandre Edmond [2].

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

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

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



Figure I.2: Photo de trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince [2].

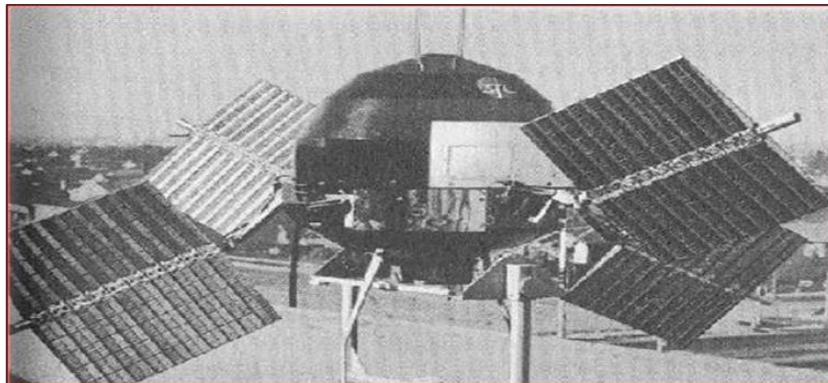


Figure I.3: Premier satellite américain [2].

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

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

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



Figure I.4: Des produits fonctionnant grâce à l'énergie solaire [2].

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne, et se sont généralisés depuis 2001. Bien que le prix se soit peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année cesse d'augmenter [2].



Figure I.5: Toits équipés de panneaux photovoltaïques [2].

I.2. Énergie et environnement

I.2.1. Définition de l'énergie

L'énergie exprime la capacité à transformer un système d'un état à un autre ou à produire un travail entraînant du mouvement, de la lumière ou de la chaleur.

Ainsi, l'énergie est la force motrice qui fait tourner le monde, car tout ce qui existe dans ce monde en a besoin pour fonctionner et subsister.

I.2.2. Types d'énergies et leurs transformations

L'énergie existe sous différentes formes : énergie rayonnante, énergie chimique, énergie mécanique, énergie thermique, énergie électrique, énergie nucléaire, énergie hydraulique, énergie éolienne, et autres. On peut classer l'énergie en deux grandes familles :

I.2.2.1. Énergie Potentielle

L'énergie potentielle d'un objet représente le travail extérieur nécessaire pour déplacer cet objet, à vitesse constante, depuis un point de référence où son énergie potentielle est nulle jusqu'au point considéré. Par exemple, l'énergie chimique (stockée dans les liaisons entre atomes et molécules), l'énergie mécanique (stockée dans les objets par tension), l'énergie nucléaire (stockée dans le noyau d'un atome), l'énergie gravitationnelle, etc.

I.2.2.2. Énergie cinétique

L'énergie cinétique se manifeste à travers le mouvement des ondes, des électrons, des atomes, des molécules, des substances et divers objets. Par exemple, l'énergie radiante (électromagnétique propagée sous forme d'ondes transversales), l'énergie thermique (vibration et mouvement des atomes et des molécules dans les substances), l'énergie électrique (apportée par de petites particules chargées appelées électrons) etc.

Dans un système fermé, l'énergie se conserve. On ne peut ni produire ni détruire l'énergie, mais seulement la « transformer » d'une forme à une autre (comme l'a énoncé Lavoisier, voir figure I.6).

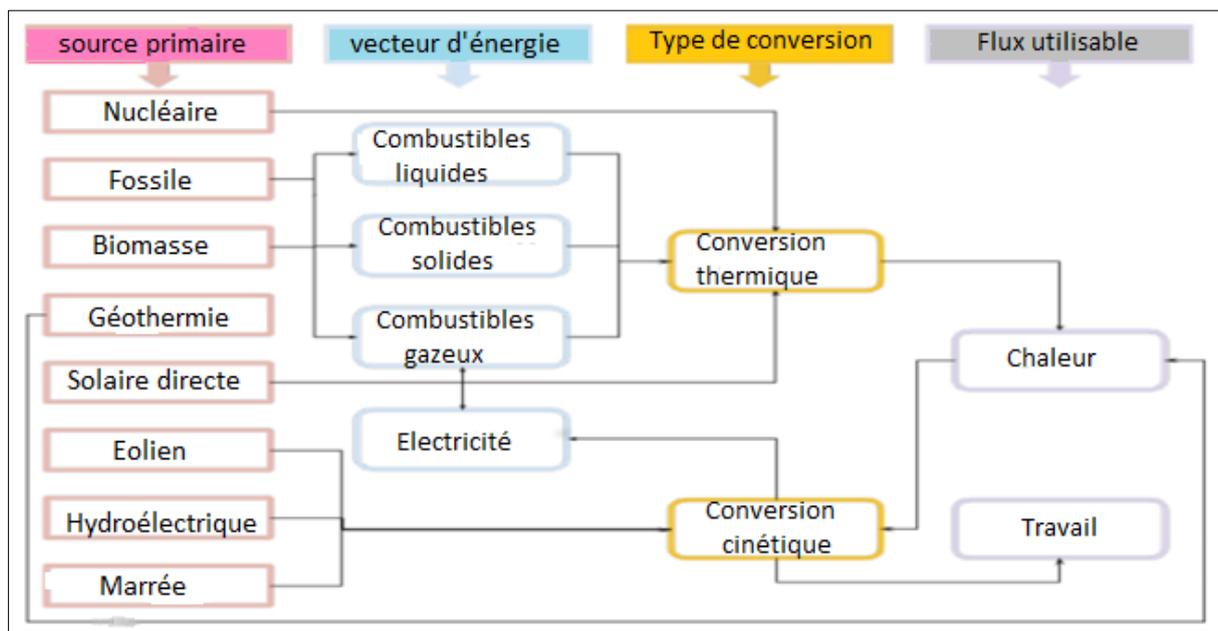


Figure I.6 : Sources d'énergies primaires et leurs transformations [3].

I.2.3. Sources d'énergie

Les sources d'énergie se divisent principalement en deux grandes catégories : les matières premières et les phénomènes naturels. En règle générale, les premières engendrent les énergies dites fossiles, tandis que les secondes génèrent les énergies dites renouvelables. En outre, il existe également l'énergie nucléaire.

I.2.3.1. Énergie fossile

Les énergies produites à partir du pétrole, du charbon ou du gaz naturel sont toutes considérées comme des « énergies fossiles ». Ces matières premières dérivent de la transformation de matière organique et sont composées de carbone ; elles sont appelées « hydrocarbures » en raison de leur excellente capacité à servir de carburants. Les énergies fossiles sont non renouvelables car leurs réserves ne sont pas infinies.

I.2.3.2. Énergie nucléaire

L'énergie atomique ou nucléaire est une forme d'énergie utilisée pour générer de l'électricité dans les centrales thermiques nucléaires. Cette énergie peut être produite de deux manières : par fusion nucléaire et par fission nucléaire d'un métal radioactif.

Lors de la fusion ou de la fission nucléaire, de la chaleur est libérée, ce qui fait bouillir de l'eau pour produire de la vapeur. Cette vapeur fait alors tourner une turbine, permettant ainsi de générer de l'électricité.

I.2.3.3. Les énergies renouvelables

On désigne aujourd'hui par énergies renouvelables un ensemble de filières énergétiques diversifiées dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale, qui est renouvelable à l'échelle du temps humaine. Ceci nous permet de dire que ces énergies sont inépuisables car elles proviennent de phénomènes naturels (voir figure I.7).

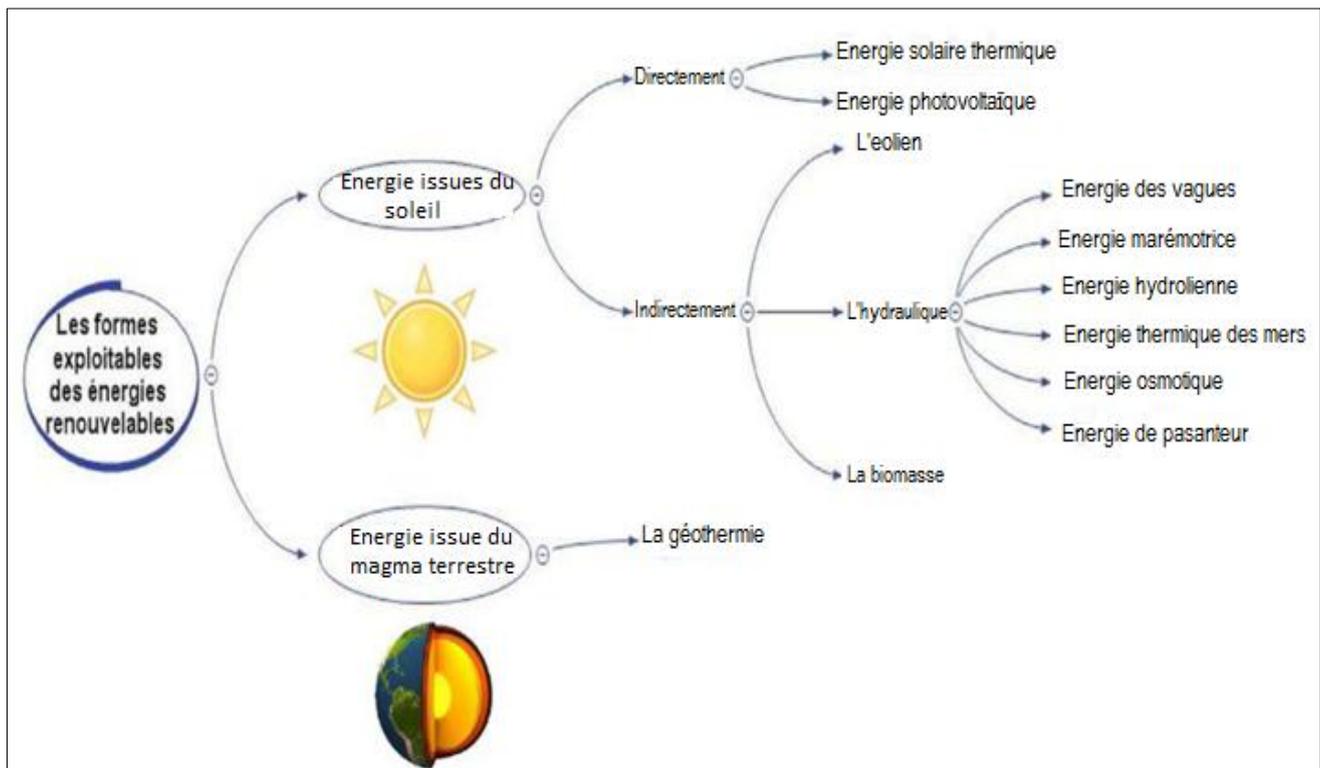


Figure I.7 : Schéma montrant quelques sources renouvelables [4].

I.3. Le potentiel d'énergie en Algérie

I.3.1. Énergie solaire

L'Algérie présente un potentiel considérable pour l'exploitation de l'énergie solaire en raison de sa situation géographique. Le pays bénéficie d'un ensoleillement exceptionnellement élevé, parmi les plus importants au monde. La durée d'insolation dépasse généralement les 2000 heures par an sur la quasi-totalité du territoire national, et peut atteindre jusqu'à 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara [5].

- ✓ L'Algérie compte parmi les pays les mieux pourvus en ressources solaires au monde. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 mètre carré est d'environ 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, ce qui équivaut à près de 1800 kWh/m²/an au Nord et 3000 kWh/m²/an au Sud du pays.

La radiation solaire moyenne est la suivante :

- Au Nord : 1800 kWh/m²/an.
- Sur les Hauts-plateaux : 2200 kWh/m²/an.
- Au Sahara : 3000 kWh/m²/an.

- ✓ La moyenne nationale de radiation solaire est de 2300 kWh/m²/an.

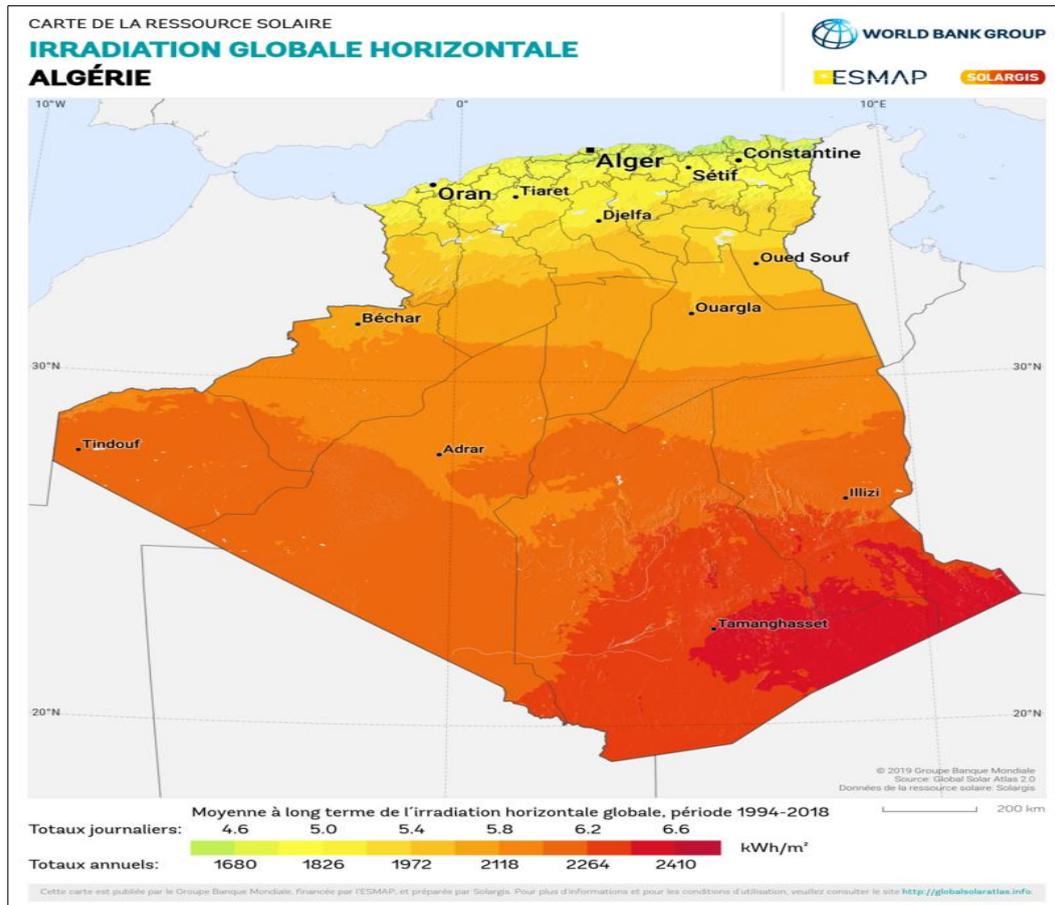


Figure I.8: La carte de l'irradiation solaire en Algérie [6].

I.3.2. Le rayonnement solaire

I.3.2.1. Définition

Le rayonnement solaire est une forme d'énergie radiante émise par le Soleil à partir de réactions de fusion nucléaire, générant de l'énergie électromagnétique. Le spectre du rayonnement solaire est similaire à celui d'un corps noir avec une température d'environ 5800 K. Environ la moitié de ce rayonnement se situe dans la partie visible du spectre électromagnétique à ondes courtes. L'autre moitié est principalement répartie dans la partie proche infrarouge, avec une fraction dans la partie ultraviolette du spectre. Les unités de mesure couramment utilisées pour le rayonnement solaire sont les watts par mètre carré [7].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement a :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm).
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm).
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt par mètre carré (kW/m^2), à plus ou moins 3%, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci.

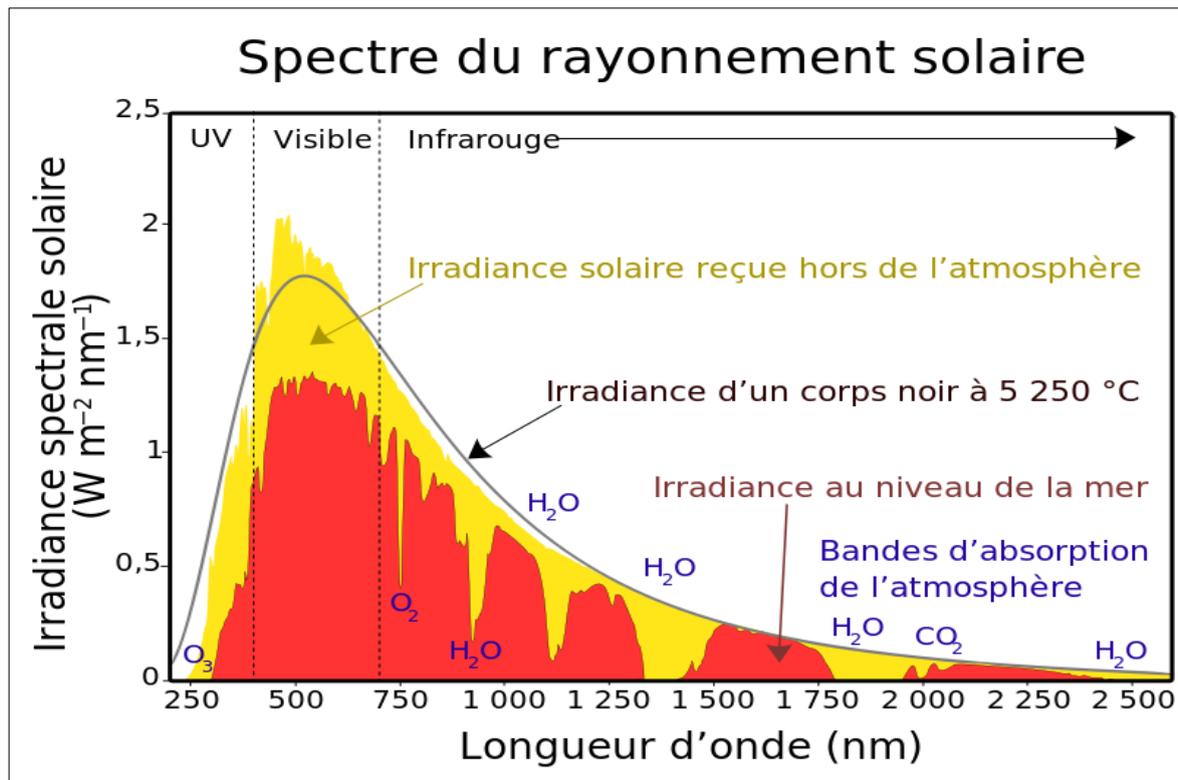


Figure I.9: Répartition du spectre solaire au-dessus de l'atmosphère terrestre [8].

I.3.2.2. Types de rayonnements

I.3.2.2.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le flux de rayonnement solaire qui atteint directement la surface terrestre depuis le Soleil. Sa quantité dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire et de l'angle d'inclinaison des rayons par rapport au sol.

Le pyréliomètre est l'instrument spécialement conçu pour mesurer l'intensité du rayonnement direct. Il est équipé d'un dispositif permettant de maintenir son orientation constamment dirigée vers le Soleil.

I.3.2.2.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus provient de l'ensemble de la voûte céleste. Il est généré par l'absorption, la diffusion et la réflexion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère ainsi que par les nuages. Pour mesurer ce type de rayonnement, on utilise un pyranomètre équipé d'un écran occultant le Soleil.

I.3.2.2.3. Rayonnement solaire réfléchi

Le rayonnement solaire réfléchi est celui qui rebondit sur la surface du sol ou sur des objets situés à sa surface. Cet effet, connu sous le nom d'albédo, peut être significatif lorsque le sol présente une forte capacité de réflexion, comme c'est le cas avec l'eau ou la neige.

I.3.2.2.4. Rayonnement global

La somme de tous les rayonnements solaires reçus, incluant le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi par le sol et les objets à sa surface, est mesurée par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

Il est important de noter que certains capteurs solaires utilisent la concentration du rayonnement solaire pour augmenter leur rendement par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent exploiter que le rayonnement direct provenant du Soleil. Dans des régions avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner de manière efficace car l'ensoleillement diffus ne peut pas être concentré en un seul point [9], [10].

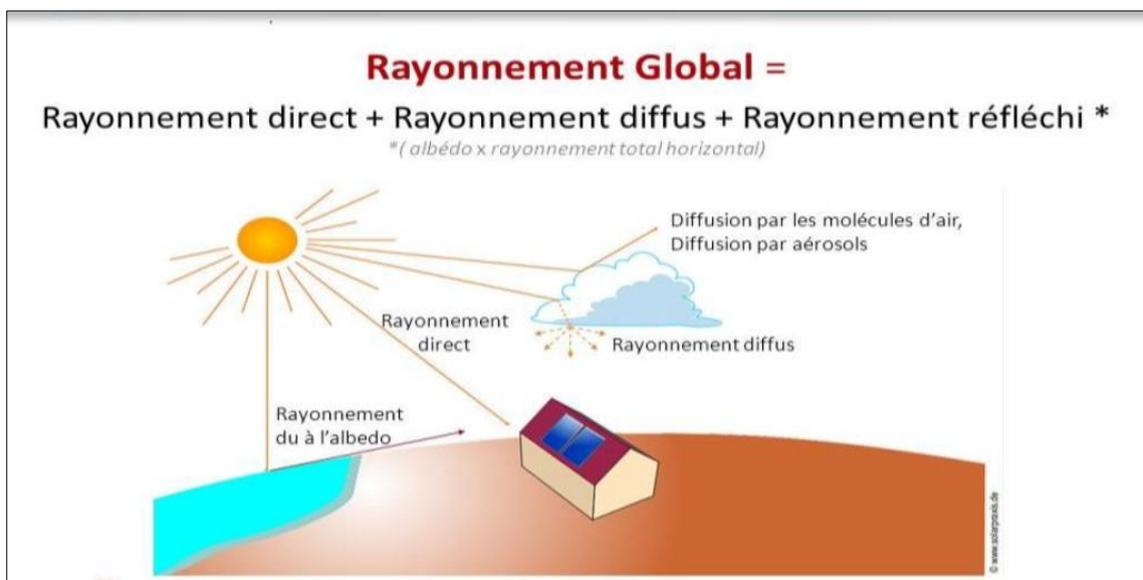


Figure I.10: Le différent type du rayonnement solaire [9].

I.3.2.3. Rayonnement en Algérie

Il semble que vous souhaitiez décrire les caractéristiques du gisement solaire en Algérie. Voici une reformulation basée sur les informations que vous avez fournies :

L'Algérie bénéficie d'un important gisement solaire en raison de son climat favorable. La puissance solaire maximale atteint environ 1 kW/m^2 à tous les endroits du pays. En moyenne, l'énergie solaire quotidienne maximale sous un ciel clair, particulièrement en juillet, dépasse les 6 kWh/m^2 . Sur une base annuelle, l'énergie maximale reçue en Algérie est estimée à environ 2500 kWh/m^2 [11].

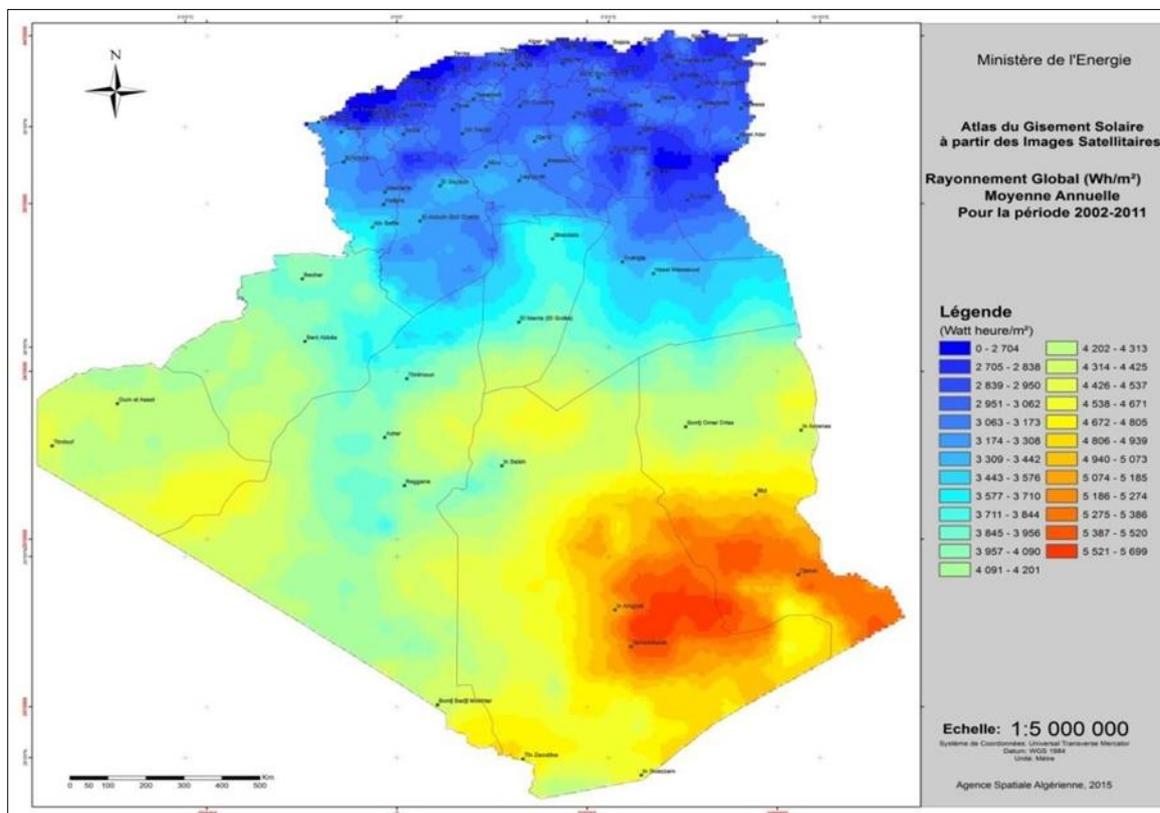


Figure I.11: Les différentes zones énergétiques dans l'Algérie [12].

I.4. La cellule photovoltaïque

I.4.1. Technologie photovoltaïque

Le photovoltaïque (PV) tire son nom du processus de conversion de la lumière (photons), connu sous le nom d'effet photovoltaïque. Ce phénomène a été pionnier en 1954 par des chercheurs des laboratoires Bell, qui ont développé une cellule en silicium capable de générer un courant électrique lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil.

La technologie photovoltaïque représente un moyen d'exploiter l'énergie solaire pour produire de l'électricité, réduisant ainsi notre dépendance aux combustibles fossiles. Les systèmes photovoltaïques (PV) offrent des avantages environnementaux distincts par rapport aux technologies conventionnelles de production d'électricité [13].



Figure I.12: Centrale photovoltaïque [13].

I.4.2. Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est un composant optoélectronique conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique. La structure la plus simple de ce dispositif ressemble à une diode photosensible basée sur des matériaux semi-conducteurs qui exploitent l'effet photovoltaïque. Ce phénomène physique, propre à certains matériaux, permet la transformation directe de l'énergie lumineuse en électricité.

La figure (I.13) représente la structure d'une cellule photovoltaïque [14].

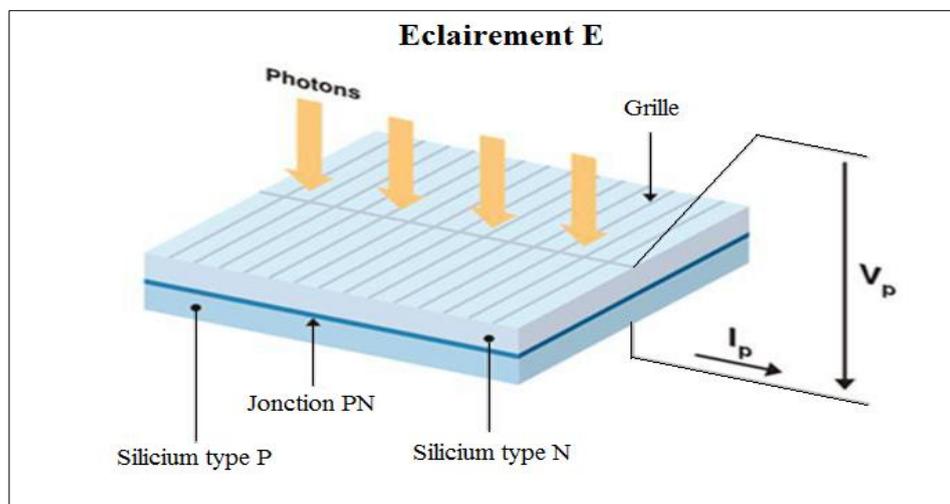


Figure I.13 : Structure d'une cellule photovoltaïque [15].

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du Soleil, les photons de la lumière excitent les atomes du matériau. Cette excitation provoque une libération d'électrons des couches électroniques supérieures (électrons de valence). Sur la figure (I.14), ce principe est illustré.

Si l'électron revient à son état initial, l'excitation se traduit par un chauffage du matériau où l'énergie cinétique du photon est convertie en énergie thermique. Cependant, si les électrons excités ne retournent pas à leur état initial, ils peuvent induire une tension électrique continue faible, typiquement entre 0,3 V et 0,7 V, en fonction du matériau, de sa structure et de la température de la cellule [16].

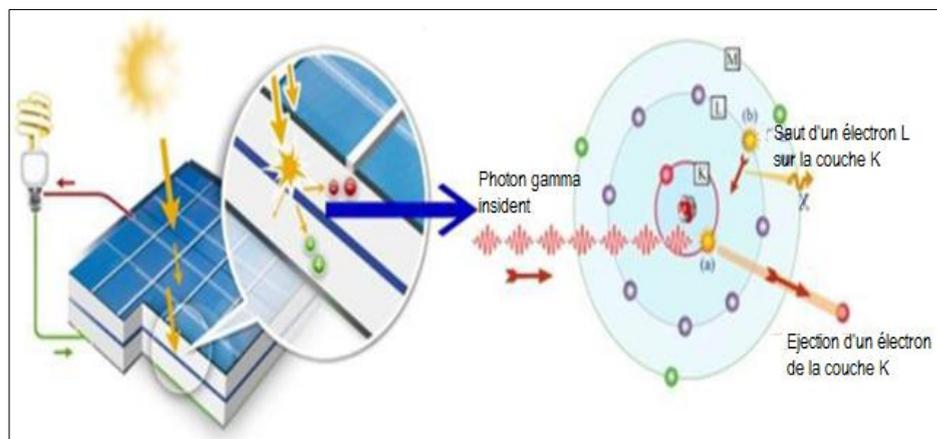


Figure I.14 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [17].

Pour collecter le courant électrique généré, des électrodes sous forme de grille sont déposées sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure est conçue pour permettre le passage des rayons lumineux. Par la suite, une couche antireflet est appliquée sur cette électrode afin d'augmenter l'absorption de la lumière [14].

I.4.3. Les différents types de panneaux photovoltaïques

Les panneaux les plus courants sont généralement constitués :

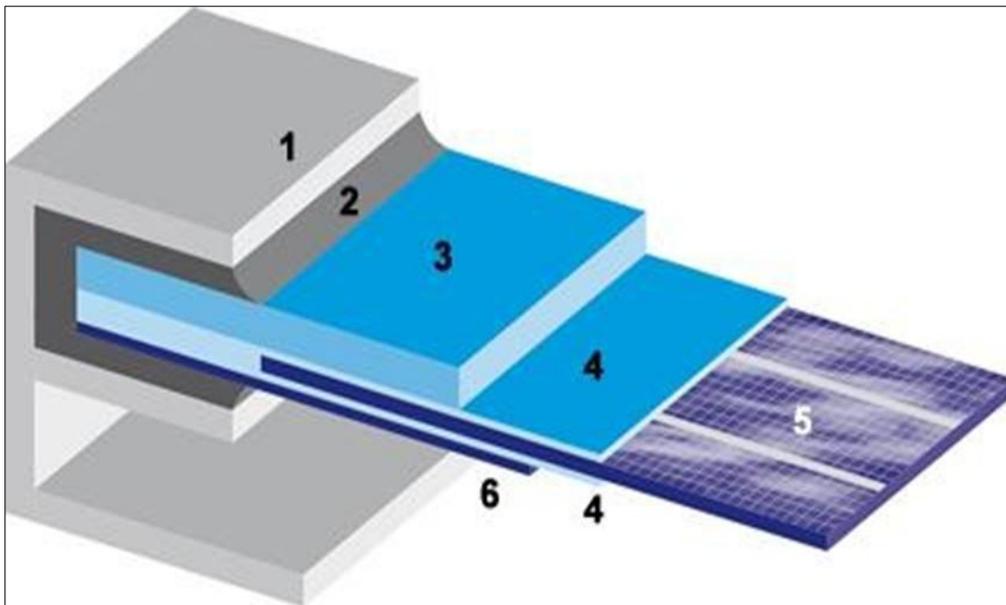


Figure I.15: Structure d'un panneau photovoltaïque [18].

- Un cadre de support et un joint d'étanchéité (1 et 2).
- Une plaque de verre extra claire favorisant la transmission lumineuse (3).
- Deux couches d'Ethylène-Acétate de vinyle (EVA) qui enrobent les cellules assurant leur protection contre les intempéries et l'humidité (4).
- Les différents strings de cellules (5).
- Une feuille de Tedlar (ou éventuellement du verre) comme face arrière du module. Ce polymère à haute résistance aux UV et la haute température assure au module sa résistance mécanique face aux chocs (vent, transport...) (6) [18].

I.4.3.1. Les panneaux photovoltaïques polycristallins

Pendant le refroidissement du silicium, plusieurs cristaux se forment. Ce type de cellule est également bleu, mais pas uniforme ; on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

- **Avantages**
 - Bon rendement (environ 100 Wc/m²).
 - Durée de vie importante (+/- 30 ans).

- Moins cher que le monocristallin.

➤ **Inconvénients**

- Rendement faible sous un faible éclairement [19].

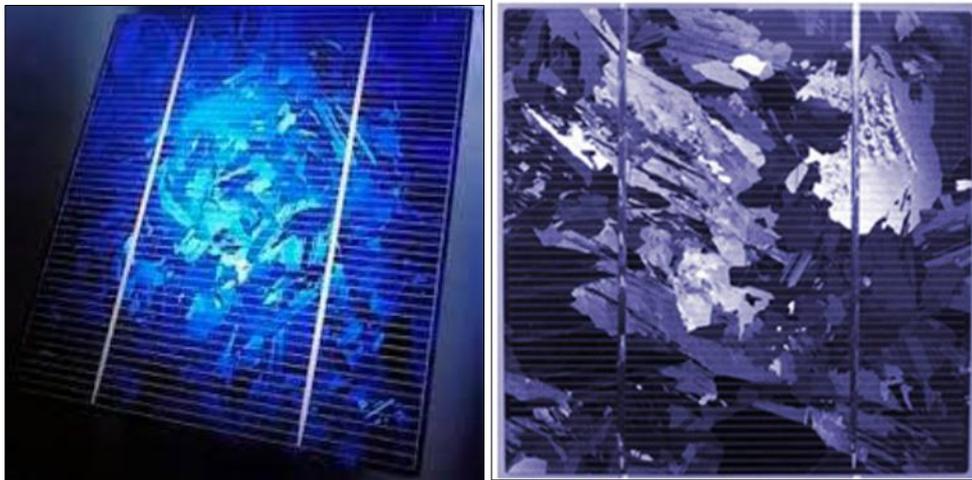


Figure I.16: Panneaux polycristallin [19].

I.4.3.2. Les panneaux photovoltaïques monocristallins

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en formant un seul cristal de grande dimension. Ensuite, on découpe le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

➤ **Avantages**

- Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m^2).
- Durée de vie importante (+/- 30 ans).

➤ **Inconvénients**

- Plus cher que le polycristallin.
- Rendement faible sous un faible, éclairement [19].

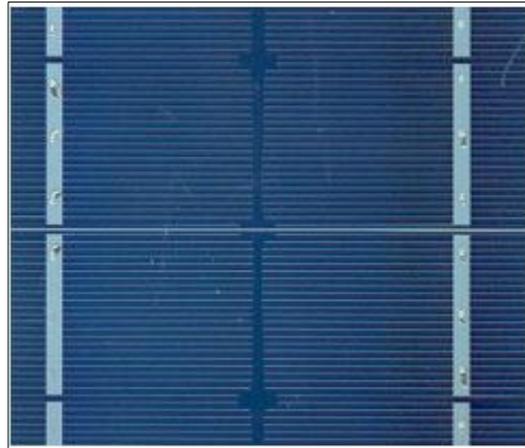


Figure I.17: Panneaux monocristallin [19].

I.4.3.3. Les panneaux solaires amorphes

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres dites « solaires ». Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est de couleur gris très foncé ou marron. Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur avec une faible consommation énergétique durant le cycle de production, et son aptitude à être déposé sur de grandes surfaces (de l'ordre de 1 m²).

Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent des rendements relativement faibles (inférieurs à 10% au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au fil du temps [20].

➤ **Avantages**

- Fonctionnent avec un éclairage faible.
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules.
- Moins sensible aux températures élevées.
- Souple.

➤ **Inconvénients**

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m^2), les cellules en couche mince nécessitent 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 [19].

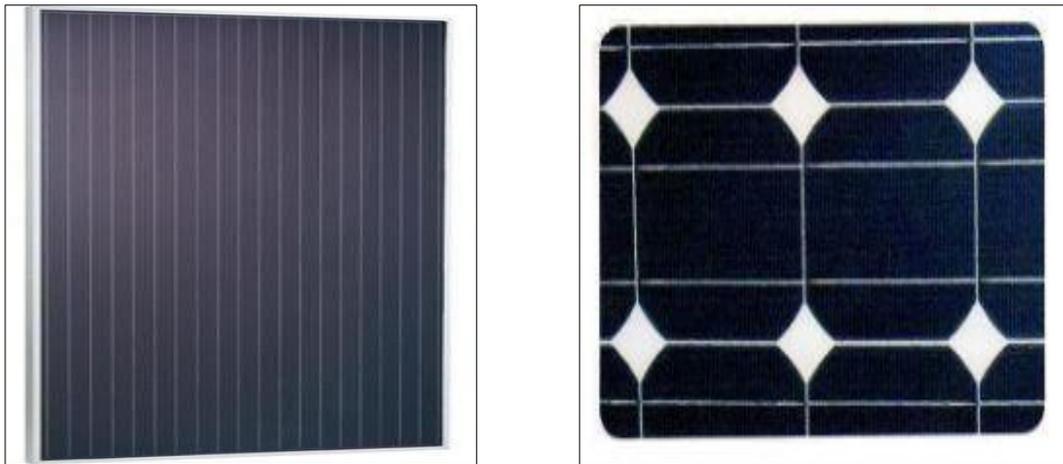


Figure I.18: Panneaux amorphe [20].

I.4.3.4. Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

➤ **Avantages**

- Meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince.
- La cellule peut être construite sur un substrat flexible.

➤ **Inconvénients**

- Les cellules en couche mince ont un rendement plus faible que les cellules "épaisses" [19].

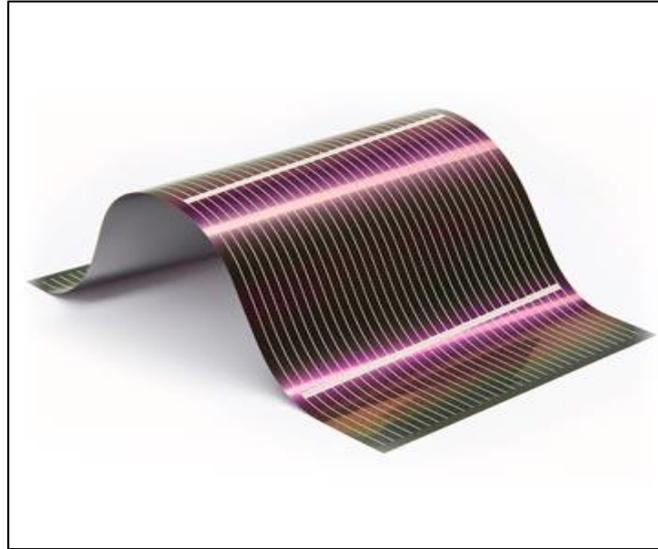


Figure I.19: Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre [19].

I.4.3.5. Cellule multijonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire, ce qui permet d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

➤ Avantages

- Rendement inégalé.

➤ Inconvénients

- Pas ou peu d'applications commerciales [19].

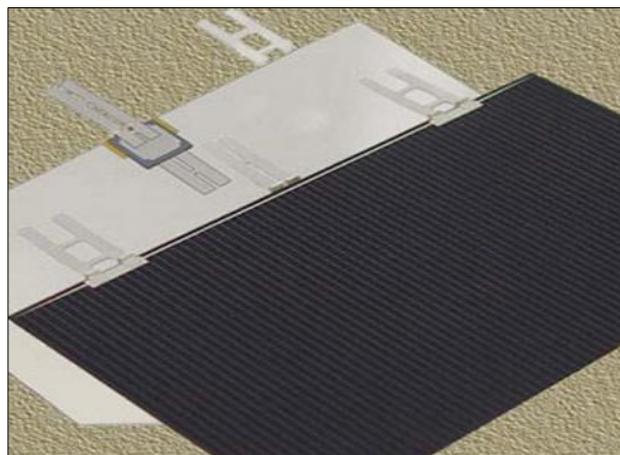


Figure I.20: Cellule multi-jonction [19].

I.4.4. Regroupement des cellules photovoltaïques

I.4.4.1. Cellules mise en série

Une association en série de N_s cellules permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Dans ce type d'association, toutes les cellules sont parcourues par le même courant. La caractéristique résultante du groupe en série est obtenue en additionnant les tensions individuelles de chaque cellule.

Les figures (I.21; I.22) montrent les caractéristiques résultantes (I_{SCC} , V_{SCO}) obtenues en associant en série N_s cellules identiques.: [21].

$$I_{SCC} = I_{CC} \quad ET \quad V_{SCO} = N_s \cdot V_{CO} \quad (I.1)$$

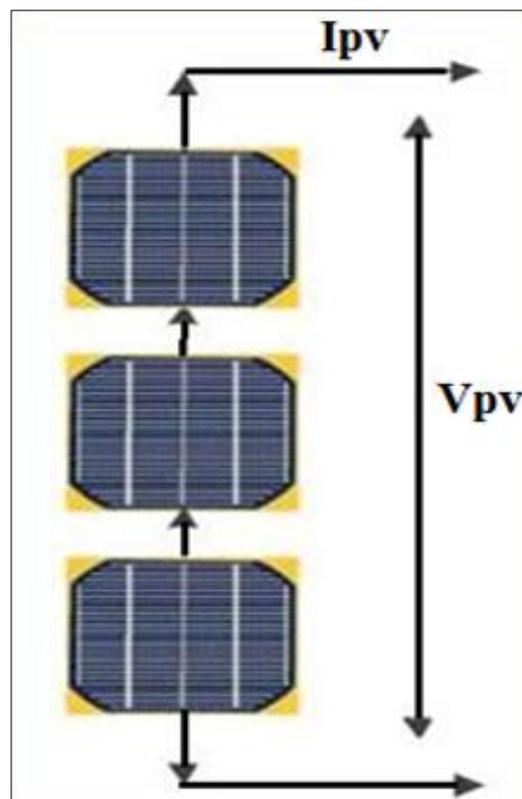
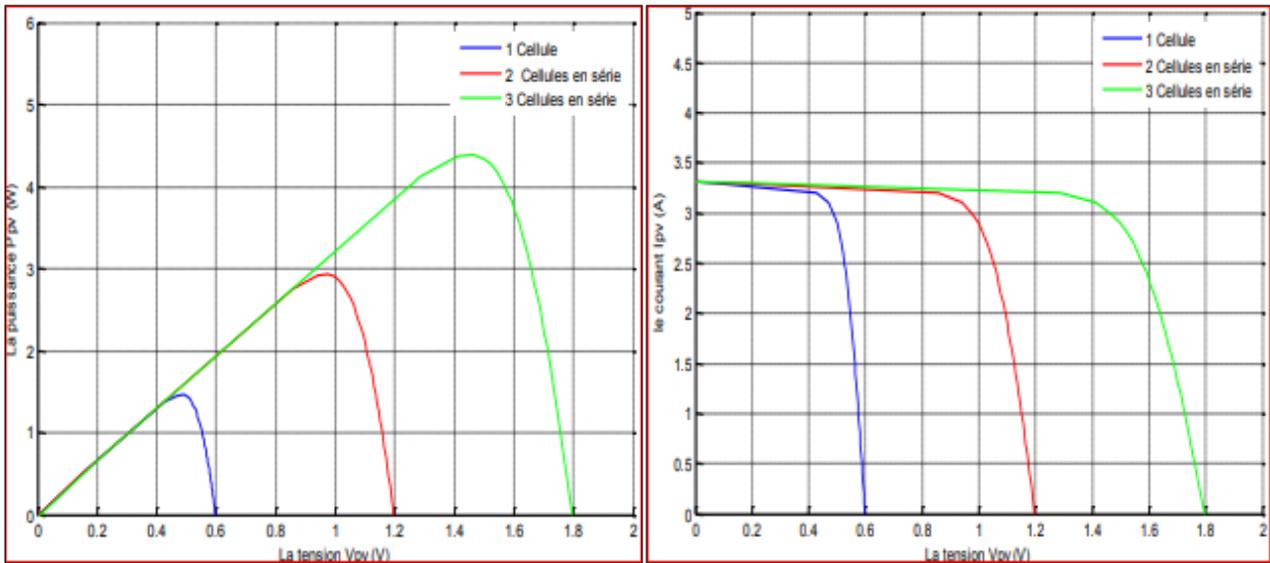


Figure I.21: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série [21].



A) Caractéristique P-V des cellules

B) Caractéristique I-V des cellules

Figure I.22: Caractéristique résultantes d'un groupement de Ns cellules en série [21].

I.4.4.2. Cellules Mise en parallèle

D'autre part, une association en parallèle de Np cellules est également possible et permet d'augmenter le courant de sortie du générateur photovoltaïque ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, toutes les cellules sont soumises à la même tension. La caractéristique résultante du groupement en parallèle est obtenue en additionnant les courants individuels de chaque cellule.

Les figures (I.23; I.24) illustrent les caractéristiques résultantes (I_{pcc} , V_{pco}) obtenues en associant en parallèle Np cellules identiques [21].

$$I_{PCC} = N_p \cdot I_C \quad \text{et} \quad V_{PCO} = V_{CO} \quad (I.2)$$

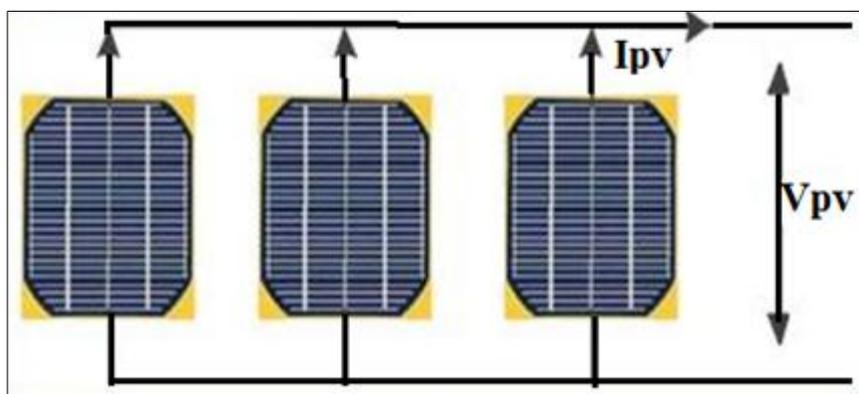
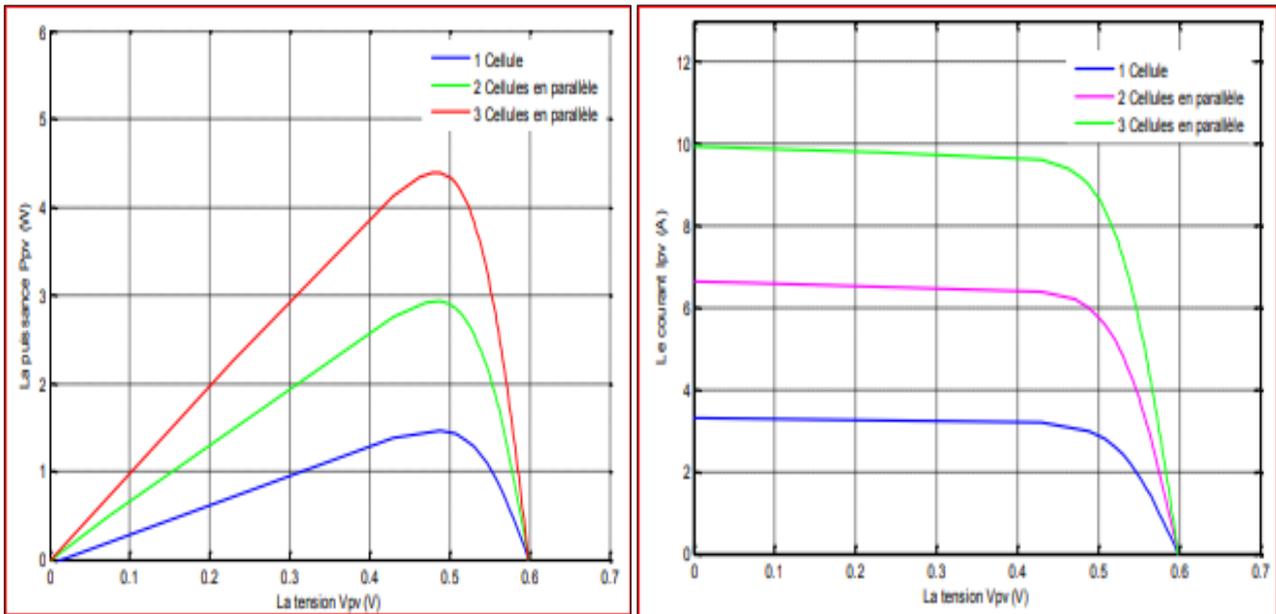


Figure I.23: schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle [21].



A) Caractéristique P-V des cellules PV

B) Caractéristique I-V des cellules PV

Figure I.24: Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle [21].

I.4.4.3. Regroupement (série et parallèle)

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

Le groupement mixte ou hybride, illustré dans la figure (I.25), est un assemblage de N branches de cellules photovoltaïques en parallèle, où chaque branche est l'association de M cellules en série. Les valeurs du circuit ouvert V_{pv} et le courant de court-circuit I_{pv} délivrés par ce panneau PV sont en fonction des caractéristiques des cellules élémentaires (V_c).

$$I_{PV} = N \cdot I_{CC} \quad (I.3)$$

La puissance fournie par le module est :

$$P_{PV} = M \cdot N_{CO} \cdot I_{CC} \quad (I.4)$$

Avec V_{co} et I_{cc} : tension de circuit ouvert et courant de court-circuit respectivement de la cellule élémentaires.

M , N : nombre de cellules en série et nombre de branches en parallèle respectivement [22].

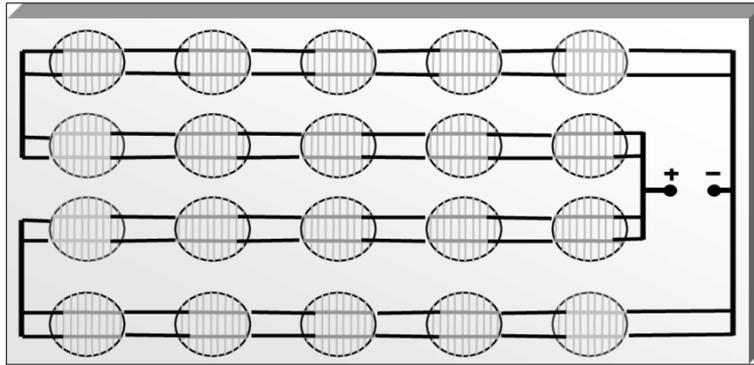


Figure I.25: Groupement des cellules en série-parallel [23].

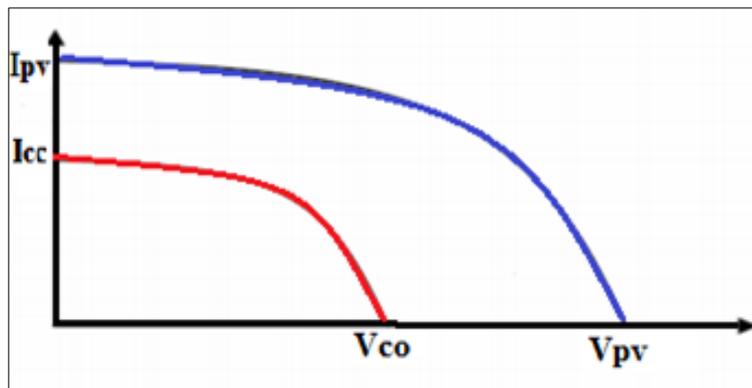


Figure I.26: Caractéristique résultantes d'un groupement de N_s - N_p cellules en série-parallel [22].

I.5. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

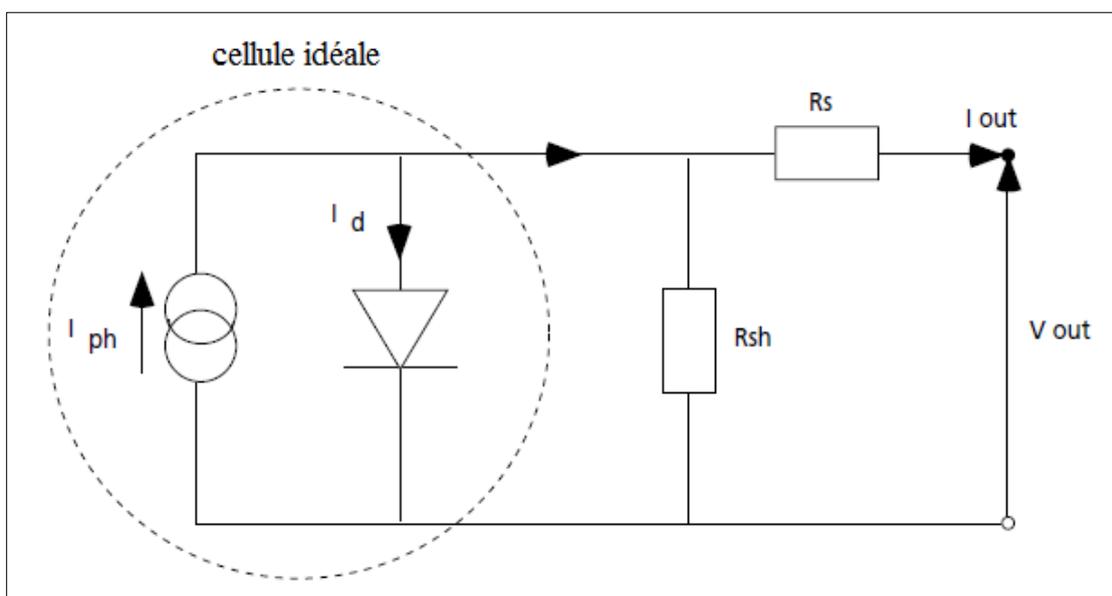


Figure I.27: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [24].

Une cellule photovoltaïque demeure l'élément fondamental de tout générateur photovoltaïque, indépendamment de sa puissance. Le schéma équivalent d'une cellule solaire est représenté dans la figure (I.27). Il comprend une source de courant idéale en parallèle avec une diode, ainsi que deux résistances pour modéliser les pertes internes.

R série (R_s) représente la résistance série qui prend en compte les pertes ohmiques à travers le matériau semi-conducteur. R shunt (R_{sh}) représente une résistance en parallèle, également appelée résistance de fuite, qui résulte des courants parasites entre la partie supérieure et inférieure de la cellule, particulièrement le long des bords et à travers le matériau en raison d'irrégularités ou d'impuretés.

Pour prédire avec précision les performances d'une cellule photovoltaïque, il est essentiel de connaître et de modéliser ces paramètres, car ils influencent directement les caractéristiques électriques de la cellule.

Selon la figure (I.27), le courant généré par la cellule photovoltaïque I est donné par :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (I.5)$$

Où :

I_{Rsh} le courant qui traverse R_{sh} :

$$I_{Rsh} = \frac{V + (R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

I_D : Le courant traversant la diode est donné par :

$$I_D = I_s \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (I.7)$$

La forme mathématique du courant à partir des équations (I.5), (I.6) et (I.7) précédentes comme suit:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\left(e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T}} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \right) \quad (I.8)$$

Avec :

I : courant fourni par une cellule (Ampère).

I_{ph} : Photo courant (Ampère).

I_s : courant de saturation de la diode (Ampère).

V : tension aux bornes de la cellule (Volt).

q : la charge de l'électron ($q = 1.602 \times 10^{-19}$ Coulombs).

k : la constante de Boltzmann, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

T : la température effective de la cellule en Kelvin (K).

A: le facteur de non idéalité de la jonction ($1 < A < 3$).

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

R_s : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions [24].

I.6. Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$

I.6.1. Influence de l'éclairement et de la température

L'éclairement et la température modifient la caractéristique I-V de la cellule solaire, mais pas dans sa forme générale. Ils influent principalement sur les valeurs de I_m et V_m .

I.6.1.1. Influence de l'éclairement sur un PV

Les caractéristiques des figures (I.29) et (I.30) illustrent clairement la variation du courant et de la puissance d'un module PV en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. Ces graphiques montrent également l'existence de maxima sur les courbes de puissance. Ces points représentent les points de puissance maximale lorsque l'irradiation varie, pour une température donnée.

Le courant de court-circuit (I_{cc}) varie proportionnellement à l'irradiation, ce qui signifie qu'il augmente lorsque l'irradiation augmente. En revanche, la tension de circuit ouvert (V_{co}) varie très peu avec l'irradiation, restant relativement constante pour une plage donnée de conditions d'éclairement et de température.

Ces caractéristiques sont essentielles pour comprendre et optimiser les performances des modules photovoltaïques dans différentes conditions d'exploitation [25].

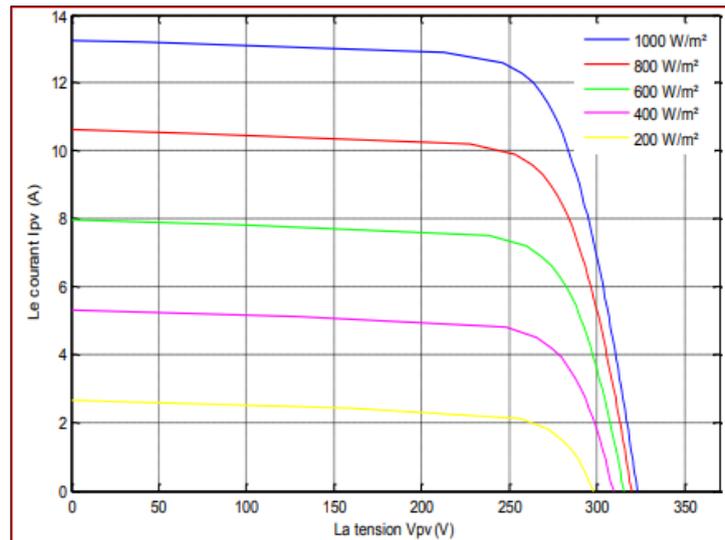


Figure I.28: Caractéristique I(V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement [25].

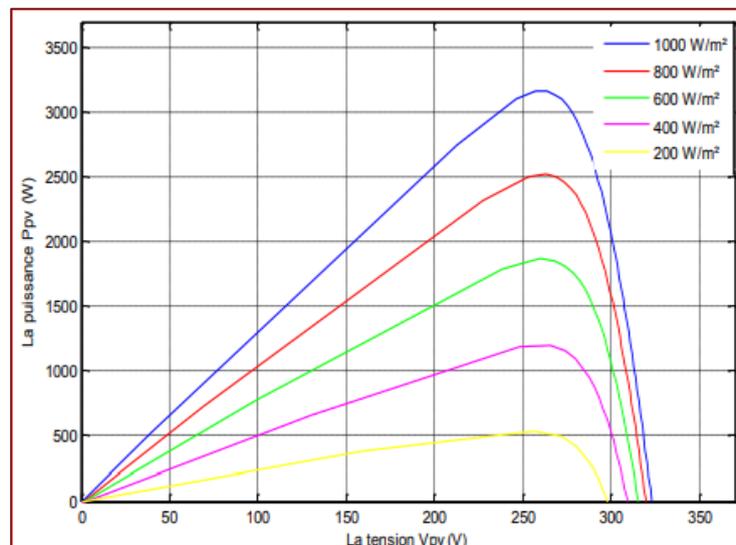


Figure I.29: Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement [25].

I.6.1.2. Influence de la température sur un PV

La température est un paramètre critique qui influence considérablement le comportement des cellules solaires, étant donné qu'elles sont exposées au rayonnement solaire direct. Les figures (I.31) et (I.32) montrent l'impact de la température sur les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques.

On observe que lorsque la température augmente, le courant de court-circuit (I_{cc}) augmente également, tandis que la tension de circuit ouvert (V_{co}) diminue nettement. Cette diminution de V_{co} est due aux effets thermiques sur les propriétés du matériau semi-conducteur.

L'augmentation de la température entraîne généralement une diminution de la tension maximale (V_m) et une légère augmentation du courant maximal (I_m). En conséquence, il y a une diminution relative de la puissance maximale (P_m), comme illustré dans la figure.

Ces variations sont cruciales pour la conception et l'exploitation efficace des systèmes photovoltaïques, car elles affectent directement les performances et la fiabilité des cellules solaires dans des conditions réelles d'exploitation [25].

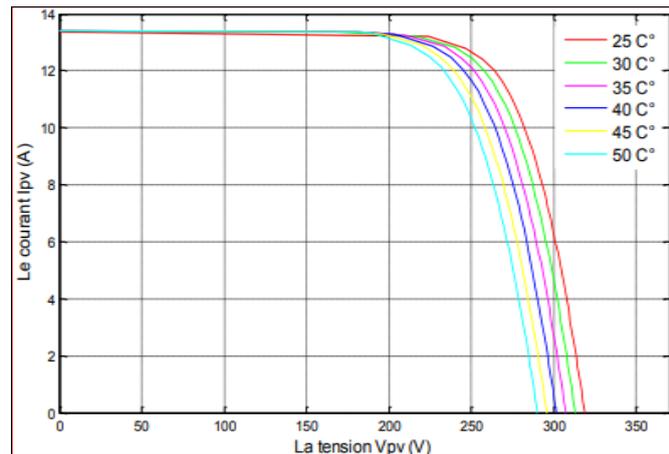


Figure I.30: Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes valeur de température [25].

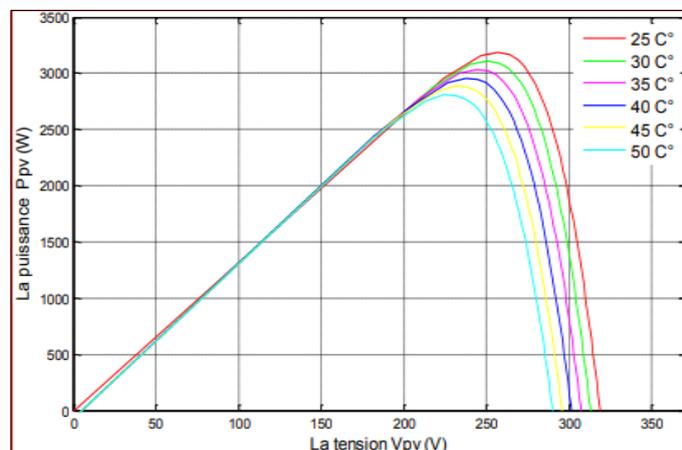


Figure I.31: Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeur de température [25].

I.7. Module photovoltaïque

La puissance disponible aux bornes d'une seule cellule photovoltaïque est généralement insuffisante pour répondre aux besoins des applications domestiques ou industrielles courantes. Pour atteindre des niveaux de puissance compatibles avec ces besoins, plusieurs cellules sont souvent associées pour former des modules photovoltaïques, comme illustré dans la figure (I.33).

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension tout en maintenant le même courant, tandis que les connexions en parallèle augmentent le courant tout en conservant la tension. Cette combinaison permet d'adapter la sortie électrique du module aux exigences spécifiques de l'application.

Pour assurer la durabilité et la performance des modules PV, les cellules sont encapsulées dans un polymère tel que l'éthylène-vinyl-acétate (EVA), qui les protège de l'humidité. De plus, la surface avant des modules est recouverte de verre trempé à haute transmission optique et à bonne résistance mécanique, tandis que la surface arrière est généralement protégée par du polyéthylène.

Ces mesures de protection et d'encapsulation garantissent que les modules PV peuvent fonctionner efficacement pendant de nombreuses années dans diverses conditions climatiques.

Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelques watts-crête et quelques dizaines de watts-crête (1 m² de cellules PV produit de l'ordre de 100 W). Pour obtenir des puissances supérieures, il est donc nécessaire d'associer en série et/ou en parallèle plusieurs modules pour former un panneau photovoltaïque (champ photovoltaïque).

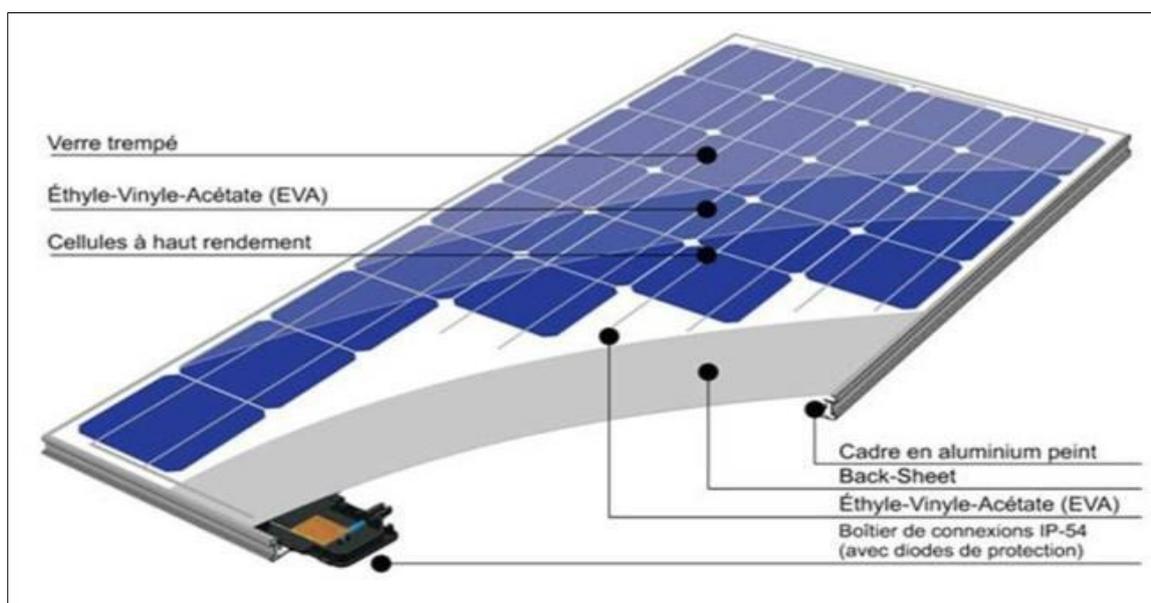


Figure I.32 : Module photovoltaïque [26].

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes:

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur .

À l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes Antiparallèles.

Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [26].

I.7.1. Panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque, ou champ photovoltaïque, représenté sur la figure (I.34), est constitué de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance crête nécessaire, définie selon des conditions spécifiques d'éclairement et de température. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui soutient le champ solaire avec un angle d'inclinaison particulier [27].

L'orientation plein Sud des modules est essentielle pour capter un maximum de lumière tout au long de la journée, ce qui se traduit par un pic de production autour de midi lorsque le Soleil est au plus haut. L'inclinaison joue également un rôle crucial pour maximiser le flux solaire reçu ; des expériences ont montré qu'un angle d'inclinaison d'environ 30 degrés permet d'obtenir un rendement optimal.

Chaque panneau peut avoir autant de sorties que de modules, nécessitant ainsi une boîte de dérivation qui regroupe toutes les connexions entre les modules pour assurer une production optimale d'électricité [28]. Cette boîte de dérivation est fixée sur la structure de montage et joue un rôle central dans l'optimisation des connexions électriques au sein du système photovoltaïque.



Figure I.33: Panneaux photovoltaïques [29].

La figure(I.35) représente les différentes composantes d'un champ photovoltaïque :

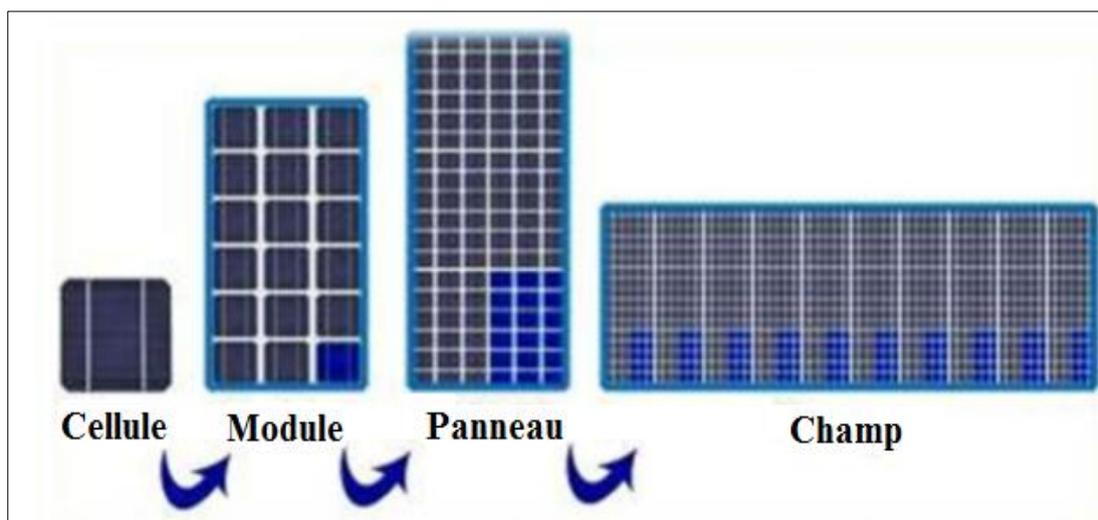


Figure I.34 : Composants d'un champ de modules photovoltaïques [30].

I.7.2. Système photovoltaïque

La figure (I.36) montre la structure d'un système photovoltaïque.

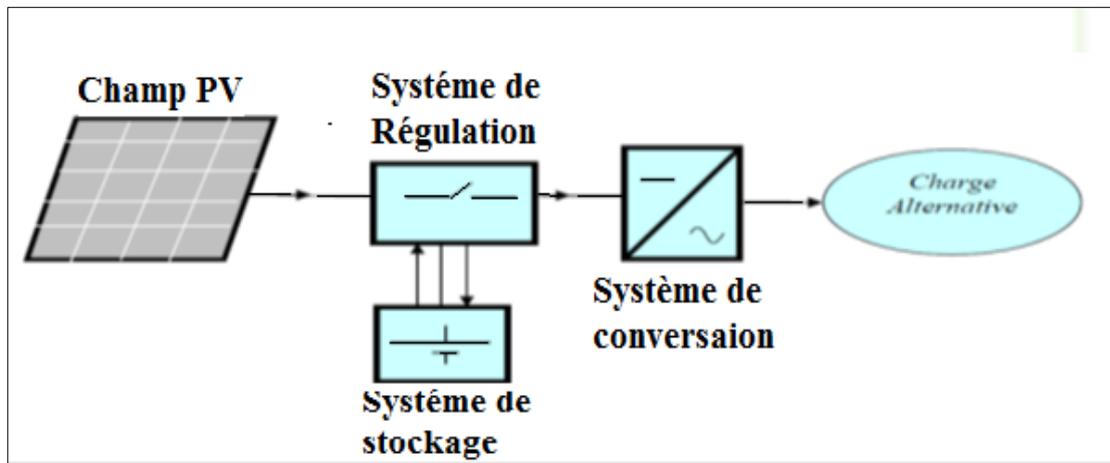


Figure I.35 : Schéma d'un système photovoltaïque [31].

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés, selon les exigences, sont de trois types : autonome, raccordée au réseau et hybride [31].

I.7.2.1. Système photovoltaïque autonomes

Les installations autonomes, ou « stand-alone », ne sont pas connectées au réseau, mais doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance de sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, donc l'autonomie du système PV est assurée par un système de stockage d'énergie.

En général, ces installations comprennent quatre éléments, voir figure (I.37) :

- Un ou plusieurs modules PV.
- Un système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries.
- Un onduleur.

L'énergie produite est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif [27].

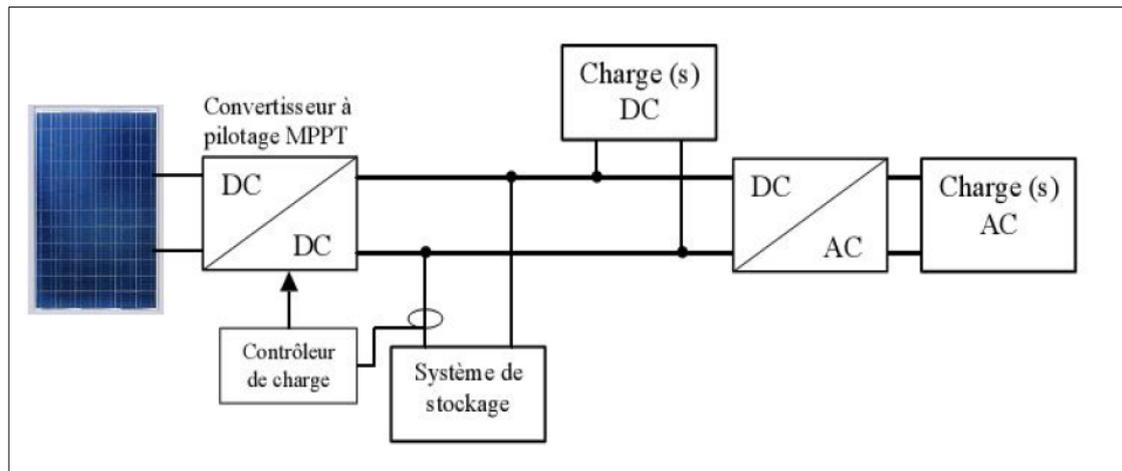


Figure I.36 : Système photovoltaïque autonome [27].

La majorité des populations éloignées des réseaux électriques vivent dans des zones rurales où l'implantation de tels réseaux est difficile, en raisons d'accès limité ou de contraintes financières.

Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, offrant aux populations un accès à l'électricité à un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.

I.7.2.2. Système photovoltaïque raccordé à un réseau

Non autonome, ou « grid connected », le système peut également être connecté au réseau. La figure (I.38) montre une configuration de ce système. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques, l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau; une éventuelle panne de ce dernier rend non opérationnel le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins [31].

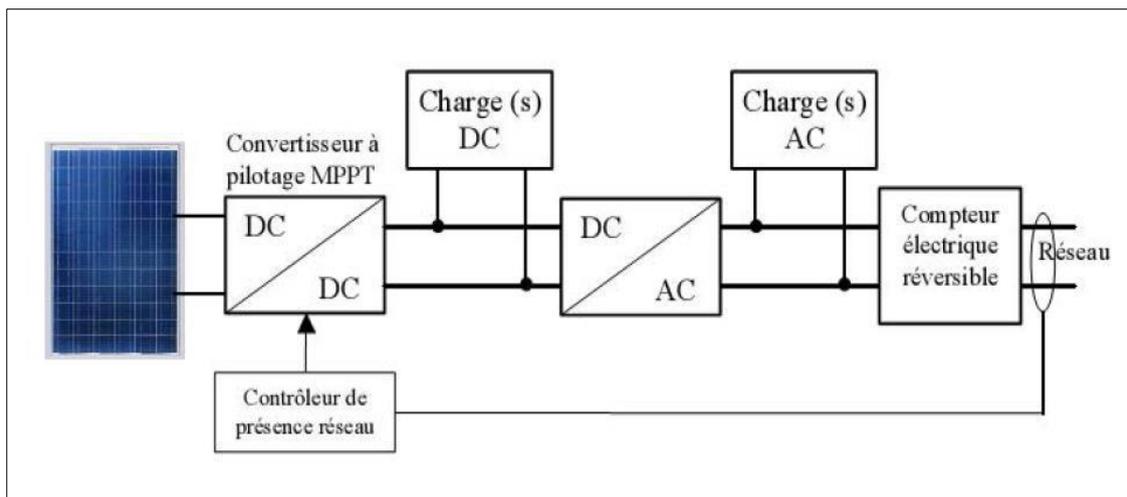


Figure I.37 : Système photovoltaïque raccordé aux réseaux [31].

I.7.2.3. Système photovoltaïque hybride

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendantes des réseaux de distribution d'électricité.

En pratique, le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène combustible, ou aux deux à la fois, avec des accumulateurs de stockage de l'énergie, voir figure (I.39). Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

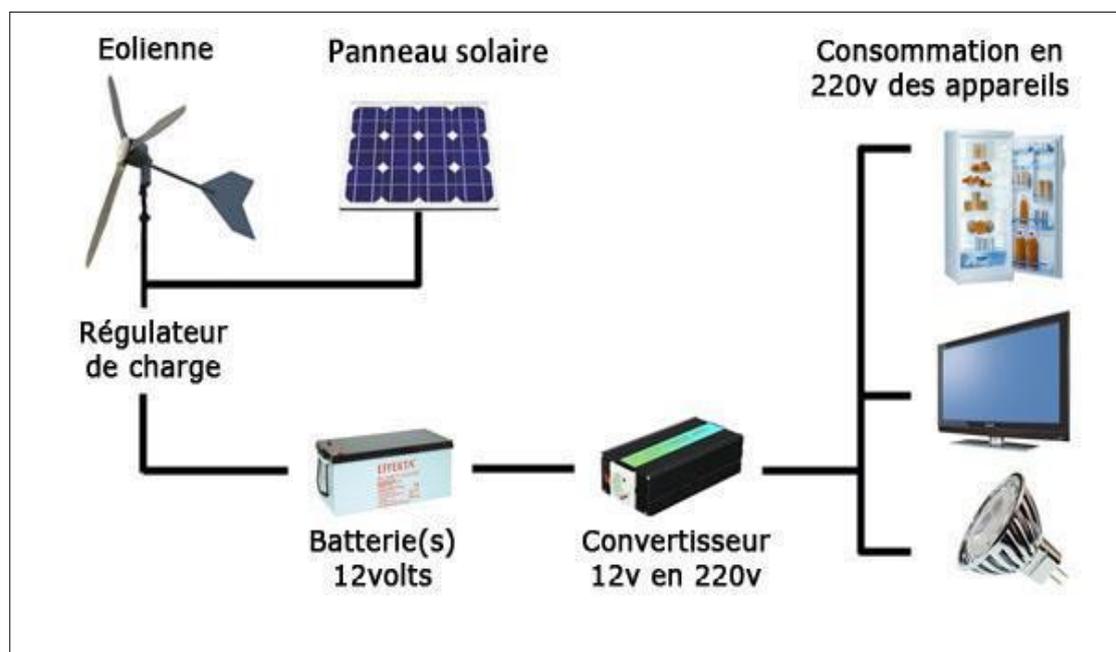


Figure I.38 : Système hybride PV-Eolienne [32].

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et/ou fossiles ainsi que des moyens de stockage associés [32].

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères tels que la simplicité, l'application, l'environnement, etc. Toutefois, l'étude des systèmes photovoltaïques se résume à l'étude de l'adaptation de la charge constituée soit d'une batterie, soit d'une charge quelconque, par rapport à l'ensemble des modules solaires [31].

I.8. Protection des modules photovoltaïques

Pour garantir une durée de vie prolongée des installations photovoltaïques destinées à la production d'énergie électrique sur plusieurs années, plusieurs protections électriques sont essentielles pour éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et en parallèle dans les panneaux solaires. Deux types de protections classiques sont couramment utilisés dans les installations actuelles, comme illustré dans la figure (I.40) :

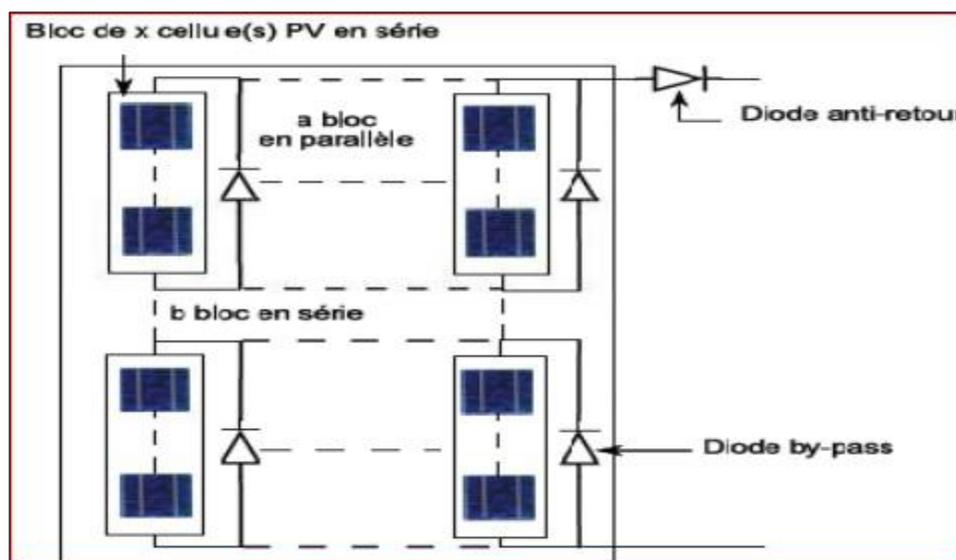


Figure I.39: Protections d'un module PV [33].

Les diodes anti-retour jouent un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques en empêchant le courant inverse de circuler à travers les générateurs photovoltaïques. Ce phénomène peut se produire lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle ou lorsqu'une charge connectée directement, comme une batterie pendant la nuit, peut basculer du mode récepteur au mode générateur.

Les diodes by-pass, quant à elles, sont utilisées pour isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement solaire n'est pas uniforme. Elles préviennent ainsi la formation de points chauds qui pourraient endommager les cellules mal éclairées. Cependant, la mise en conduction de ces diodes by-pass affecte la caractéristique de sortie du générateur photovoltaïque, comme illustré dans la figure (I.41). Cela entraîne une perte d'une partie de l'énergie produite et peut induire la présence de deux maxima de puissance dans la courbe caractéristique du générateur [33].

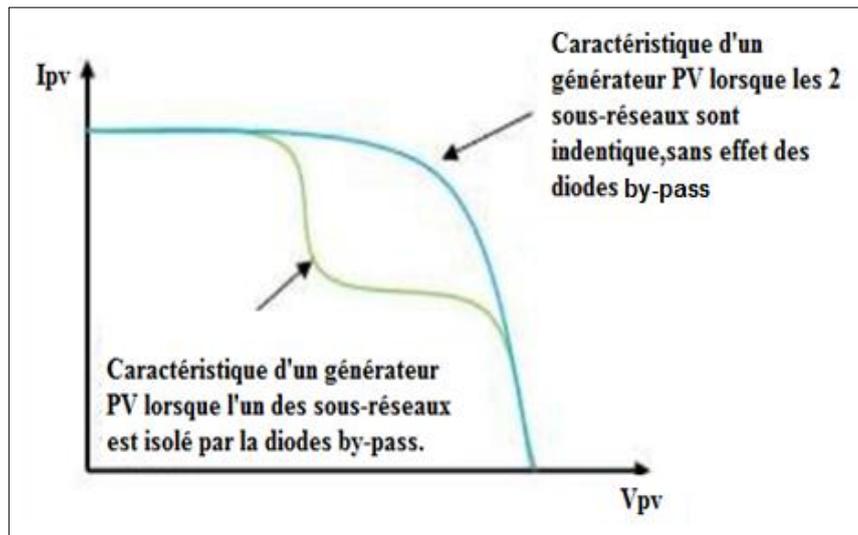


Figure I.40: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV [33].

I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie PV

L'énergie photovoltaïque (PV) présente divers avantages et inconvénients à prendre en compte lors de son utilisation.

I.9.1. Avantages de l'énergie photovoltaïque

Les avantages de l'énergie photovoltaïque comprennent :

- **Disponibilité mondiale :** La lumière du soleil est disponible partout dans le monde.
Haute fiabilité : Pas de pièces mobiles, ce qui augmente la fiabilité.
- **Adaptabilité aux régions isolées :** Idéal pour les régions éloignées, comme dans l'espace.
- **Proximité de la production et de la consommation :** Réduit les pertes en ligne.
- **Facilité de montage et modularité :** Facilement adaptable à différents besoins énergétiques, avec des systèmes allant de quelques watts à plusieurs mégawatts.

- **Absence de pollution** : Aucune pollution directe ou indirecte, en faisant une source d'énergie propre et écologique.
- **Coût de fonctionnement réduit** : Faibles coûts d'entretien et aucun besoin de carburant, de transport ou de personnel hautement spécialisé.
- **Matériau non toxique et abondant** : Le silicium, utilisé dans la plupart des panneaux solaires, est abondant et non toxique.
- **Longue durée de vie et recyclabilité** : Les panneaux solaires peuvent durer plus de 20 à 30 ans et sont recyclables.

I.9.2. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque comprennent :

- **Rendement de conversion limité** : Le rendement réel de conversion d'un module est faible, généralement entre 10 et 15%, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Cela signifie que les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- **Coût accru du stockage d'énergie** : Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est augmenté. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- **Haute technologie de fabrication** : La fabrication du module photovoltaïque nécessite une technologie avancée et des investissements coûteux.
- **Impact environnemental de la fabrication** : L'impact environnemental et énergétique de la fabrication des panneaux de silicium n'est pas nul. Une cellule photovoltaïque doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer.

Malgré ces inconvénients, l'énergie photovoltaïque reste une option attrayante pour la production d'électricité propre et durable, en particulier dans les régions ensoleillées où elle peut être une source d'énergie compétitive et respectueuse de l'environnement.

I.10. Secteurs d'application

Les applications de l'énergie photovoltaïque sont diverses et s'étendent à différents secteurs :

- **Domaine spatial** : Les cellules solaires sont utilisées depuis les années 1960 pour alimenter les engins spatiaux tels que les satellites et les navettes spatiales.
- **Télécommunications** : L'énergie photovoltaïque est utilisée pour la téléphonie rurale, la radiotéléphonie, etc.
- **Sites isolés** : Elle est utilisée dans les parcs nationaux, les services des eaux et forêts, les régions isolées et les pays en développement pour le pompage de l'eau, l'irrigation, les domiciles, les villages, etc.
- **Acquisition de données** : L'énergie photovoltaïque est essentielle pour les stations isolées d'acquisition de données en raison de sa haute fiabilité, de son autonomie, de sa faible sensibilité à la foudre, de sa résistance aux conditions naturelles, de sa maintenance légère et de la longévité des équipements (environ 25 ans).
- **Domaine du transport** : Elle est utilisée pour alimenter les lampadaires, les panneaux à messages variables, l'éclairage de panneaux, la signalisation lumineuse routière et ferroviaire, etc.

Ces applications démontrent la polyvalence et l'efficacité de l'énergie photovoltaïque dans divers contextes, offrant une solution durable et propre pour répondre aux besoins énergétiques.

Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque est devenue un pilier du développement durable à l'échelle mondiale. Malgré sa maîtrise technologique, le coût initial des installations reste un défi à relever. Les données présentées mettent en évidence l'efficacité supérieure d'un suiveur solaire à deux axes combiné à un système de refroidissement par rapport à un suiveur conventionnel, entraînant une augmentation significative de la production d'énergie électrique. Cette étude souligne donc l'importance de l'innovation continue pour optimiser les performances et réduire les coûts de l'énergie solaire photovoltaïque, renforçant ainsi son rôle crucial dans la transition vers un avenir énergétique plus durable.

Chapitre II :
Le système suiveur et le
système de refroidissement

II.1. Introduction

Pour tirer le meilleur parti de l'énergie solaire, il est essentiel de considérer plusieurs aspects fondamentaux, notamment le type de panneau solaire et sa surface, ainsi que la mise en place d'un système d'orientation pour suivre la trajectoire du soleil et maintenir une température idéale du panneau photovoltaïque.

Étant donné que la position du soleil par rapport à un point de captation fixe varie tout au long de la journée, l'implémentation d'un système de suivi solaire automatique devient crucial. Ce système ajuste l'orientation des panneaux solaires pour maximiser l'exposition aux rayons solaires, ce qui augmente considérablement la production d'électricité.

En substituant les panneaux solaires fixes par un système de suivi solaire, nous pouvons améliorer l'efficacité des panneaux solaires et optimiser leur performance. Cela permet de maintenir en permanence les panneaux dans la meilleure position pour capter la lumière du soleil.

Par ailleurs, il est également important de veiller à maintenir une température adéquate pour les panneaux solaires. En contrôlant la chaleur, nous pouvons minimiser les pertes d'énergie et garantir un rendement optimal des cellules photovoltaïques.

Ainsi, en combinant un système de suivi solaire avec un système de refroidissement efficace, nous pouvons exploiter pleinement le potentiel de l'énergie solaire et améliorer considérablement la production d'électricité à partir de panneaux solaires photovoltaïques.

II.2. Système suiveur solaire

II.2.1. Définition et fonctionnement

Un dispositif de suivi solaire, également connu sous le nom de suiveur de soleil, est un mécanisme qui permet à un télescope héliographique (utilisé pour observer le soleil ou ses effets dans l'atmosphère) ou à un système de production d'énergie solaire de suivre le mouvement du soleil. Fonctionnant selon le principe de l'héliostat, cette structure motorisée ajuste l'orientation des panneaux solaires pour maximiser leur efficacité.

Le système a pour objectif d'orienter en temps réel les capteurs vers le Soleil afin de positionner le panneau de manière optimale par rapport à l'incidence du rayonnement solaire, idéalement perpendiculaire à ce dernier. En effet, tout au long de la journée et de l'année (selon les saisons), la position du Soleil varie constamment et différemment en fonction de la latitude.

Cette adaptation en temps réel vise à maximiser la captation et la production d'énergie de manière significative.

L'adaptation peut se faire sur deux axes : l'azimut (d'est en ouest tout au long de la journée) et la hauteur (en fonction de la saison et de l'heure). L'idéal est d'utiliser un suiveur à deux axes, mais il existe aussi des modèles à un seul axe, qui suivent généralement le soleil en azimut, tandis que l'angle par rapport au sol est ajusté selon l'optimum local, déterminé par la latitude [34].

III.2.2. Les types des suiveurs solaires

On distingue principalement deux grandes catégories de suiveurs solaires :

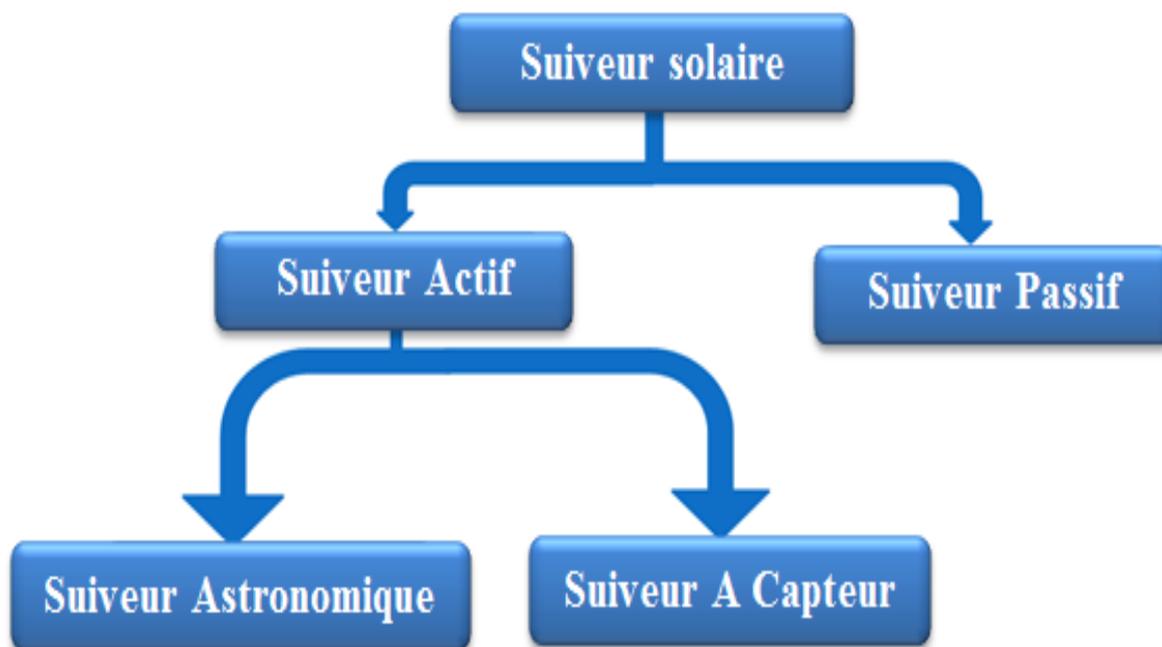


Figure II.1 : Les types de suiveurs solaires.

II.2.2.1. Suiveur passif

Le premier type de suiveurs solaires, appelés suiveurs passifs, se composent généralement de deux tubes en cuivre montés sur les côtés est et ouest du panneau photovoltaïque. Ces tubes en cuivre sont remplis de fluides chimiques capables de se vaporiser à basse température. Lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente la température d'un côté du panneau, le composé chimique à l'intérieur du tube en cuivre se vaporise [35].

La partie gazeuse du composé occupe un volume interne plus important, repoussant sa partie liquide vers le côté ombragé. Ce transfert de masse ajuste l'équilibre du panneau photovoltaïque en le faisant pivoter vers la source des rayons solaires. Ce type de suiveur ne nécessite aucune énergie pour repositionner le panneau.

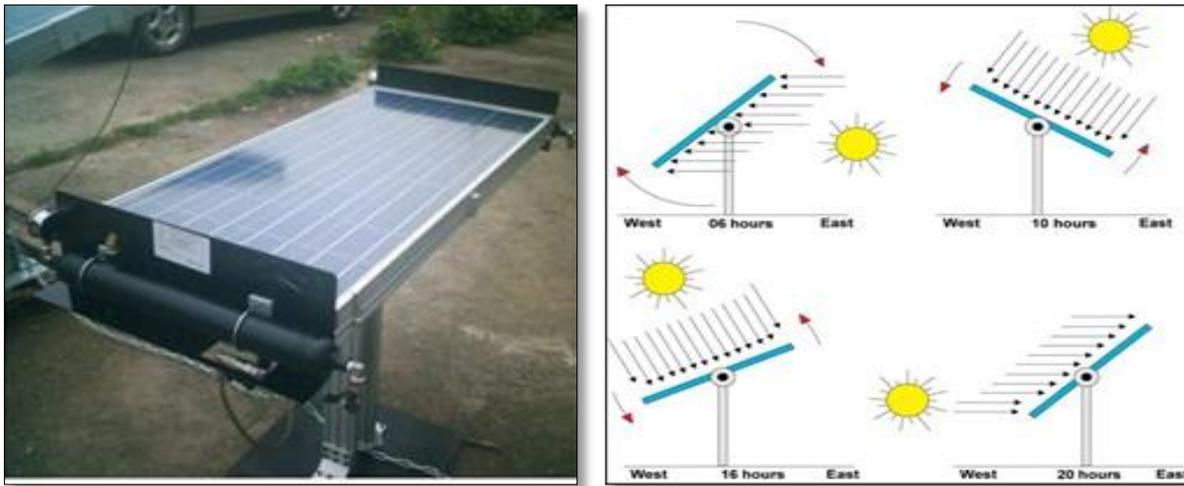


Figure II.2 : Suiveur passif [35].

II.2.2.2. Suiveur actif

Les suiveurs solaires actifs se basent sur la détection de la lumière pour suivre la course du soleil et maximiser l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface. Cette catégorie se divise en deux types : les suiveurs mono-axe et les suiveurs double axe. Contrairement aux suiveurs passifs, les suiveurs actifs offrent une précision de suivi supérieure et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les ajustements, ce qui constitue leur principal avantage.

Deux principales techniques sont utilisées pour assurer le suivi solaire, en tenant compte du niveau de précision requis. La première repose sur le calcul de la position du soleil en utilisant des équations géométriques et astronomiques préétablies. Elle nécessite une intervention manuelle pour ajuster la latitude du site, la date et l'heure. Cette méthode est appelée méthode astronomique, car la position du suiveur dépend directement du parcours solaire préprogrammé.

La seconde méthode, appelée méthode active, permanente ou asservie, utilise des capteurs de lumière, tels que des photorésistances, pour déterminer en temps réel la position du soleil. Cela permet un suivi instantané et une orientation optimale du panneau solaire tout au long de la journée. Les algorithmes adoptés se basent sur les données fournies par ces capteurs pour ajuster continuellement la position du suiveur, assurant ainsi une efficacité maximale de la capture de l'énergie solaire. [35].

(C'est vers cette dernière que va s'orienter notre travail, en réalisant un système de poursuite automatique).



Figure II.3 : Suiveur solaire automatique [36].

II.2.3. Les différents systèmes de suiveur solaire (selon l'axe)

Le rendement des panneaux solaires peut être amélioré en suivant deux logiques. La première consiste à suivre l'azimut, c'est-à-dire la course du soleil ; ainsi, les panneaux doivent ajuster leur orientation d'Est en Ouest pour suivre le mouvement solaire. La deuxième logique vise à améliorer l'incidence des rayons solaires en ajustant la hauteur des panneaux. L'incidence des rayons solaires varie selon les saisons (le soleil est généralement plus bas en hiver qu'en été) et l'heure de la journée [37].

Les différents types de suiveurs rencontrés sur le marché sont les suivants :

II.2.3.1. Un Suiveur à axe horizontal

Ce type de suiveur n'apporte que très peu de gains par rapport à un système fixe. Il est plus intéressant d'utiliser des suiveurs à un axe vertical (voir figure II.4). Cependant, bien que sa conception soit la plus simple parmi tous les suiveurs, il serait nécessaire qu'un suiveur offre une plage d'inclinaison allant de 10 à 30° pour obtenir la meilleure solution. Néanmoins, le gain obtenu resterait assez faible, de l'ordre de 2,2%, ce qui ne compense pas le surcoût. [37].

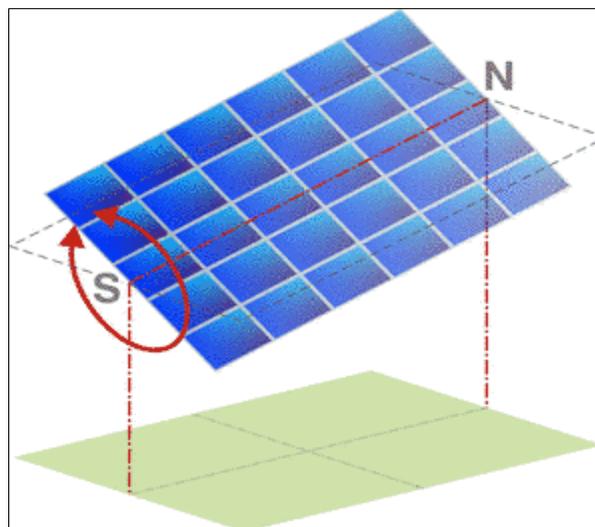


Figure II.4 : Suiveur à axe horizontal [37].

II.2.3.2. Suiveur à axe vertical incliné

Ce type de suiveur permet un gain d'environ 20%. Il est souvent moins imposant que les suiveurs à deux axes, moins coûteux et permet d'installer plus de puissance sur un terrain donné comparé aux suiveurs à deux axes [37].

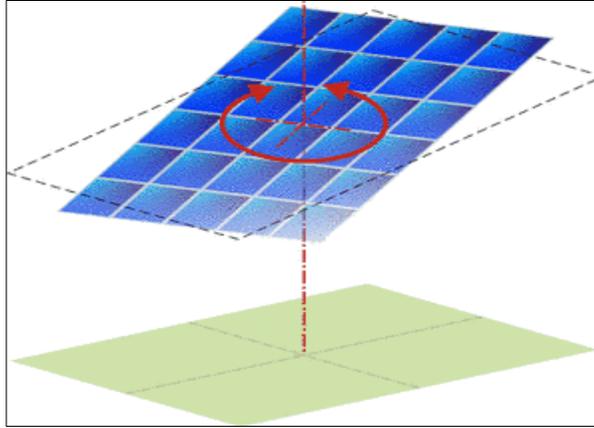


Figure II.5 : Suiveur à axe vertical incliné [37].

II.2.3.3. Suiveur à deux axes

Les suiveurs à deux axes permettent un gain d'environ 30%. Ce type de suiveur est très imposant et visible de loin. Il permet l'orientation du panneau sur les 2 axes [37]. (C'est sur ce type que nous avons basé notre projet).

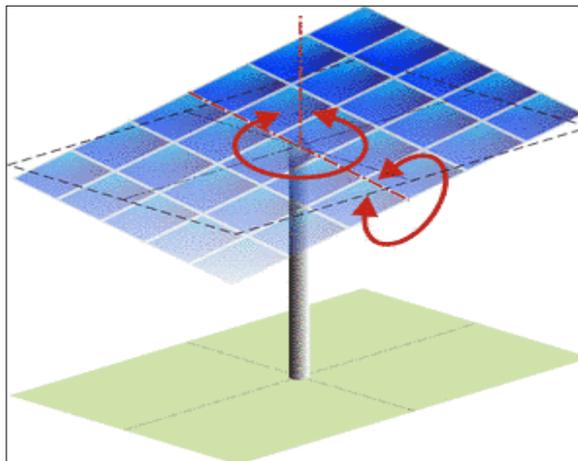


Figure II.6 : Suiveur à deux axes [37].

II.2.4. La différence entre l'installation avec suiveur et l'installation fixe

➤ Augmentation de la productivité énergétique des panneaux

Les suiveurs solaires ont la capacité d'absorber un maximum de lumière solaire tout au long de la journée, ce qui leur permet de produire entre 30 et 40% de plus que des installations de même taille et de même puissance installées sur des toits dans des conditions optimales.

➤ La meilleure rentabilité

Le succès financier est inévitablement lié à une productivité énergétique adéquate. C'est pourquoi une installation munie d'un système de suivi solaire peut augmenter son rendement de 30% à 40% par rapport à une installation fixe, ce qui se traduit par une augmentation des bénéfices financiers. La figure (II.7) illustre le rendement d'une installation fixe par rapport à une installation équipée de suiveurs solaires "bi-axiaux et mono-axiaux" [38].

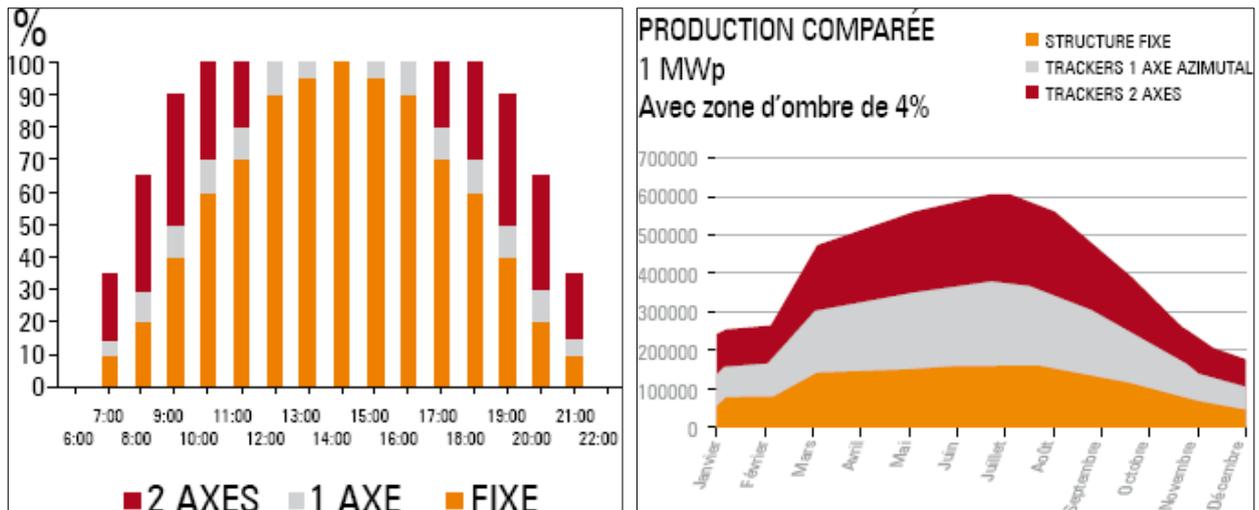


Figure II.7 : Comparaison Production électrique [38].

II.2.5. Les moyens de contrôle de l'augmentation d'énergie par traqueur

Le gain d'un traqueur est différent pour chaque installation, Il existe plusieurs moyenne de contrôler le niveau de production d'électricité pour un traqueur solaire, en distinguant plusieurs facteurs :

- La latitude du site d'installation.
- L'ensoleillement et la climatologie du site.
- La course angulaire de suivi solaire.
- La fréquence de positionnement.
- La densité de puissance installée et le facteur d'ombre induit.

Les gains (non comptabilisés) de repli par temps de neige, qui peuvent être très importants [38].

II.2.6. Les avantages et inconvénients du suiveur

➤ Avantages

- Plus de 40% de production.
- Augmente le nombre de cas d'implantation lorsque les solutions classiques ne sont pas possibles.
- Peut valoriser les espaces de terrains perdus.
- Ils s'adaptent pour capter un maximum de lumière du soleil tout au long de la journée.

➤ Inconvénients

- Encombrant et demande un grand terrain.
- Risque de panne du suiveur, l'intervention est difficile ou délicate [39].

II.3. Système de refroidissement panneau solaire

Le panneau photovoltaïque (PV) absorbe environ 16% seulement de l'énergie solaire incidente, laquelle est ensuite convertie en électricité. L'efficacité des cellules photovoltaïques diminue avec l'augmentation de la température. Cela peut généralement se traduire par une perte de rendement de 0,5% pour chaque degré Celsius supplémentaire de température de fonctionnement de la cellule. Par exemple, les cellules solaires en silicium sont optimales à 1000 W/m² et 25 °C comme température idéale pour la cellule ; en maintenant cette température, on peut préserver l'efficacité nominale de la cellule. De plus, les cellules subissent une dégradation à long terme si la température dépasse un certain seuil.

Pour pallier ce problème, il est possible de maintenir une température uniforme dans l'ensemble du panneau. La circulation d'air, qu'elle soit naturelle ou forcée, constitue une méthode simple et économique pour dissiper la chaleur des modules PV. Toutefois, son efficacité diminue lorsque la température de l'air ambiant dépasse 20 °C, ce qui est courant pendant de nombreux mois dans les pays situés à basse latitude.

Une méthode alternative, plus efficace, consiste à utiliser un liquide comme fluide de refroidissement pour le panneau, ce qui permet d'absorber davantage de chaleur et de refroidir le panneau de manière plus efficace

[40].

II.3.1. Refroidissement de PV à air

Le passage de flux d'air à travers un panneau photovoltaïque permet de diminuer sa température. Plusieurs dispositifs ont été mis sur le marché, tels que les panneaux aérovoltaiques (Figure II.8).

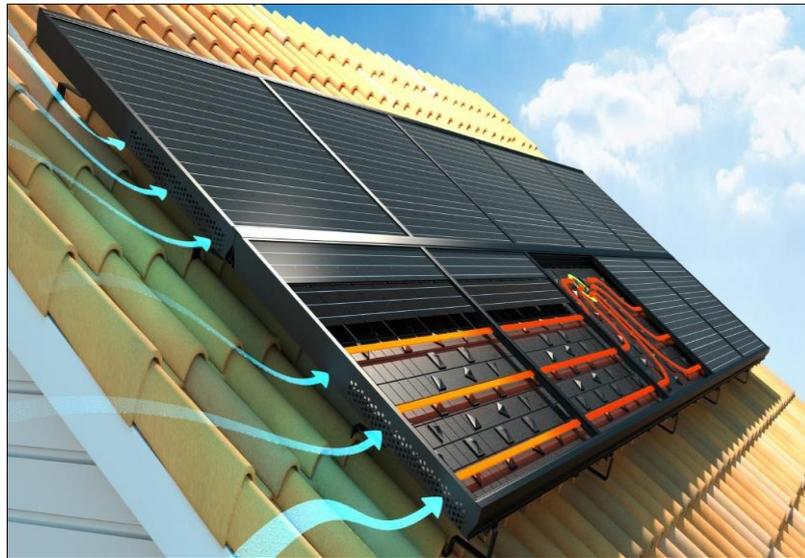


Figure II.8 : Panneau Aérovoltaique [41].

Le panneau aérovoltaique est un dispositif qui se sert de l'air comme agent de refroidissement (voir figure II.8), en faisant circuler celui-ci grâce à une ventilation naturelle à l'intérieur du panneau afin de maintenir la température des cellules photovoltaïques à un niveau optimal.

Un inconvénient de ce dispositif est que tout changement de direction ou d'arrêt du flux d'air compromet son bon fonctionnement. Il devient alors nécessaire d'installer un ventilateur pour garantir une circulation forcée de l'air à travers le panneau (ventilation forcée).

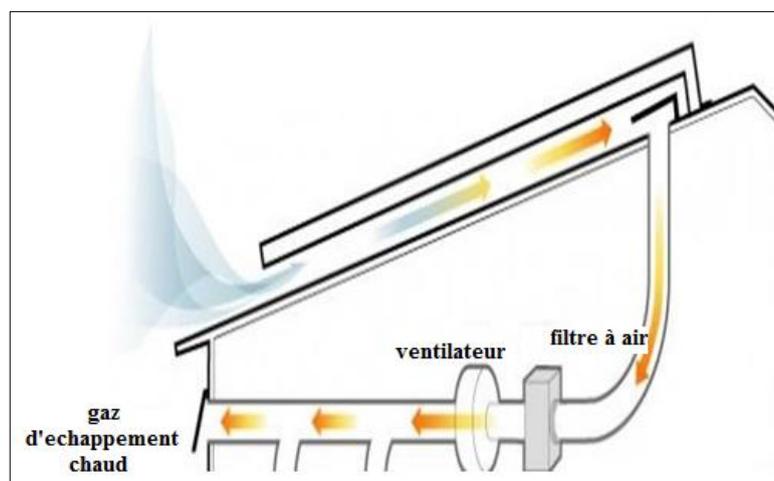


Figure II.9 : Refroidissement à ventilation forcer [42].

II.3.2. Système de refroidissement à eau

Système de refroidissement par eau pour panneaux solaires : ce système permet de maintenir une température idéale afin de garantir un rendement optimal des panneaux solaires. Une perte de rendement de 0,5% par degré Celsius est observée au-delà de 25 °C, ce qui entraîne une diminution de 25% de l'efficacité pour un panneau atteignant 75 °C, comme cela peut se produire en été [40].



Figure II.10 : Panneau solaire refroidie [43].

II.3.2.1. Principe de fonctionnement

À l'aide d'une pompe à eau, on envoie de l'eau dans des tuyaux qui la déposent ensuite sur les panneaux pour abaisser leur température.

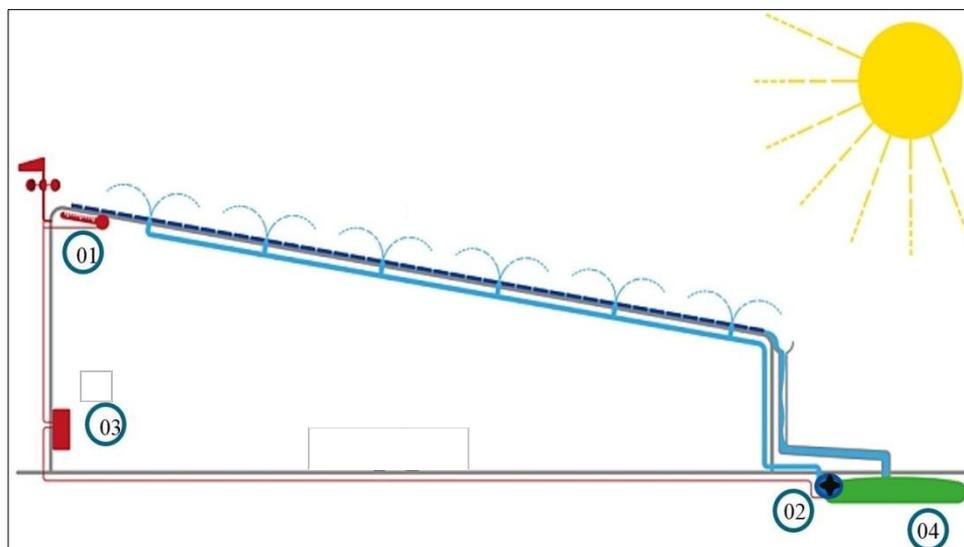


Figure II.11 : Système de refroidissement [44].

Ce système est composé de :

1. Capteur de température : sert à mesurer la température du panneau solaire.
 2. Pompe à eau : permet d'envoyer de l'eau dans des tuyaux vers le panneau pour le refroidir.
 3. Microcontrôleur : sert à l'acquisition et au traitement des données du capteur de température, et donne l'ordre de démarrage et d'arrêt de la pompe à eau.
 4. Réservoir : stockage d'eau.
- En théorie, la consommation de la pompe sera largement amortie par le gain de puissance.

Le tout sera automatisé grâce au microcontrôleur et à un capteur de température mesurant la température des panneaux. Lorsque la température s'élève, le système démarre automatiquement sans intervention humaine.

II.4. Nettoyage et entretien des panneaux solaires

Les saletés et la poussière qui s'accumulent sur les panneaux solaires peuvent affecter leurs performances. Plusieurs études menées par des fabricants ont montré que ces débris peuvent réduire leur efficacité jusqu'à 15% par an. Par conséquent, un entretien régulier est essentiel pour optimiser leur fonctionnement et augmenter leur production d'énergie électrique. En effet, non seulement la productivité est en jeu, mais également la durée de vie de votre panneau solaire, qui risque de se raccourcir considérablement.

En outre, le système que nous avons développé assure à la fois le refroidissement et le nettoyage, garantissant ainsi une production maximale.



Figure II.12 : Différence entre panneau encrassé et panneau nettoyé [45].

II.5. Conclusion

Ce chapitre a permis d'approfondir notre compréhension du fonctionnement des deux systèmes, à savoir le suiveur solaire et le système de refroidissement, ainsi que des composants qui les composent. Cette analyse revêt une importance cruciale pour la conception et la réalisation de notre prototype de panneau solaire.

L'intégration des mécanismes du suiveur solaire et du système de refroidissement au sein d'un même panneau solaire offre des avantages énergétiques considérables par rapport aux panneaux solaires fixes. En combinant ces deux technologies, nous sommes en mesure d'optimiser la capture de l'énergie solaire tout en préservant les conditions de fonctionnement idéales. Cette approche se traduit par une amélioration significative de l'efficacité et des performances globales du système.

En résumé, l'exploitation conjointe du suiveur solaire et du système de refroidissement représente une avancée majeure dans le domaine de l'énergie solaire, ouvrant la voie à des solutions plus efficaces et durables pour la production d'électricité à partir de sources renouvelables.

Chapitre III:
Conception et
implémentation

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, notre objectif est la réalisation d'un panneau solaire intelligent capable de suivre automatiquement la trajectoire du soleil tout au long de la journée, tout en étant équipé d'un système de refroidissement. Ce dispositif est conçu pour optimiser de manière significative le rendement énergétique du panneau solaire.

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première section est consacrée à la présentation des outils utilisés pour créer notre prototype, en justifiant la sélection de tous les composants, ainsi que du logiciel utilisé « ARDUINO ».

Dans la deuxième section, nous présentons la mise en œuvre de notre projet. Pour ce faire, nous décrivons l'ensemble du dispositif de démonstration que nous avons créé et les étapes de création de notre prototype.

- Outils de développement : présentation des composants du dispositif, de leur fonctionnement et justification du choix des composants.
- Logiciels utilisés : « ARDUINO », « Fritzing », « Proteus » (voir annexe).
- Test des composants.
- Réalisation du prototype panneau solaire.

III.2. Outils de développement

III.2.1. Composants du notre prototype

Les composants sont à base électronique, Chaque élément est caractérisé en fonction des conditions d'utilisation.

III.2.1.1. Présentation de la Carte ARDUINO UNO

Très simple à utiliser, elle se programme et peut être connectée directement à un ordinateur sous Windows, Mac ou Linux.

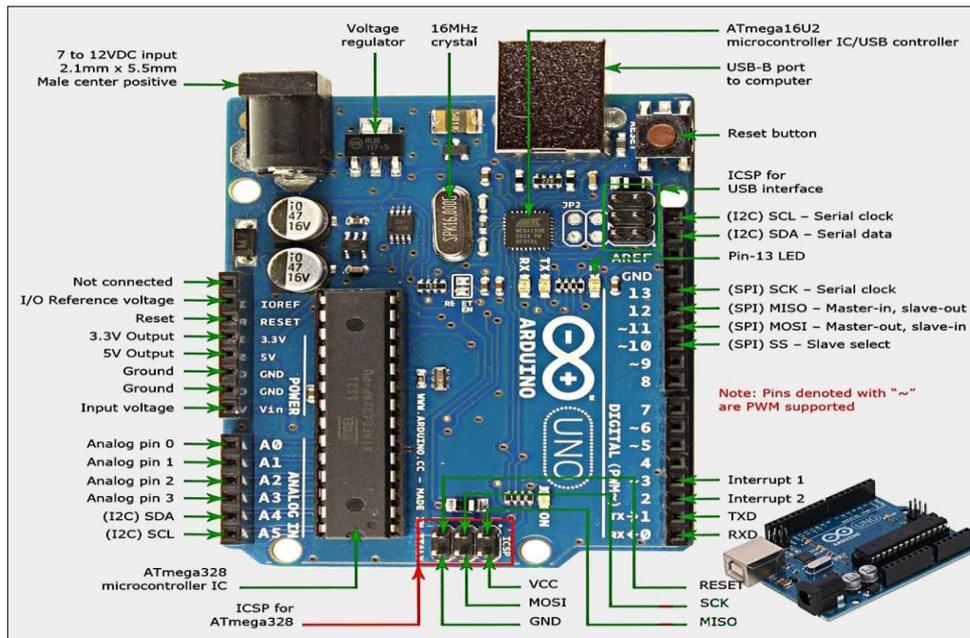


Figure III.1 : Carte ARDUINO [46].

➤ Les Caractéristiques de la carte ARDUINO UNO

- Tension d'alimentation interne : 5 V.
- Tension d'alimentation recommandée : 7 à 12 V, limites de 6 à 20V.
- Entrées/sorties numériques : 14 Broches.
- Courant maximal par broche E/S : 40 mA.
- Courant maximal sur sortie 3,3 V : 50 mA.
- Mémoire Flash : 32 KB dont 0,5KB utilisée par le bootloader.
- Mémoire SRAM : 2 KB.
- Mémoire EEPROM : 1 KB.
- Fréquence de l'horloge : 16 MHz.
- Dimensions : 68,6 mm x 53,3 mm.
- Interface USB/série.

➤ L'alimentation électrique

Commençons par la tension d'alimentation, car sans elle, rien n'est possible. Il existe différentes possibilités. Quand nous travaillons avec Arduino ou que nous le programmons, il est indispensable d'établir une connexion USB avec l'ordinateur. Cette liaison assure deux fonctions : transmettre l'indispensable tension d'alimentation de 5 V ; offrir un canal de communication entre l'ordinateur et la carte Arduino. Les deux fonctions sont remplies par le port USB. La tension d'alimentation doit être comprise entre 7 et 12 V_{CC} (Courant Continu). Vous trouverez de plus amples informations.

III.2.1.2. Résistances

Quatre résistances à couche de carbone de 10 k ohm 1/6 W 5% sont utilisées pour protéger les entrées de la carte d'interface. Ces résistances jouent un rôle crucial en limitant le courant et en répartissant la tension pour éviter tout dommage aux composants sensibles de la carte d'interface. Elle est caractérisée par sa valeur de résistance de 10 000 ohms (10 kΩ), une tolérance de 5 % indiquant que sa valeur réelle peut varier de ±5 % par rapport à la valeur nominale, et une puissance nominale de 1/6 watt, ce qui détermine sa capacité à dissiper la chaleur générée lors du passage du courant.



Figure III.2 : Photographie de résistances de 10 kΩ, 1/6 W, tolérance 5%.

III.2.1.3. Photoresistance LDR (Light Dependent Resistor)

Une photo-résistance, également connue sous le nom de résistance dépendante de la lumière (LDR pour Light Dependent Resistor), est un composant dont la résistance en ohms varie en fonction de l'intensité de la lumière à laquelle il est exposé.

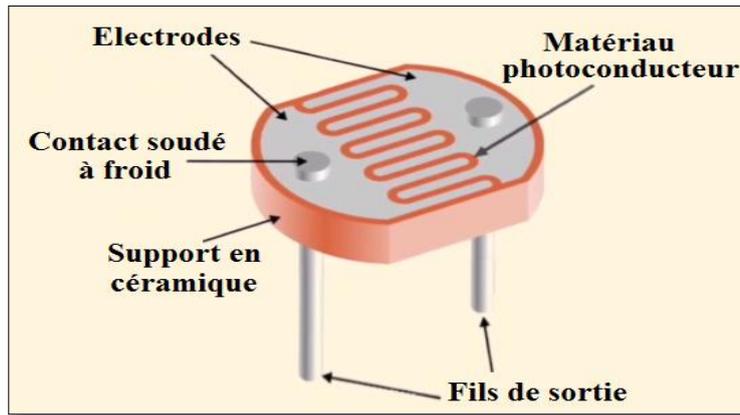


Figure III.3 : Photographie de photorésistance LDR (Light Dependent Resistor) [47].

La photorésistance est constituée de plusieurs éléments essentiels. Elle comprend des électrodes, qui servent à appliquer une tension à travers le composant. Le matériau photoconducteur est la substance sensible à la lumière qui réagit en modifiant sa résistance.

Des contacts soudés à froid sont utilisés pour relier les électrodes au matériau photoconducteur de manière fiable. Le support en céramique offre une base solide pour les composants et assure une bonne dissipation de la chaleur. Les fils de sortie ou les broches de connexion permettent de connecter la photorésistance à d'autres composants du circuit. Il est à noter que la surface de la photorésistance est protégée par une résine isolante et transparente, assurant ainsi sa durabilité et sa fiabilité dans diverses conditions d'utilisation.

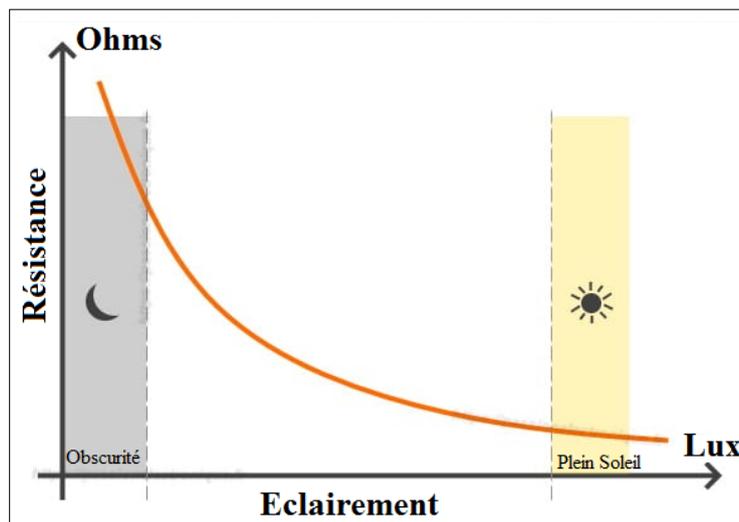


Figure III.4: Courbe caractéristique de photorésistance LDR [48].

➤ Caractéristiques

La résistance photosensible est la résistance d'un matériau semi-conducteur, qui varie en fonction de l'intensité lumineuse. Son utilisation consiste à fonctionner avec différentes formes et zones de réception de lumière de la résistance photosensible.

La photorésistance est largement utilisée dans les jouets, les lampes, les caméras et d'autres industries.

Les caractéristiques techniques d'une photorésistance (LDR) du modèle utilisé dans notre travail sont les suivantes :

- Modèle : GL5528.
- Tension maximale : 150V DC.
- Puissance maximale : 100 mW.
- Température de fonctionnement : -30 °C à 70 °C.
- Pic spectral : 540 nm.
- Résistance lumineuse (10Lux) (KΩ) : 10 – 20.
- Résistance foncée : 1 MΩ.
- Temps de réponse : 20 ms (montée), 30 ms (descente).
- Justification du choix : faible coût, disponibilité.

➤ Branchement de la photorésistance (LDR)

La photorésistance peut être branchée aussi bien en amont (du côté du « +Vcc »), qu'en aval (du côté du « GND »). Seul change le comportement de la tension de sortie, dans ce cas.

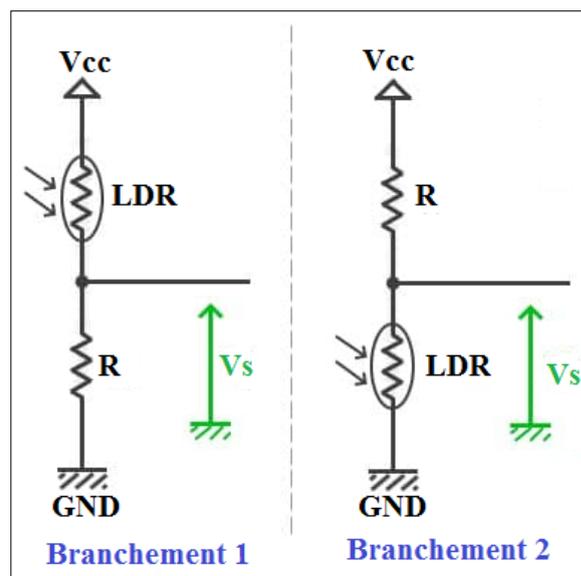


Figure III.5: Schéma de branchements de photorésistance LDR [48].

- **Dans le 1^{er} branchement** : Plus la luminosité augmente, plus la tension V_S augmente :

$$V_S = \frac{V_{CC} \cdot R}{(R + LDR)} \quad d'o\grave{u} \quad LDR = \frac{R(V_{CC} - V_S)}{V_S} \quad (III.1)$$

- **Dans le 2^{ème} branchement** : Plus la luminosité augmente, plus la tension V_S diminue :

$$V_S = \frac{V_{CC} \cdot LDR}{(R + LDR)} \quad d'o\grave{u} \quad LDR = \frac{V_S \cdot R}{(V_{CC} - V_S)} \quad (III.2)$$

III.2.1.4. Mini panneau solaire

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



Figure III.6 : Panneau solaire.

➤ **Caractéristiques du panneau :**

- Taux de conversion élevé, rendement élevé.
- Excellent effet en faible luminosité.
- Puissance : 1 W.
- Tension : 5 V.
- Matériau : Silicium polycristallin (voir chapitre I).
- Faible coût.

(Dans notre travail, nous avons monté 4 panneaux en parallèle).

III.2.1.5. Mini servo SG-90

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

- d'un moteur à courant continu.
- d'un axe de rotation.
- d'un capteur de position de l'angle d'orientation de l'axe (très souvent un potentiomètre).
- d'une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu.

Un servomoteur est capable d'atteindre des positions prédéterminées dans les instructions qui lui ont été données, puis de les maintenir. Le servomoteur a l'avantage d'être asservi en position angulaire, ce qui signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera la consigne d'instruction que vous lui avez envoyée en son entrée. Même si un obstacle se trouve sur la route, ce qui pourrait le faire changer l'orientation de sa trajectoire, le servomoteur essaiera de conserver la position.

Un servomoteur est capable des positions prédéterminées dans les instructions qui lui, puis de les maintenir.

Le servomoteur ayant l'avantage d'être asservi en position angulaire, signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera la consigne d'instruction que vous lui avez envoyée en son entrée.

Même si un obstacle sur la route.

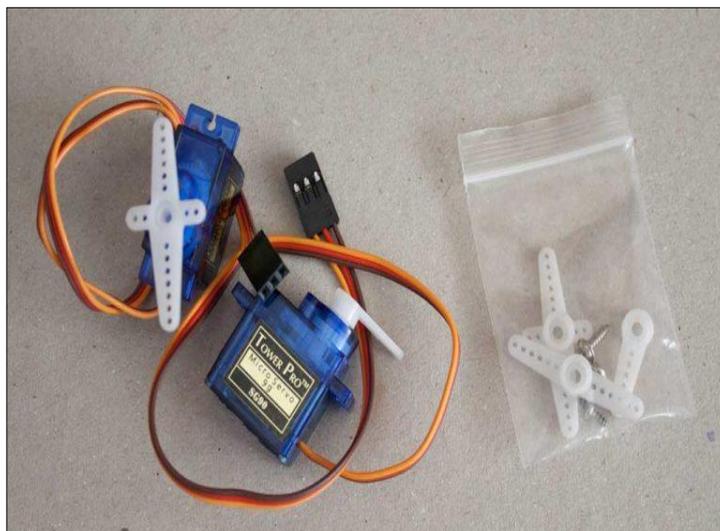


Figure III.7 : Servomoteur SG-90.

➤ Principe de fonctionnement

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

La sortie du moteur à courant continu est reliée mécaniquement à une série d'engrenages qui augmente la force (le couple) du servomoteur en réduisant la vitesse de rotation.

Quand le moteur tourne, les engrenages s'animent, le bras bouge et avec lui le potentiomètre. Le circuit électronique ajuste continuellement la vitesse du moteur pour que le potentiomètre (et par extension le bras) reste toujours au même endroit.

Le fonctionnement interne d'un servomoteur est assez basique. Un petit circuit électronique permet de contrôler un moteur à courant continu en fonction de la position d'un potentiomètre intégré au servomoteur. La sortie du moteur à courant continu est reliée mécaniquement à une série d'engrenages qui augmentent la force (le couple) du servomoteur en réduisant sa vitesse de rotation. Quand le moteur tourne, les engrenages s'animent, le bras bouge et entraîne avec lui le potentiomètre. Le circuit électronique ajuste continuellement la vitesse du moteur pour que le potentiomètre (et par extension le bras) reste toujours au même endroit [49].

➤ Les caractéristiques du SG90 sont les suivantes

- Dimensions : 22 x 11.5 x 27 mm.
- Poids : 9 gr.
- Tension d'alimentation : 4.8 V à 6 V.
- Vitesse : 0.12 s / 60° sous 4.8 V.
- Couple : 1.2 Kg / cm sous 4.8 V.
- Angle : de 0 à 180°.

Le servomoteur est équipé d'une prise de type Graupner à 3 fils. La correspondance des fils est la suivante :

| | | |
|--------|---|----------|
| Marron | → | Masse |
| Rouge | → | +5 volt |
| Orange | → | commande |

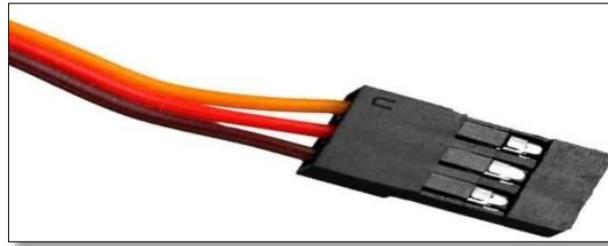


Figure III.8 : Câble servomoteur [49].

On a choisi ce servomoteur en raison de sa disponibilité sur le marché, de son faible coût, de sa faible tension d'alimentation et de son couple élevé. Cela en fait un choix idéal pour notre prototype.

III.2.1.6. Mini pompe à eau

Une pompe à eau est un dispositif permettant de mettre en mouvement l'eau.



Figure III.9 : Mini Pompe à eau.

➤ **Les caractéristiques**

- Débit est réglable avec bouton en face de la pompe.
- Tension d'entrée : DC 3-5 V.
- Puissance : 1-3 W.
- Débit : 80-120 L/h.
- Diamètre intérieur d'entrée d'eau : 5 mm.
- Diamètre de sortie : Env. 4,5 mm.
- Diamètre extérieur : 7,5 mm.
- Dimensions (L x l x H) : Env. 0,2 x 3,0 x 2,4 cm / 1,2 x 3,5 x 1,8 pouces.
- Composée de deux fils : rouge = VCC (+) / noir ou noir = GND (-).

On a choisi cette pompe suite à sa disponibilité sur le marché, son faible coût et sa faible tension d'alimentation. Cela en fait un choix idéal pour notre prototype.

III.2.1.7. Module de relais déclencheur 5V

Un relais électronique est un interrupteur qui se commande avec une tension continue de faible puissance. La partie interrupteur sert à piloter des charges secteur de forte puissance (jusqu'à 10A couramment).

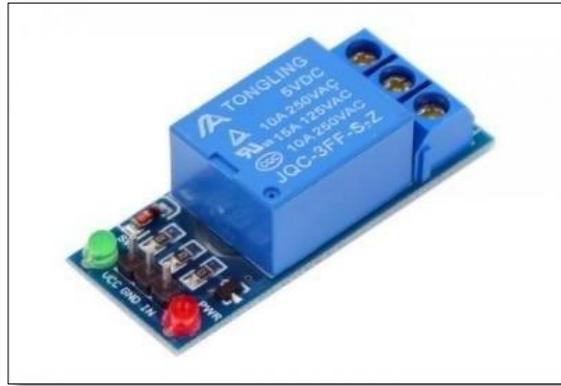


Figure III.10 : Module de relais déclencheur 5V [50].

➤ Description

- Capacité de conduite et performances stables.
- Le module peut être configuré en mode haut ou bas à l'aide d'un cavalier de réglage.
- Conception tolérante aux pannes : même si la ligne de commande est coupée, le relais ne fonctionnera pas.
- Indicateur d'alimentation (vert) et indicateur d'état du relais (rouge).
- Charge maximale : 250 V_{CA} / 10 A, 30 V_{CC} / 10 A.
- Courant de déclenchement : 5 mA.
- Tension de travail : 5 V.
- DC+ : alimentation positive (VCC).
- DC- : alimentation négative (GND).
- IN : peut-être un relais de contrôle de niveau haut ou bas.
- NON : interface du relais normalement ouverte.
- COM : interface de relais commune.
- NC : interface du relais normalement fermée.
- Il s'agit d'un déclencheur de niveau bas lorsque le cavalier est connecté à la broche LOW.
- Il s'agit d'un déclencheur de haut niveau lorsque le cavalier est connecté à la broche HIGH [50].

III.2.1.8. Capteur de température étanche DS18B20

Les sondes de température (ou capteurs de température) sont des dispositifs permettant de transformer l'effet du réchauffement ou du refroidissement sur leurs composants en signal électrique.



Figure III.11 : Capteur de température étanche DS18B20.

➤ Caractéristiques

- Résistance à la flexibilité, meilleure conductivité thermique.
 - Longueur du câble : 100 cm.
 - Taille de la gaine en acier inoxydable : 6 x 50 mm.
 - Plage d'alimentation : 3,0 V à 5,5 V.
 - Température de fonctionnement : -55 °C à +125 °C (-67 °F à +257 °F).
 - Plage de température de stockage : -55 °C à +125 °C (-67 °F à +257 °F).
 - Précision dans la plage de -10 °C à +85 °C : $\pm 0,5$ °C.
 - Applications : commandes thermostatiques, systèmes industriels, produits de consommation, thermomètres, systèmes thermosensibles.
 - Couleurs des fils : rouge (VCC), jaune (DATA), noir (GND).
- (Justification du choix : faible coût, disponibilité, étanchéité).

III.2.1.9. Circuit de charge modèle TP4056

Ce module de chargeur Li-Ion 3,7 V avec protection TP4056 assure une charge sécurisée des batteries lithium en utilisant la méthode CC/CV, tout en fournissant la protection nécessaire. Il intègre le régulateur TP4056 et un circuit de protection distinct, reconnaissable par deux puces supplémentaires : le DW01A pour la protection de batterie Li-Ion et le MOSFET double puissance 8205A. Le chargeur peut être alimenté via micro USB ou IN+ et IN-, nécessitant une source d'au moins 1 A. Des indicateurs lumineux signalent la fin de la charge. Le courant de charge est pré-réglé à 1 A, optimal pour des batteries de 1,4 à 5 Ah.

Le module consomme peu d'énergie lorsqu'il est connecté à une batterie mais il est recommandé de le débrancher lorsqu'inutilisé pendant plusieurs mois. Il est possible de connecter en parallèle deux piles lithium du même type pour doubler la capacité, mais il est déconseillé de connecter plus de deux piles simultanément [51].

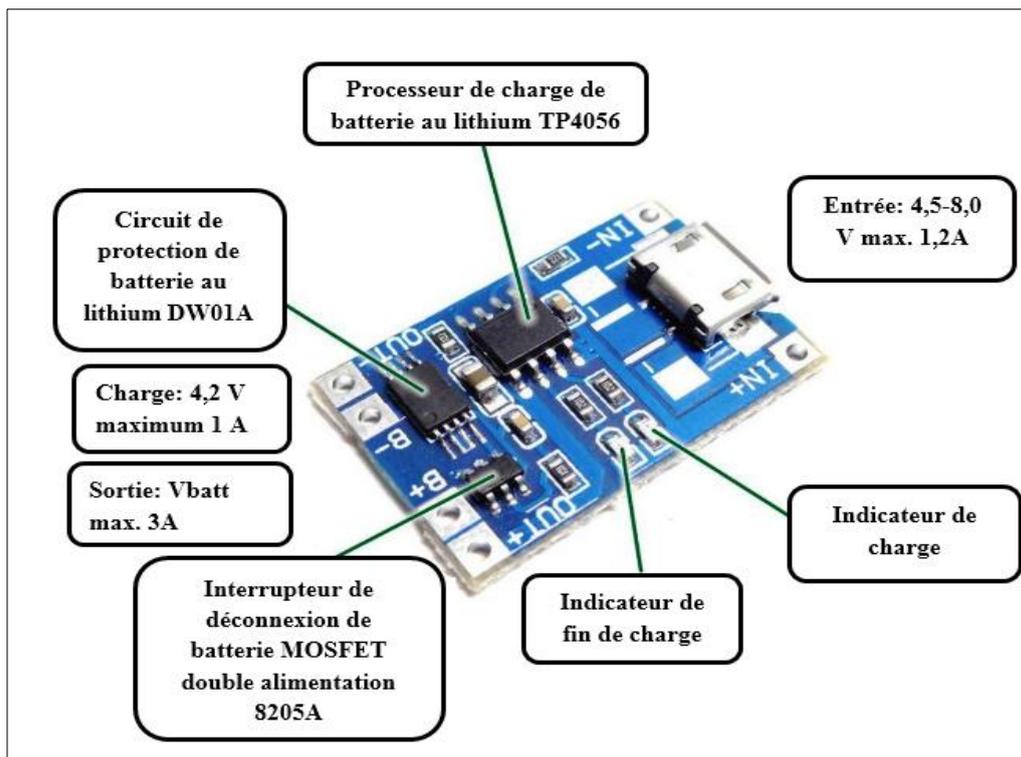


Figure III.12 : Circuit de charge modèle TP4056 [51].

III.2.1.10. Mini Câble USB

Le mini câble USB facilite la connexion entre la carte Arduino Nano et un ordinateur.



Figure III.13 : Micro câble USB.

III.2.1.11. Batterie lithium 18650

La batterie lithium 18650 de 1500 mAh est une cellule cylindrique rechargeable de type Li-ion.



Figure III.14 : Batterie lithium 18650 de 6800 mA [52].

➤ Caractéristiques

- Tension nominale : 4.2 V.
- Capacité : 6800 mAh.
- Dimensions : 18 mm de diamètre et 65 mm de longueur.
- Poids : Environ 45 grammes.

- Durée de vie : Environ 300 à 500 cycles de charge/décharge.
- Taux de décharge : La plupart ont un taux de 1C, ce qui signifie qu'elles peuvent être déchargées complètement en 1 heure.

Ces batteries sont souvent utilisées dans des appareils électroniques portables, des outils électriques sans fil et certains types de véhicules électriques. Elles sont appréciées pour leur capacité à stocker une grande quantité d'énergie dans un petit volume [52].

III.2.1.12. Afficheur LCD

Un afficheur LCD (Liquid Crystal Display) est un type d'écran utilisé pour afficher des informations en utilisant des cristaux liquides pour contrôler la transparence des pixels.

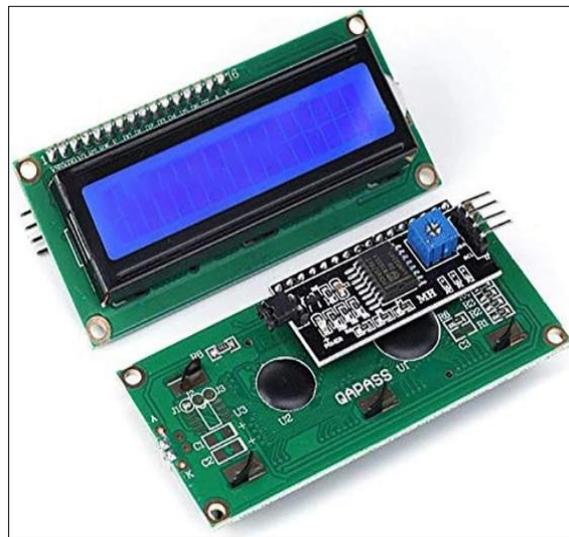


Figure III.15 : Afficheur LCD [53].

➤ Les caractéristiques

- 2 lignes, 16 caractères de large.
- Police de 5 x 7 points et curseur.
- Écran LCD jaune-vert avec rétroéclairage LED jaune-vert.
- Contrôleur LCD équivalent HD44780.
- Contraste élevé.
- Lisible au soleil.
- Le port de connexion à 16 broches est au pas de 2,54 mm (0,1').
- une seule rangée pour une planche à pain et un câblage faciles.
- épingleage (de gauche à droite) : 1-14, A, K.

- Rétroéclairage LED unique inclus ; Gradation facile avec une résistance ou via PWM ; Utilise beaucoup moins d'énergie que les rétroéclairages électroluminescents.
- Peut être entièrement contrôlé avec seulement 6 lignes numériques (en mode bus 4 bits).
- Tension de fonctionnement 5 V CC.
- Dimensions des modules : 80 x 36 x 10 mm.
- Taille de la zone de visualisation : 64,5x 15 mm [53].

III.2.1.13. Convertisseurs DC-DC élévateur (boost converter) MT3608

Le module d'alimentation DC-DC MT3608 est conçu pour convertir ou augmenter la tension d'entrée, permettant d'alimenter des appareils électroniques.

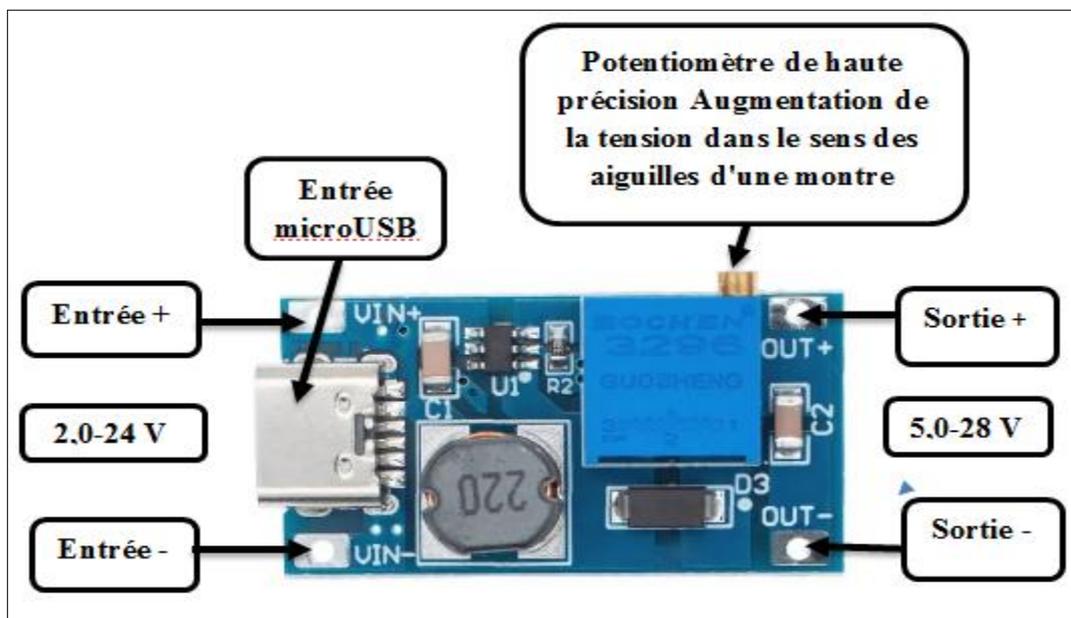


Figure III.16 : Le module d'alimentation DC-DC MT3608.

➤ Les caractéristiques

- Courant de sortie maximum: 2 A.
- Tension d'entrée: 2 V à 24 V.
- Tension de sortie maximale: 28 V.
- Efficacité: Supérieure à 93%.
- Taille du produit: 36 mm x 17 mm x 14 mm.
- Méthode d'utilisation: Le module dispose d'un IN+ et IN- qui doivent être connectés à une source d'alimentation de 2 V à 24 V. Il possède également un potentiomètre pour ajuster la tension de sortie, qui doit être supérieure à la tension d'entrée.

III.3. Réalisation du dispositif

III.3.1. Cahier des charges

- L'asservissement de notre suiveur solaire sera alimenté par la carte ARDUINIO (5 V), cette dernière sera alimentée par un PC (sortie USB) qu'il est sensé maintenir en charge. Dans le cas réel, on remplace l'alimentation via le PC par une batterie, cette dernière sera rechargée par le panneau solaire, ce qui le rend indépendant.
- Il faudra limiter au maximum les déplacements (lorsqu'un passage du nuage devant le soleil) en augmentant le délai d'exécution au niveau de la programmation.
- On devra pouvoir protéger le panneau solaire contre le rayonnement excessif du soleil en été (chaleur) en utilisant un système de refroidissement automatique.

III.4. Principe de fonctionnement du système

Nous avons choisi d'utiliser des photorésistances écartées l'une de l'autre pour déterminer l'orientation du soleil en calculant la différence d'éclairage. Par exemple, si la LDR en haut à gauche reçoit plus de lumière que celle en bas à droite, le servomoteur d'azimut tournera en direction de la haute gauche pour équilibrer l'éclairage. Le même principe s'applique sur l'axe vertical.

En parallèle, nous avons ajouté un capteur qui mesure la température. Si celle-ci dépasse la consigne, le système de refroidissement se déclenche pour refroidir le panneau photovoltaïque, et s'arrête automatiquement lorsque la température revient à la normale.

III.5. Les étapes de la Réalisation

III.5.1. Partie électronique

Afin de réaliser notre prototype on est passé par deux étapes.

III.5.1.1. Réalisation système suiveur

➤ Branchement des photorésistances (LDR)

- Le montage des photorésistances (LDR) dans notre système suiveur (voir figure III.17).

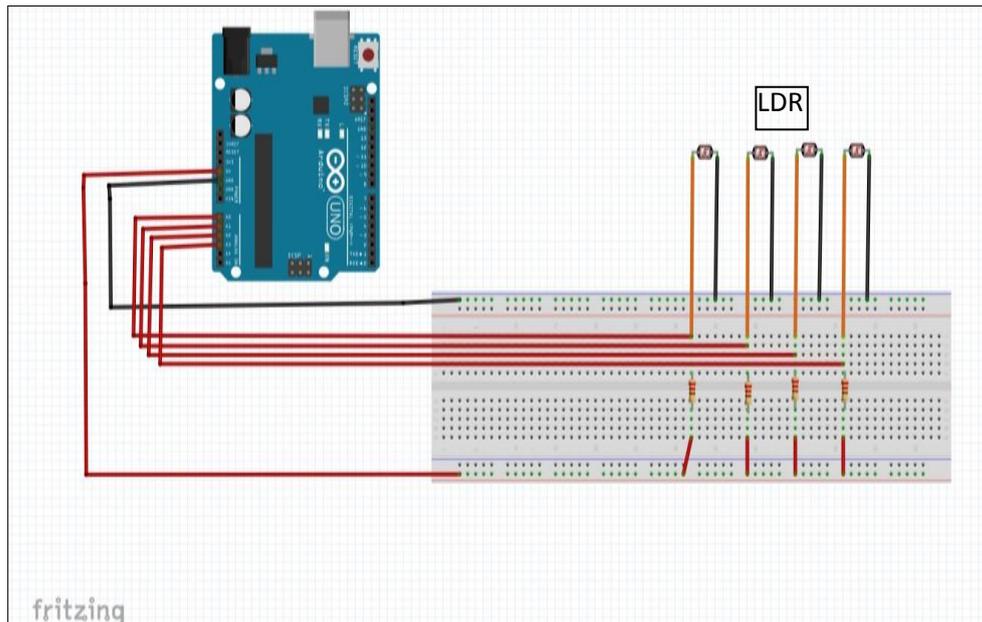


Figure III.17 : Schéma de connexion des LDR à l'Arduino.

- **Branchement des servomoteurs**
- ✓ Tester le fonctionnement des servomoteurs.
- On réalise le montage suivant (figure III.18).

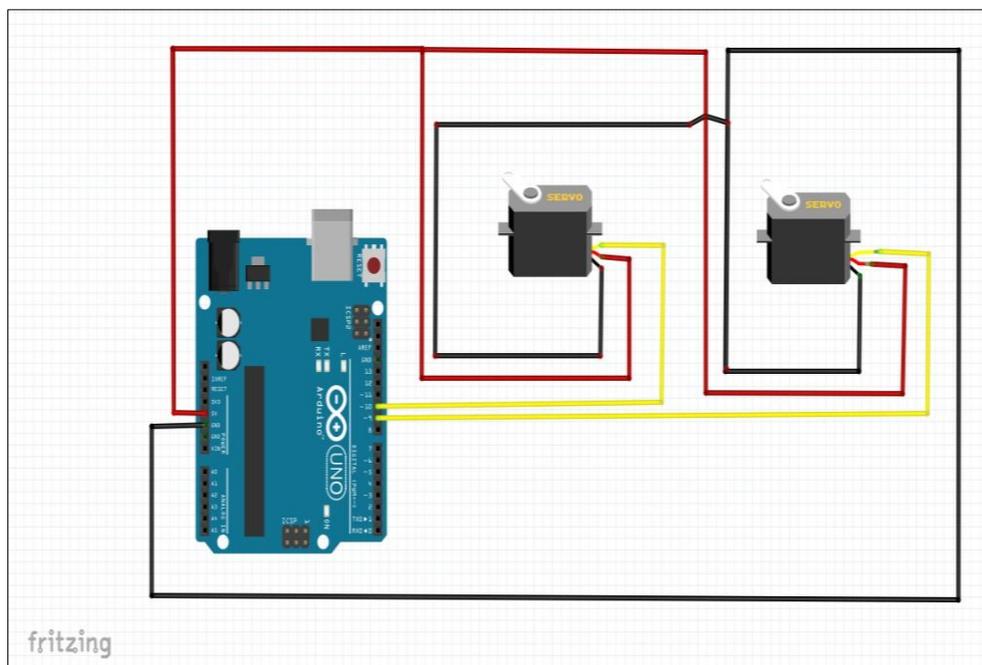


Figure III.18 : Montage Circuit électrique des servomoteurs.

- On injecte le programme de teste qui se situe dans la bibliothèque des exemples Arduino
 >Fichier > Exemples> Servo> Sweep (voir figure III.19).

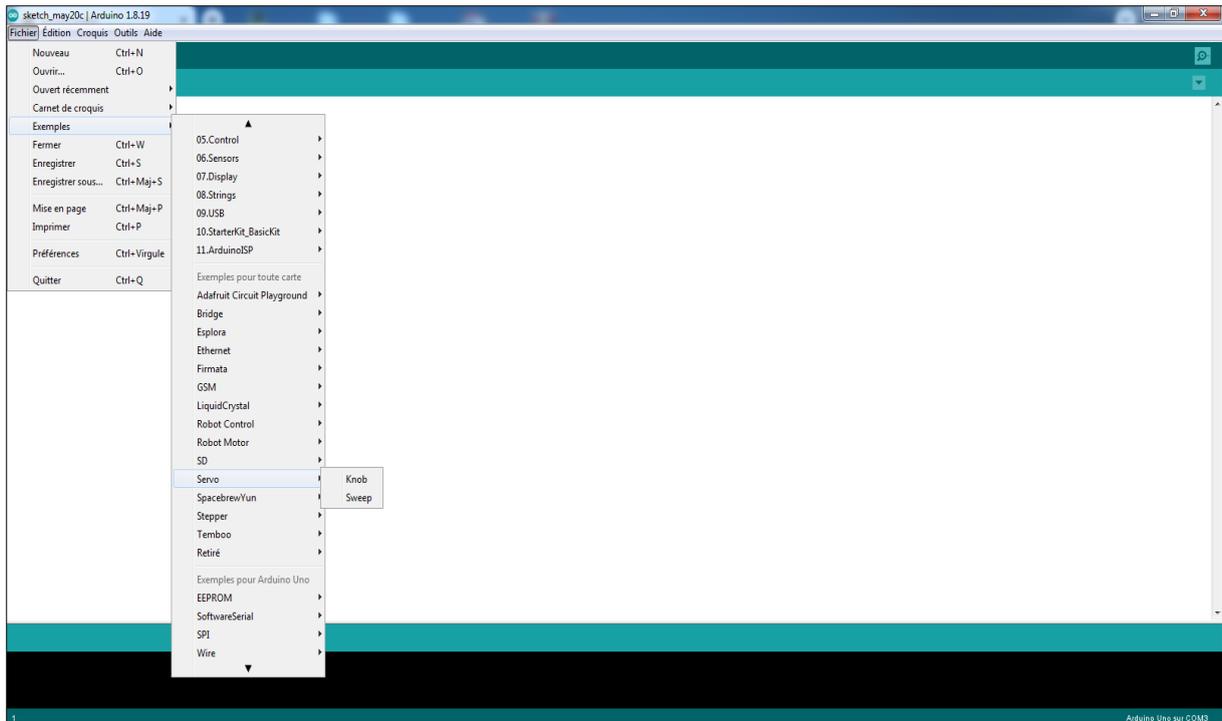


Figure III.19 : Les étapes à suivre pour tester un servomoteur.

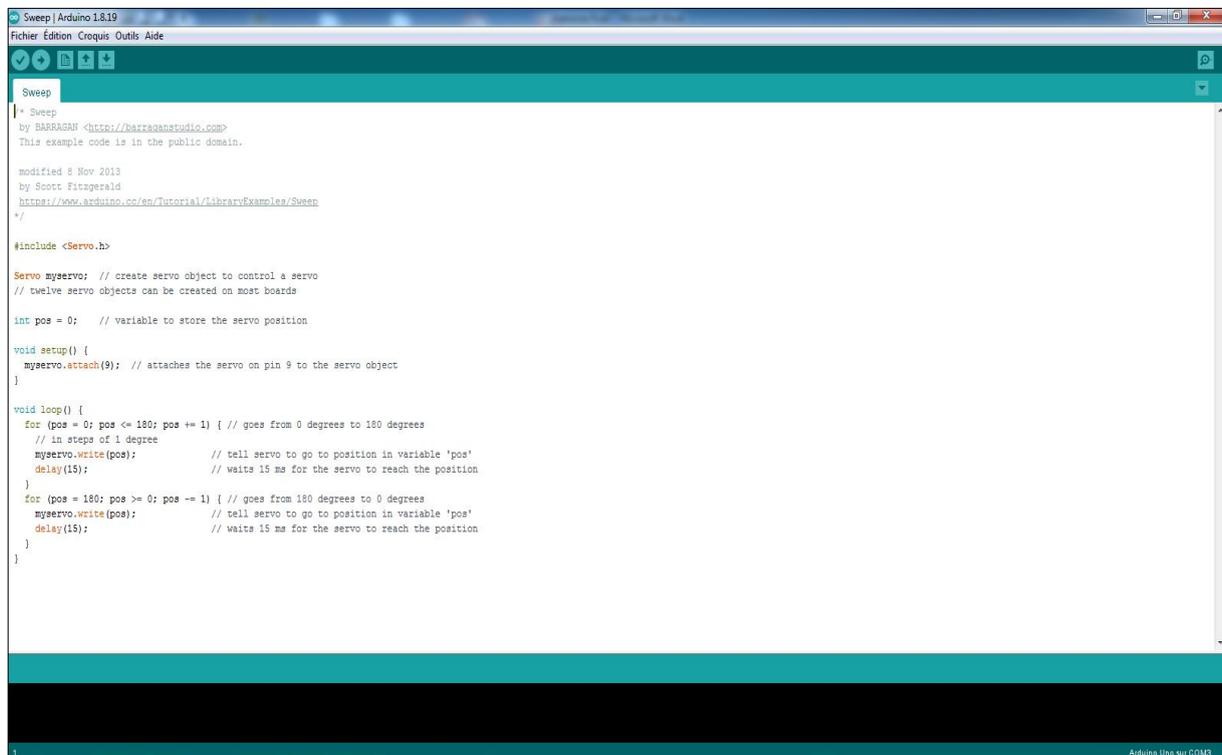


Figure III.20 : Programme Arduino pour tester un servomoteur.

« Le servomoteur va de 0° à 180° ce qui assure son bon fonctionnement ».

➤ **Réalisation du circuit électrique**

❖ Montage du système suiveur solaire.

✓ Principe de fonctionnement :

- En a placé 4 photorésistances chacun étant connecté a résistance de 10 KOhm pour déterminer la direction du soleil et ajuster l'orientation du panneau.
- En a placé deux servo moteur horizontal et vertical pour déplacer le panneau dans la direction du soleil.
- En a réaliser 4 mini panneaux solaires en parallèle pour augmenter le courant.
- Dans notre projet nous avons fait un choix de suiveur à deux axe (axe horizontal et axe vertical).
- Si le capteur capte la lumière du soleil, le microcontrôleur calcule la valeur moyenne et envoie des commandes pour déplacer les moteurs afin de bloquer la direction de la lumière du soleil.

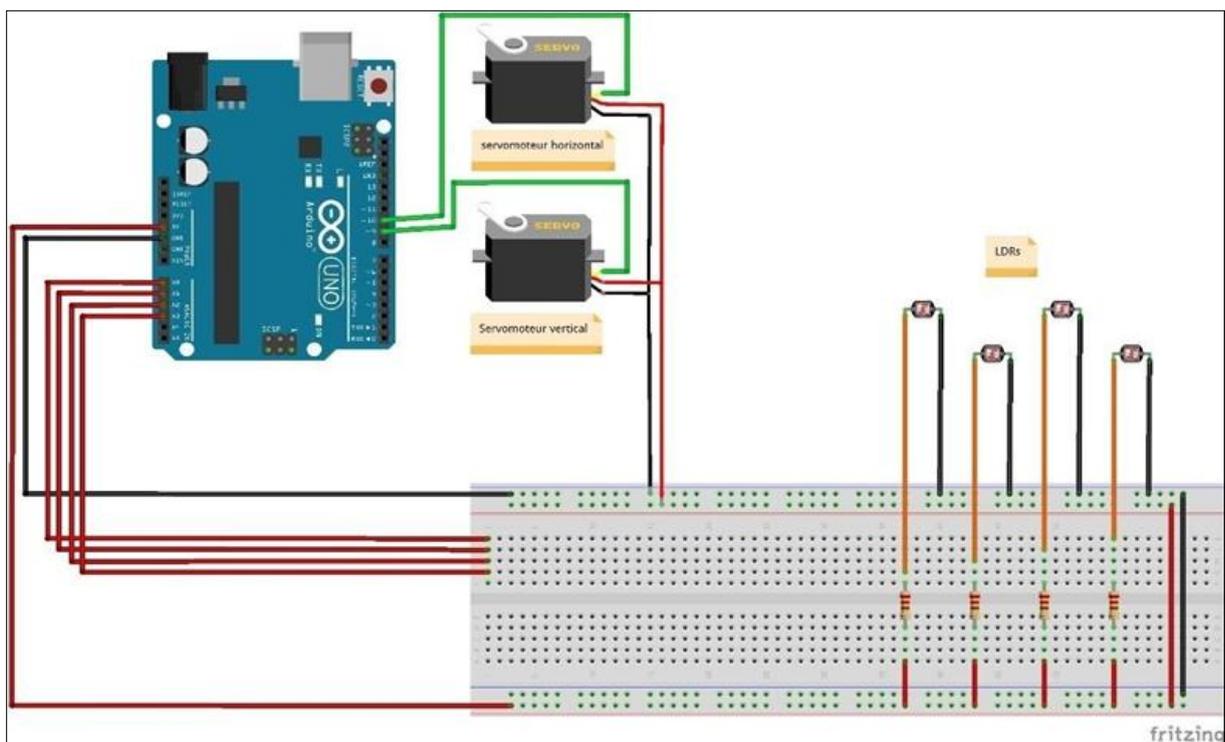


Figure III.21 : Montage du circuit électrique du système suiveur (réalisé avec Fritzing).



Figure III.22 : Montage réel du système suiveur solaire.

III.5.1.2. Système de refroidissement

✓ Principe de fonctionnement du système de refroidissement à eau :

- Le système utilise le capteur de température DS18B20 pour mesurer la température du panneau.
- Lorsque le panneau solaire s'échauffe et atteint 30 °C, le système se lance automatiquement en démarrant la pompe à eau.
- Le refroidissement est à base liquide (eau) stocké dans un réservoir souterrain sous forme d'un circuit fermé.

➤ Réalisation montage du système de refroidissement

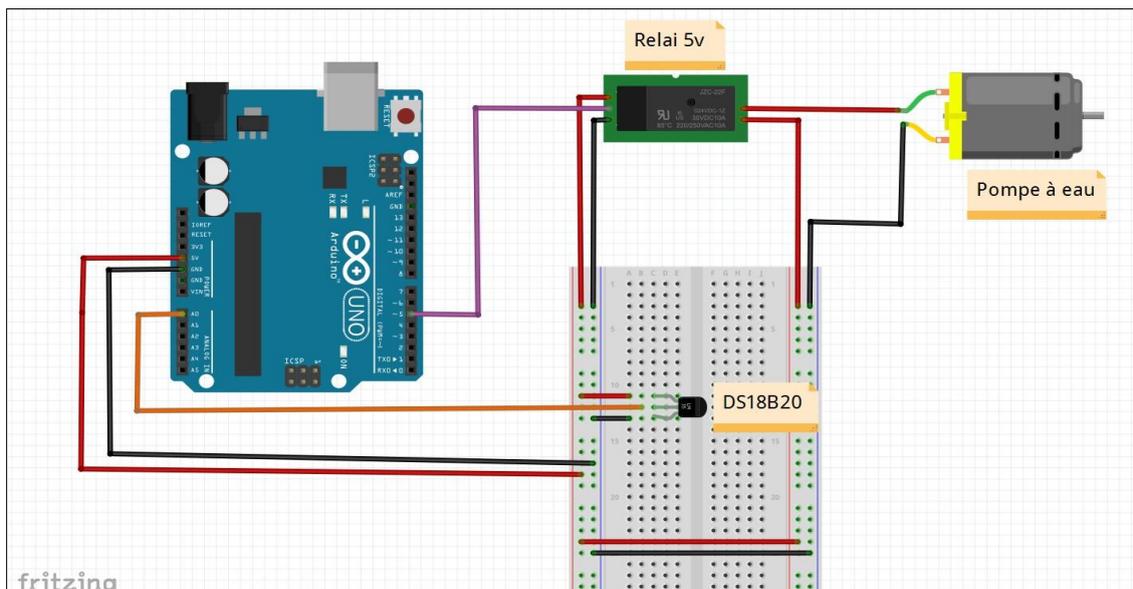


Figure III.23 : Montage du système de refroidissement (capteur de température DS18B20 + relais + pompe à eau).

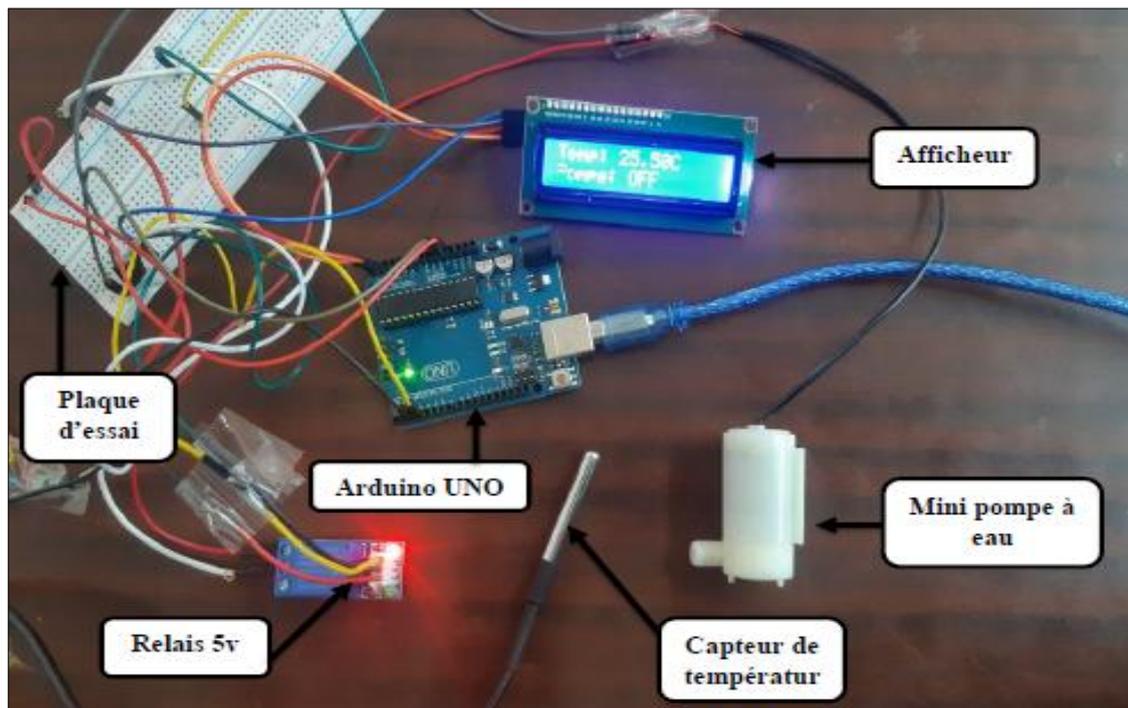


Figure III.24 : Montage réel du système de refroidissement.

- L'assemblage du système suiveur solaire refroidie
- ✓ Montage global (Système suiveur solaire + système de refroidissement).
 - A ce stade, nous avons combiné à deux système et les faire travailler ensemble.

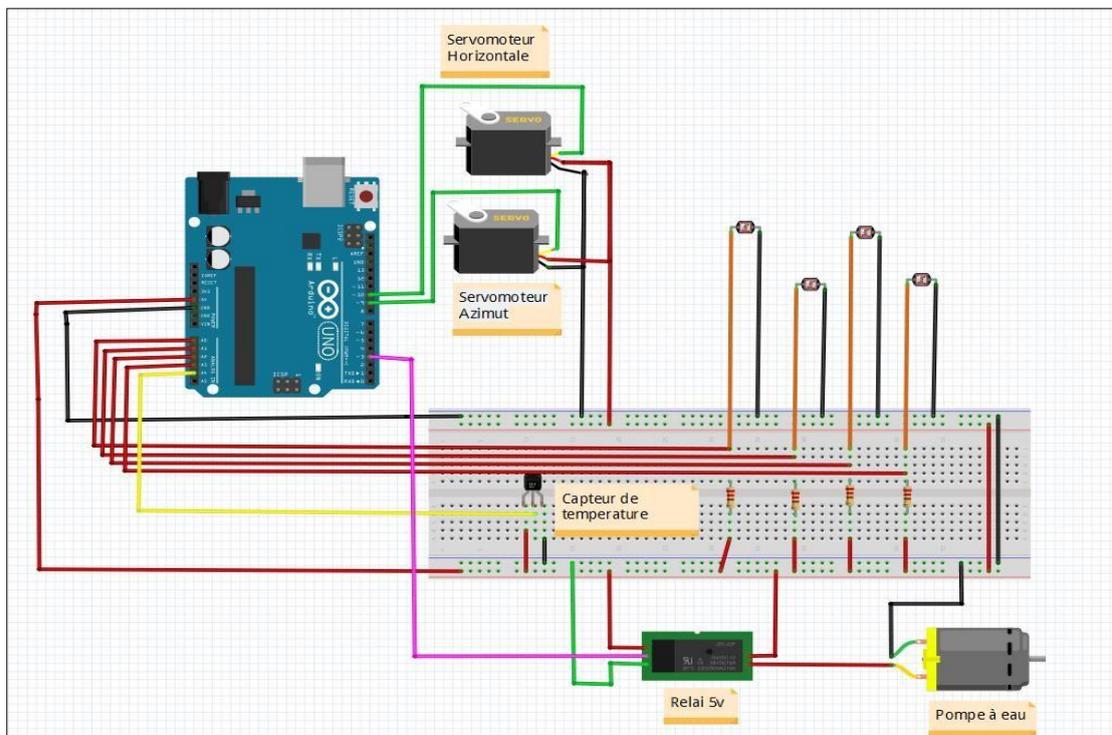


Figure III.25 : Montage global (système suiveur solaire + système de refroidissement).

✓ Le montage final de notre prototype est présenté ci-dessous.

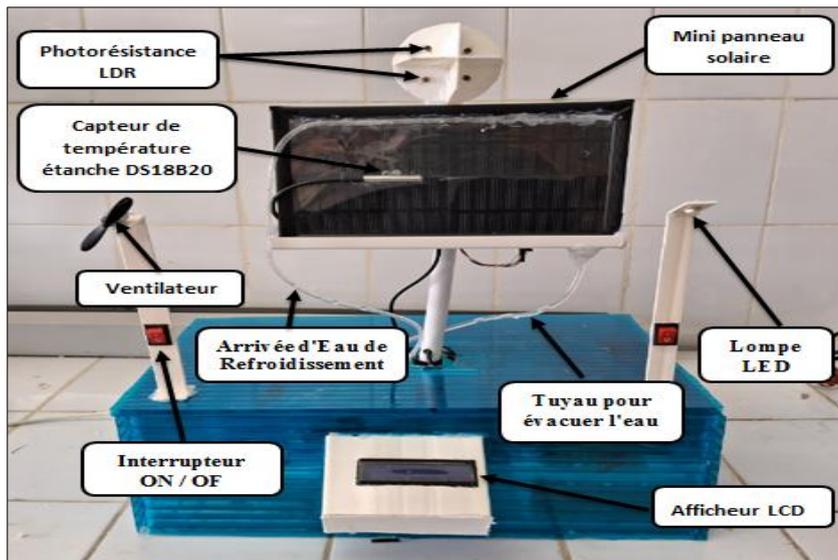


Figure III.26 : Aperçu du prototype.

- Le système est autonome et fonctionne sans intervention humaine.
- Nous avons ajouté un système de stockage d'énergie.
- Le panneau solaire charge deux batteries lithium de 4,2 V et 6800 mA en parallèle à travers le circuit de charge modèle TP4056. Si la lampe rouge s'allume, la batterie est en charge, Si la lampe bleue s'allume, la batterie est complètement chargée.
- Lorsque les batteries sont mises en parallèle, le courant augmente mais la tension reste à 4,2 V. Comme nous avons besoin d'une tension de 5 V pour que le système fonctionne, nous utilisons un élévateur de tension MT3608 pour augmenter la tension de sortie des batteries.
- On a ajouté Réservoir pour stocker l'eau.

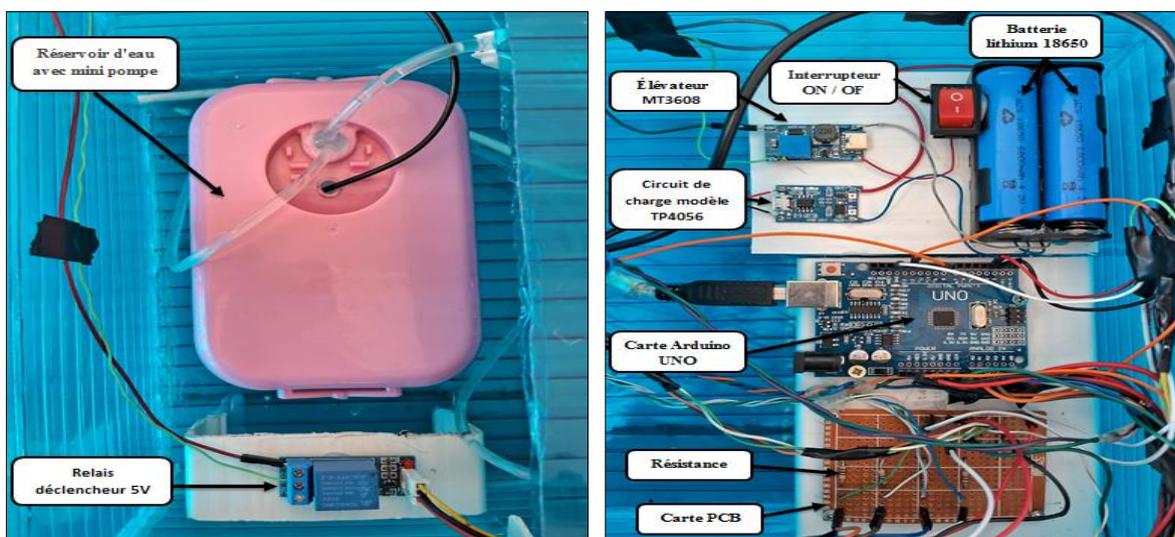
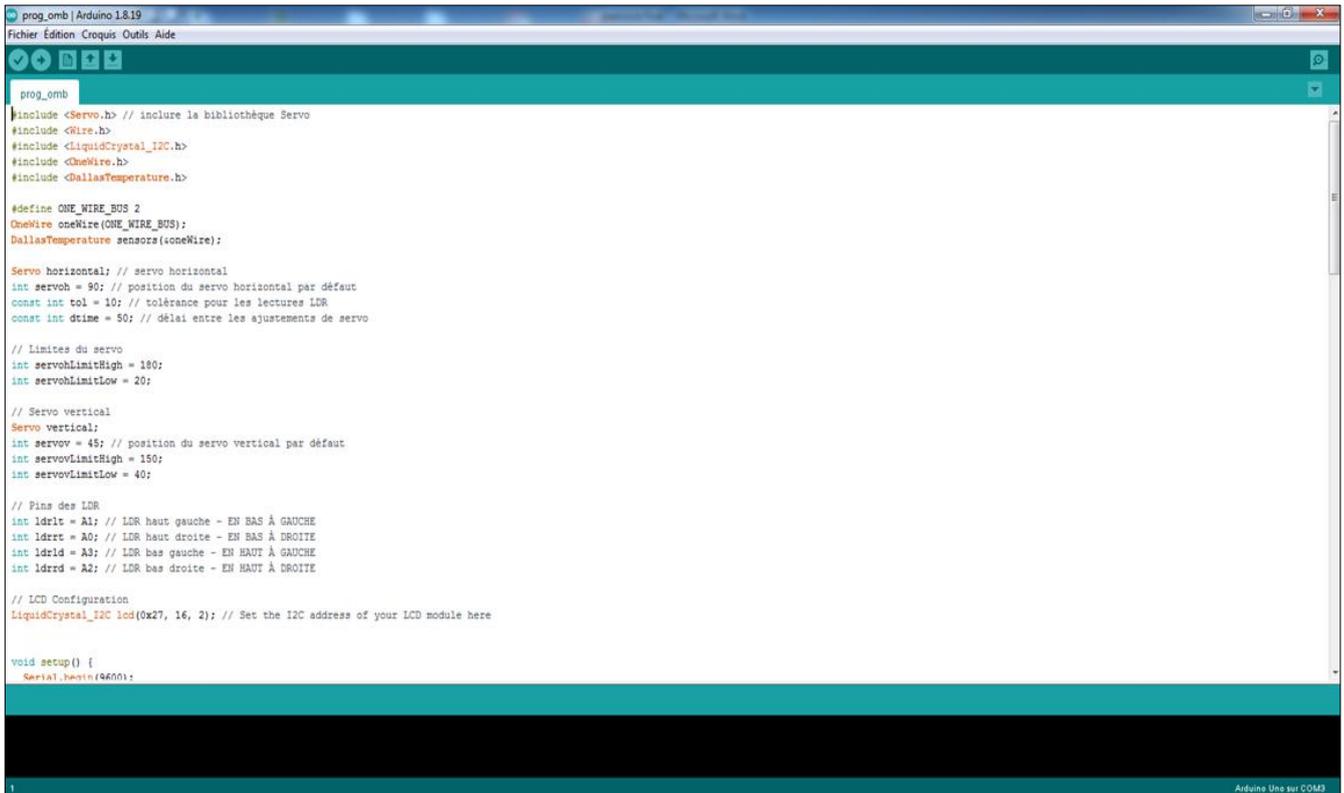


Figure III.27 : Le système global à l'intérieur.

- -Le programme à injecter est disponible en annexe.



```

prog_omb | Arduino 1.8.19
Fichier Édition Croquis Outils Aide

prog_omb
#include <Servo.h> // inclure la bibliothèque Servo
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 2
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

Servo horizontal; // servo horizontal
int servoh = 90; // position du servo horizontal par défaut
const int tol = 10; // tolérance pour les lectures LDR
const int dtime = 50; // délai entre les ajustements de servo

// Limites du servo
int servohLimitHigh = 180;
int servohLimitLow = 20;

// Servo vertical
Servo vertical;
int servov = 45; // position du servo vertical par défaut
int servovLimitHigh = 150;
int servovLimitLow = 40;

// Pins des LDR
int ldr1c = A1; // LDR haut gauche - EN BAS À GAUCHE
int ldr1r = A0; // LDR haut droite - EN BAS À DROITE
int ldr1d = A3; // LDR bas gauche - EN HAUT À GAUCHE
int ldr1s = A2; // LDR bas droite - EN HAUT À DROITE

// LCD Configuration
LiquidCrystal_I2C i2c(0x27, 16, 2); // Set the I2C address of your LCD module here

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

```

Figure III.28 : Programme Arduino du système élaboré.

III.5.2. Partie programmation

➤ Programmation

La carte Arduino UNO est programmable à l'aide du logiciel Arduino. Il suffit de sélectionner "Arduino UNO" dans le menu Outils > Type de carte.

Pour injecter du code dans le microcontrôleur, on utilise un logiciel de programmation des cartes Arduino, écrit en langage Java, libre, et multiplateforme, qui sert d'éditeur et de compilateur.

Le langage de programmation utilisé pour écrire et éditer le code à injecter est le C++. La figure (III.29) représente l'interface du logiciel Arduino.

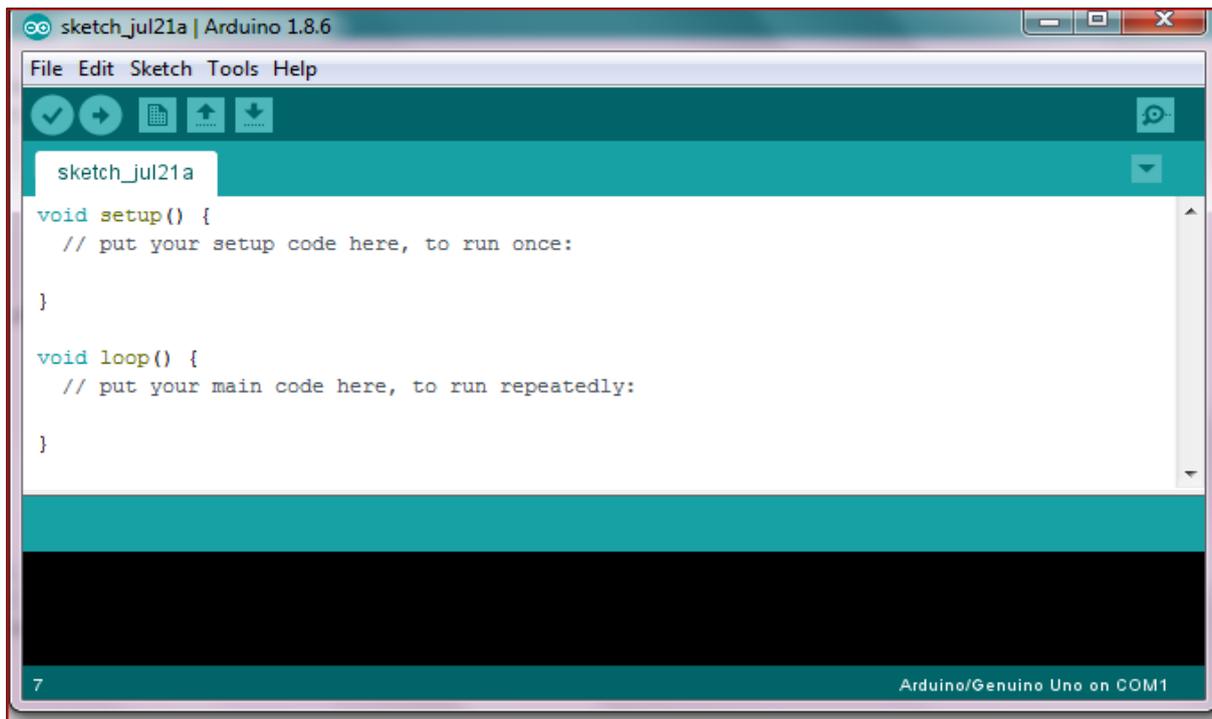


Figure III.29 : Interface du logiciel Arduino.

➤ L'organigramme

L'organigramme principal comporte quatre étapes essentielles, illustrées dans la figure suivante :

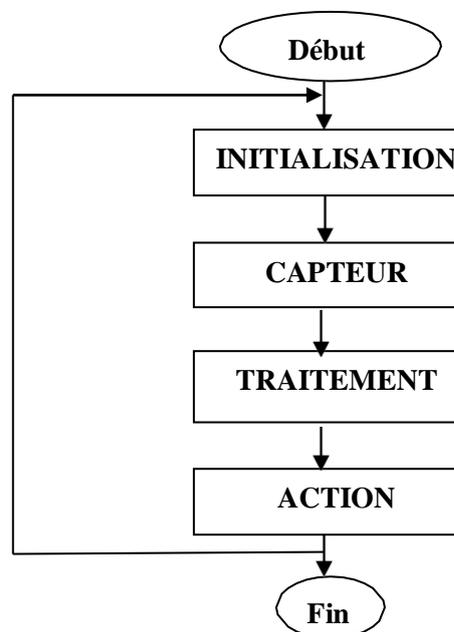


Figure III.30 : Organigramme principal.

III.5.3. Partie simulation (PROTEUS_ISIS)

La simulation de notre montage globale a été réalisée à l'aide du logiciel PROTEUS_ISIS, qui permet de tester et de récupérer en temps réel les résultats de la simulation. La figure (III.31) illustre le montage simulé.

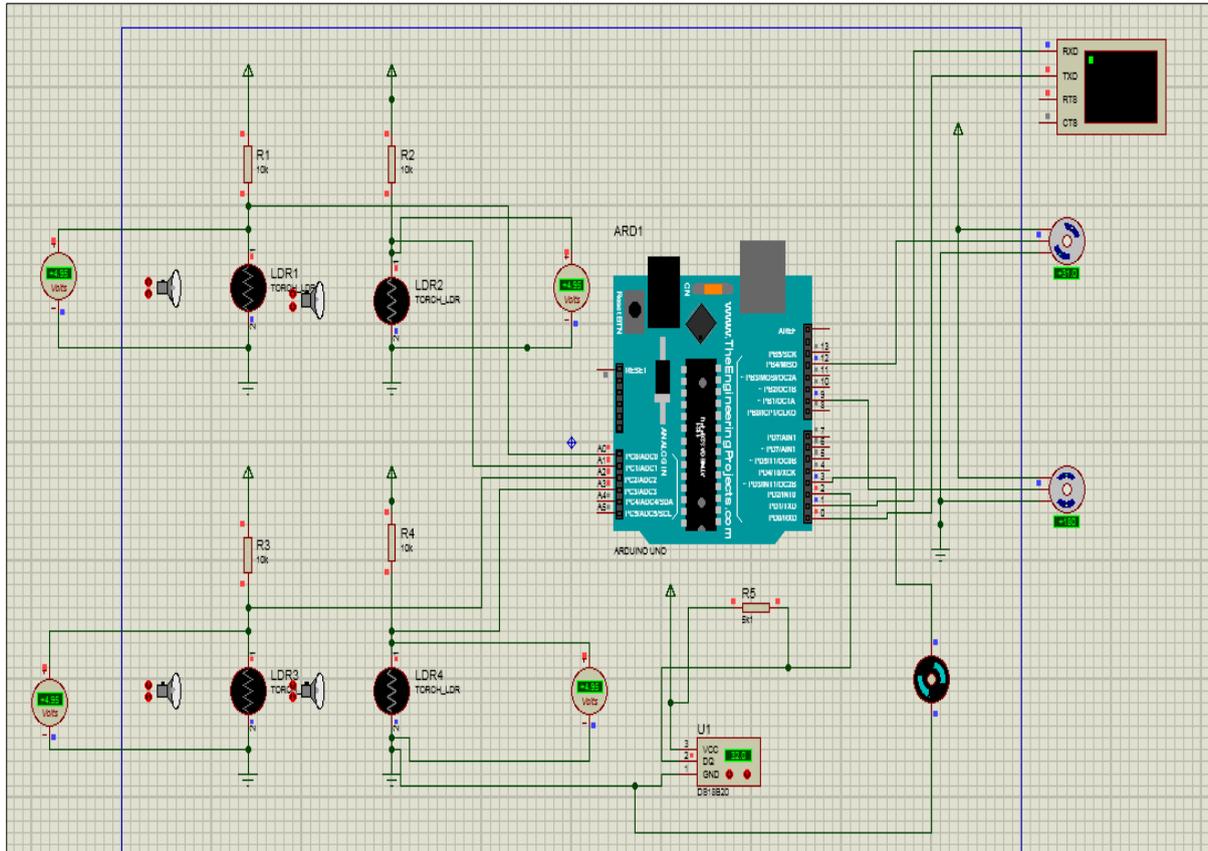


Figure III.31 : Montage globale du système simulé sous PROTEUS-ISIS.

La simulation s'effectue en envoyant le programme de la simulation vers la carte ARDUINO UNO depuis logiciel, selon le programme, si une variation des valeurs des LDRs est détectée lors de la simulation, une valeur de consigne est reçue, représentant la différence calculée entre elles. Cette valeur déclenche une action qui est un ordre d'Arduino vers les servomoteurs, consistant à effectuer une rotation sur deux axes, vertical et horizontal.

III.6. Conclusion

Dans cette conclusion, nous soulignons le succès de notre projet de conception. Le prototype que nous avons développé, combinant un système de suivi solaire à un dispositif de refroidissement contrôlé par une carte Arduino, a démontré son efficacité. Il a suivi avec précision la trajectoire du soleil et a activé automatiquement le mécanisme de refroidissement lorsque le panneau solaire se chauffait.

Ces résultats confirment la validité de notre approche et la pertinence de nos choix technologiques. Notre objectif initial a été pleinement atteint, ce qui témoigne du succès de notre démarche de conception et de développement. Cette réalisation ouvre la voie à de nouvelles perspectives dans le domaine des systèmes d'énergie solaire et de leur gestion intelligente. En somme, ce projet représente une étape significative dans la recherche de solutions.

Conclusion générale

Conclusion générale

La principale contribution de ce travail réside dans notre projet, qui a apporté une contribution significative en proposant un système novateur visant à augmenter le rendement des panneaux solaires. En combinant un suiveur solaire avec un système de refroidissement, nous avons réussi à créer un dispositif capable d'optimiser la production d'énergie solaire.

Notre démarche s'est articulée autour de plusieurs phases, de l'étude du fonctionnement du système photovoltaïque à la conception et la réalisation de notre prototype. Nous avons ainsi démontré que l'association d'un suiveur solaire et d'un système de refroidissement peut conduire à une augmentation significative du rendement, pouvant atteindre jusqu'à 40%.

Ces résultats ouvrent des perspectives prometteuses dans le domaine de l'énergie solaire, en offrant une solution concrète pour améliorer l'efficacité des panneaux solaires. Ils témoignent également de l'importance de l'innovation technologique dans la recherche de solutions durables pour répondre aux défis énergétiques actuels. En somme, notre projet représente une avancée significative vers une utilisation plus efficace et rentable de l'énergie solaire.

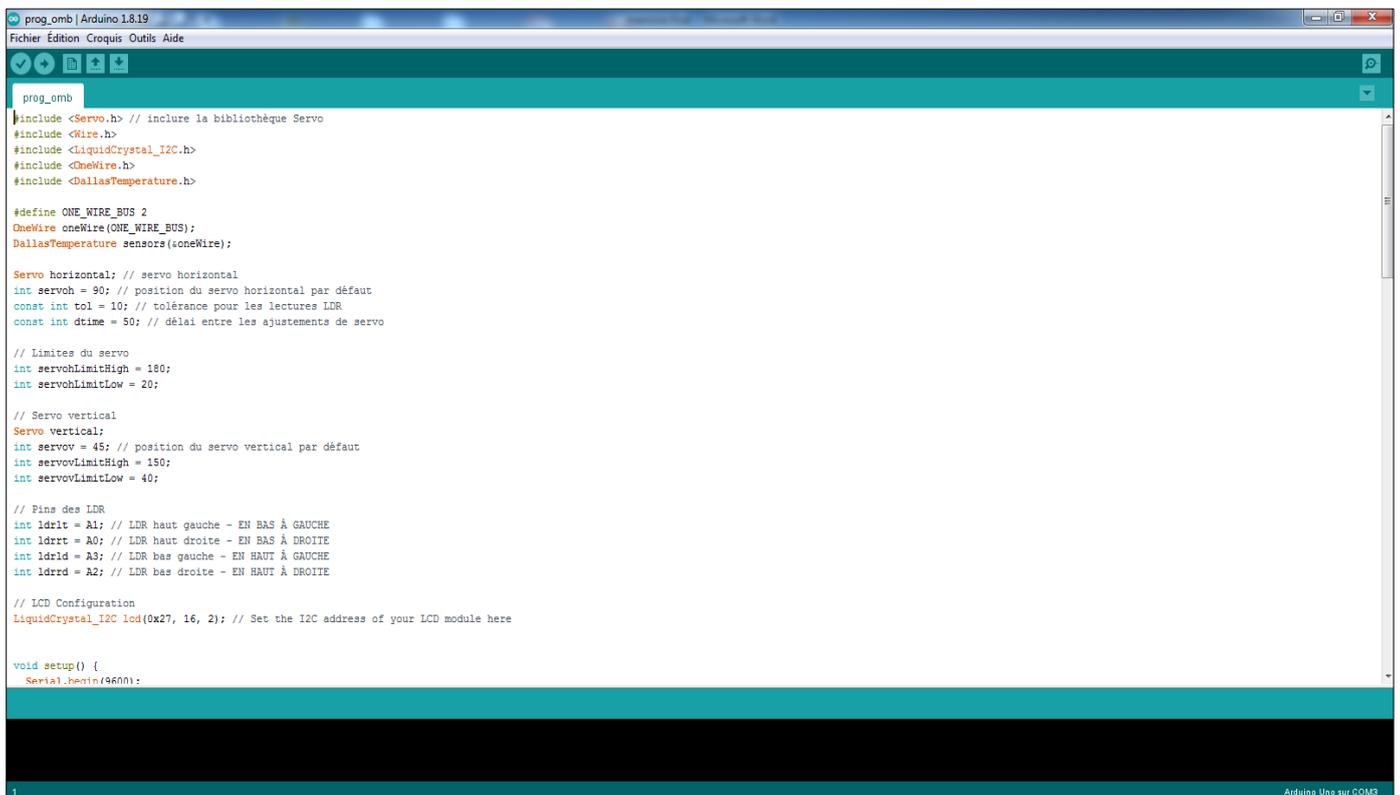
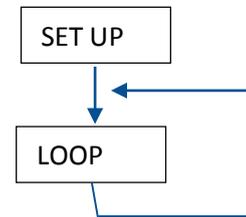
ANNEXES

Logiciel utilisé

❖ 1. Arduino

Langage proche du C.

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



```
prog_omb
#include <Servo.h> // inclure la bibliothèque Servo
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 2
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

Servo horizontal; // servo horizontal
int servoh = 90; // position du servo horizontal par défaut
const int tol = 10; // tolérance pour les lectures LDR
const int dtime = 50; // délai entre les ajustements de servo

// Limites du servo
int servohLimitHigh = 180;
int servohLimitLow = 20;

// Servo vertical
Servo vertical;
int servov = 45; // position du servo vertical par défaut
int servovLimitHigh = 150;
int servovLimitLow = 40;

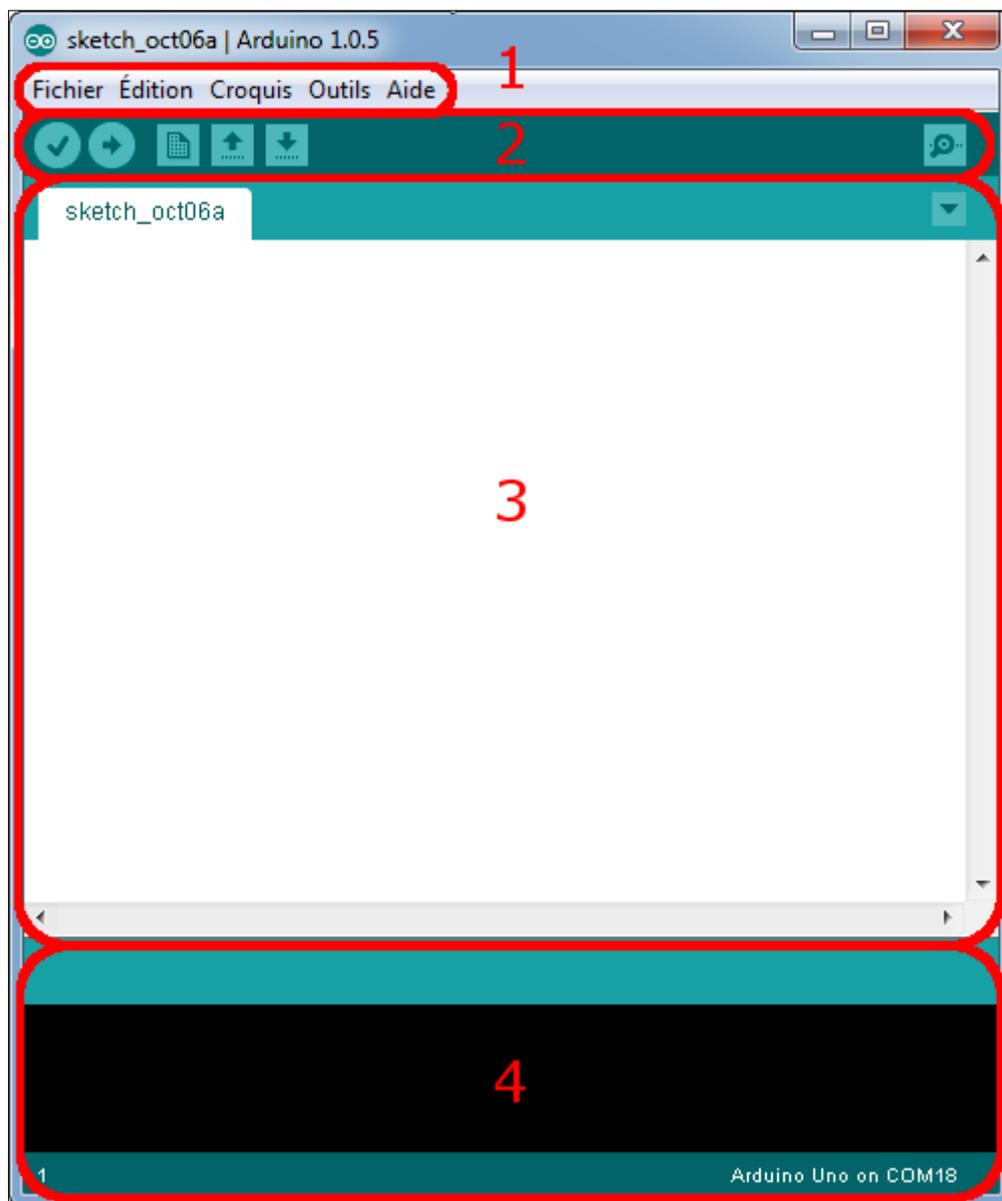
// Pins des LDR
int ldrlt = A1; // LDR haut gauche - EN BAS À GAUCHE
int ldrrt = A0; // LDR haut droite - EN BAS À DROITE
int ldrlb = A3; // LDR bas gauche - EN HAUT À GAUCHE
int ldrrb = A2; // LDR bas droite - EN HAUT À DROITE

// LCD Configuration
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Set the I2C address of your LCD module here

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

l'interface du logiciel arduino.

✓ **Présentation de l'interface du logiciel**



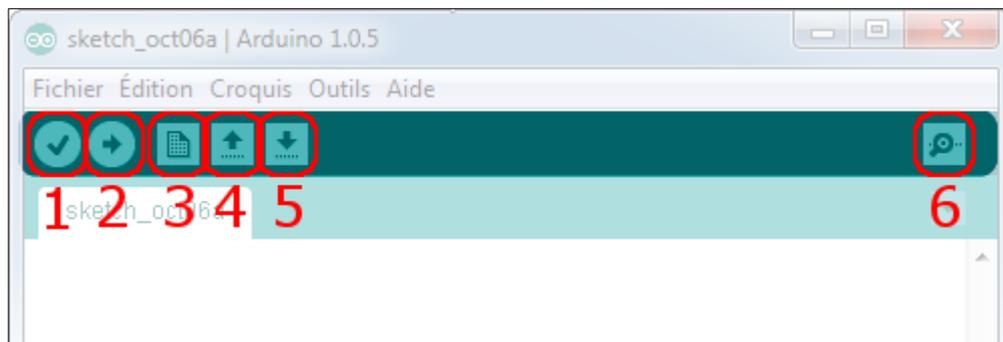
L'interface de l'IDE Arduino en détail.

➤ **Correspondance**

- Le cadre numéro 1 : ce sont les options de configuration du logiciel.
- Le cadre numéro 2 : il contient les boutons qui vont nous servir lorsque l'on va programmer nos cartes.
- Le cadre numéro 3 : ce bloc va contenir le programme que nous allons créer.
- Le cadre numéro 4 : celui-ci est important, car il va nous aider à corriger les fautes dans notre programme.

➤ Les boutons

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



La barre d'outils

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

❖ 2. Fritzing



C'est logiciel très simple sert a réalisé des montages électronique Présentation du logiciel.

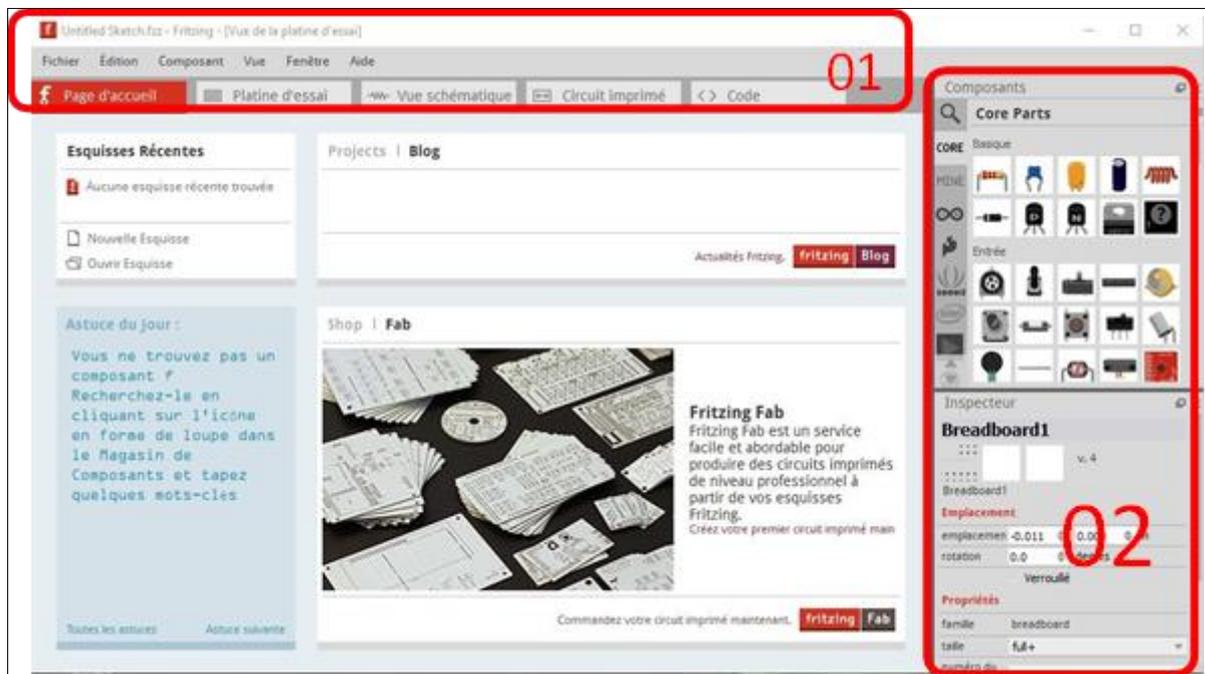
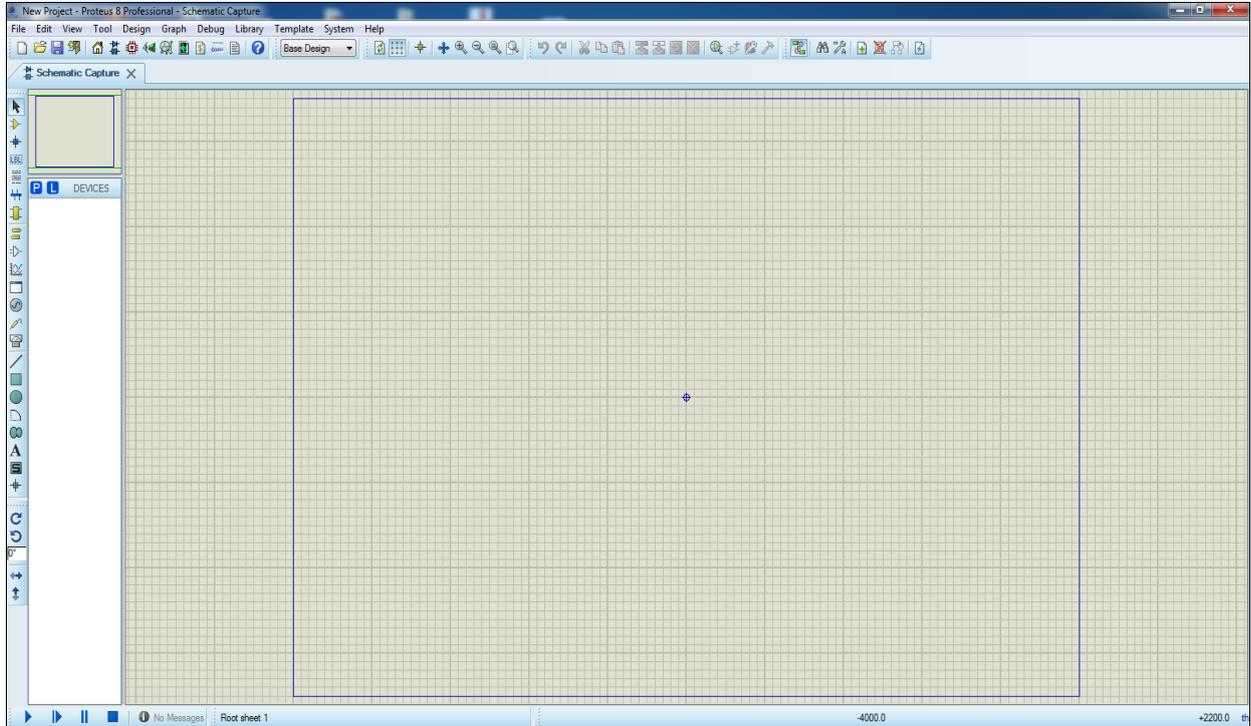


Figure Correspondance

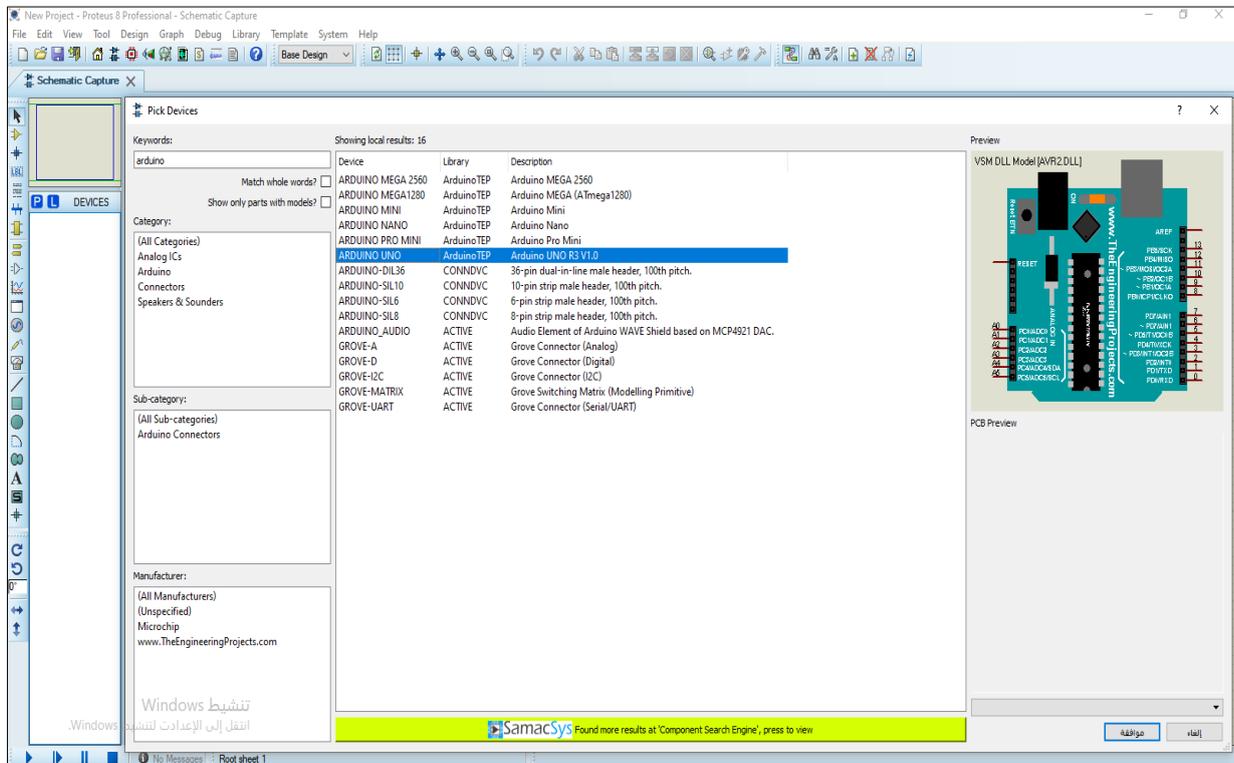
- 01 : barre d'outils composé de « platine d'essai », « vue schématique », « circuit imprimé », « code ».
- 02 : liste des composants.

❖ 3. Proteus 8 Professional

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



Interface de logiciel proteus 8 Professional



La fenêtre ou ce trouve les composants.

❖ Le programme utilisé

```
#include <Servo.h> // inclure la bibliothèque Servo pour contrôler les servomoteurs
#include <Wire.h> // inclure la bibliothèque Wire pour la communication I2C
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // inclure la bibliothèque pour les écrans LCD utilisant I2C
#include <OneWire.h> // inclure la bibliothèque OneWire pour les capteurs à fil unique
#include <DallasTemperature.h> // inclure la bibliothèque Dallas Temperature pour les capteurs de température

#define ONE_WIRE_BUS 2 // définir le pin pour le bus OneWire
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); // créer un objet OneWire
DallasTemperature sensors(&oneWire); // créer un objet DallasTemperature

Servo horizontal; // créer un objet Servo pour le mouvement horizontal
int servoh = 90; // position par défaut du servomoteur horizontal
const int tol = 10; // tolérance pour les lectures des LDR
const int dtime = 50; // délai entre les ajustements du servomoteur

// Limites pour le servomoteur horizontal
int servohLimitHigh = 180;
int servohLimitLow = 0;

// Créer un objet Servo pour le mouvement vertical
Servo vertical;
int servov = 45; // position par défaut du servomoteur vertical
int servovLimitHigh = 130;
int servovLimitLow = 40;

// Pins pour les LDR
int ldrLt = A1; // LDR haut gauche - EN BAS À GAUCHE
int ldrRt = A0; // LDR haut droite - EN BAS À DROITE
int ldrLd = A3; // LDR bas gauche - EN HAUT À GAUCHE
int ldrRd = A2; // LDR bas droite - EN HAUT À DROITE

// Configuration de l'écran LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // définir l'adresse I2C de votre module LCD ici

void setup() {
  Serial.begin(9600); // démarrer la communication série
  pinMode(3, OUTPUT); // définir le pin 3 comme sortie
```

```
digitalWrite(3, HIGH); // initialiser le pin 3 à HIGH
sensors.begin(); // démarrer les capteurs de température
horizontal.attach(9); // attacher le servomoteur horizontal au pin 9
vertical.attach(12); // attacher le servomoteur vertical au pin 12
horizontal.write(90); // positionner le servomoteur horizontal à 90 degrés
vertical.write(45); // positionner le servomoteur vertical à 45 degrés
delay(1000); // attendre une seconde
// Initialisation de l'écran LCD
lcd.init(); // initialiser l'écran LCD
lcd.backlight(); // allumer le rétroéclairage de l'écran LCD
}

void loop() {
  unsigned long ta = millis(); // obtenir le temps actuel en millisecondes
  do {
    int lt = analogRead(ldrlt); // lire la valeur du LDR haut gauche
    int rt = analogRead(ldrrt); // lire la valeur du LDR haut droite
    int ld = analogRead(ldrld); // lire la valeur du LDR bas gauche
    int rd = analogRead(ldrrd); // lire la valeur du LDR bas droite
    int avt = (lt + rt) / 2; // calculer la moyenne des valeurs en haut
    int avd = (ld + rd) / 2; // calculer la moyenne des valeurs en bas
    int avl = (lt + ld) / 2; // calculer la moyenne des valeurs à gauche
    int avr = (rt + rd) / 2; // calculer la moyenne des valeurs à droite
    int dvert = avt - avd; // différence entre les valeurs en haut et en bas
    int dhoriz = avl - avr; // différence entre les valeurs à gauche et à droite

    if (-1 * tol > dvert || dvert > tol) { // vérifier si la différence verticale est hors de la tolérance
      if (avt > avd) {
        servov++; // augmenter l'angle vertical
        if (servov > servovLimitHigh)
          servov = servovLimitHigh; // limiter l'angle vertical au maximum
      } else if (avt < avd) {
        servov--; // diminuer l'angle vertical
        if (servov < servovLimitLow)
          servov = servovLimitLow; // limiter l'angle vertical au minimum
      }
      vertical.write(servov); // ajuster le servomoteur vertical
    }
  }
}
```

```
if (-1 * tol > dhoriz || dhoriz > tol) { // vérifier si la différence horizontale est hors de la tolérance
  if (avl > avr) {
    servoh--; // diminuer l'angle horizontal
    if (servoh < servohLimitLow)
      servoh = servohLimitLow; // limiter l'angle horizontal au minimum
  } else if (avl < avr) {
    servoh++; // augmenter l'angle horizontal
    if (servoh > servohLimitHigh)
      servoh = servohLimitHigh; // limiter l'angle horizontal au maximum
  }
  horizontal.write(servoh); // ajuster le servomoteur horizontal
}
delay(dtime); // attendre avant le prochain ajustement
```

```
// Lecture de la température du capteur de température
unsigned long tb = millis(); // obtenir le temps actuel en millisecondes
unsigned long ts = tb - ta; // calculer le temps écoulé
if (ts >= 10000) break; // sortir de la boucle après 10 secondes
} while (true); // boucle pendant 10 secondes
```

```
Serial.println("Demande des températures..."); // imprimer un message dans le moniteur série
sensors.requestTemperatures(); // envoyer la commande pour obtenir les lectures de température
Serial.println("FAIT"); // imprimer un message dans le moniteur série
Serial.print("La température est : "); // imprimer un message dans le moniteur série
Serial.println(sensors.getTempCByIndex(0)); // imprimer la température lue dans le moniteur série
```

```
float temperatureC = sensors.getTempCByIndex(0); // obtenir la température en degrés Celsius
```

```
// Afficher la température sur l'écran LCD
lcd.setCursor(0, 0); // positionner le curseur de l'écran LCD
lcd.print("Temp: "); // afficher "Temp: " sur l'écran LCD
lcd.print(temperatureC); // afficher la température sur l'écran LCD
lcd.print("C"); // afficher "C" pour les degrés Celsius
```

```
if (sensors.getTempCByIndex(0) > 26) {
  // Allumer la pompe
  digitalWrite(3, LOW); // mettre le pin 3 à LOW pour allumer la pompe
  lcd.setCursor(0, 1); // positionner le curseur de l'écran LCD
  lcd.print("Pump: ON "); // afficher "Pump: ON " sur l'écran LCD
}
```

```
Serial.println("Pump turned on"); // imprimer un message dans le moniteur série
} else {
  // Éteindre la pompe
  digitalWrite(3, HIGH); // mettre le pin 3 à HIGH pour éteindre la pompe
  lcd.setCursor(0, 1); // positionner le curseur de l'écran LCD
  lcd.print("Pump: OFF"); // afficher "Pump: OFF" sur l'écran LCD
  Serial.println("Pump turned off"); // imprimer un message dans le moniteur série
}
}
```

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Hadj Abderrahmane, M., et Ghezzal, M. W. (2016/2017). Mémoire: Étude et réalisation d'un système de production d'énergie électrique par des panneaux photovoltaïques. MASTER2, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.
- [2] [http://gerard.moreau13.free.fr/Guppy/file/Confort et domotique_09_04_2012/1-039-optimisation-des-apports-solaires-et-energies-renouvelables-panneaux-photovoltaiques/sequence%20eleve/medias/ressources/historique_photovoltaique0370346001296127371.pdf](http://gerard.moreau13.free.fr/Guppy/file/Confort_et_domotique_09_04_2012/1-039-optimisation-des-apports-solaires-et-energies-renouvelables-panneaux-photovoltaiques/sequence%20eleve/medias/ressources/historique_photovoltaique0370346001296127371.pdf) .
- [3] Bouzid,Z.« Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien Photovoltaïque: Application pour un site isolé », Thèse de Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen, p. 20 .
- [4]<https://www.slideshare.net/slideshow/les-formes-exploitable-des-nergies-renouvelables/48969281>.
- [5] Halouane, A. (2016/2017). "Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque." Mémoire de PFE, Master Génie Mécanique, Energétique et Environnement, Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES. .
- [6] https://www.wikiwand.com/fr/%C3%89nergie_en_Al%C3%A9rie.
- [7] www.sciencedirect.com/topics/engineering/direct-radiation.
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Bilan_radiatif_de_la_Terre
- [9] ILHEM, ZEGHIB. (2005). "Étude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire Parabolique." Université Mentouri - Constantine.
- [10] B. Sylvain. (2011). Installations solaires photovoltaïques. Paris: Édition Le Moniteur, 280p. ISBN: 978-281-11497-3.
- [11] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2013). International Renewable Energy Conference.
- [12]https://www.researchgate.net/figure/Irradiation-Globale-Directe-Annuelle-Moyenne-Periode-2002-2011-18_fig3_370342304.
- [13] www.sciencedirect.com/topics/engineering/photovoltaic-technology.
- [14] Nacer Eddine, T., et Slimane, G. (2015). "Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque." Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhder D'el-Oued.
- [15]<https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>.
- [16] Wafa, B. (2012). "Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque Adapté Par. Une Commande MPPT." Diplôme de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla.
- [17] <https://enercit82.fr/produireelec.html>.
- [18] <https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaique3/modules-photovoltaiques/>.

- [19] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>.
- [20] Yacine, F. (2010/2011). "Etude des nouvelles générations de cellules photovoltaïques." Mémoire de Magister en Physique Rayonnement et Matière, Université des Sciences et Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [21] Slama, F. "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique." Mémoire de Magister en Electrotechnique, Réseau Electrique, Université Ferhat Abbas-Setif UFAS.
- [22] Zennou, M., et Guamit, F. (2019). "Étude par simulation de la méthode P et O pour un panneau photovoltaïque." Mémoire de Master en Commande Electrique, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [23] https://www.researchgate.net/figure/Module-PV-en-groupement-serie-parallele-des-cellules_fig1_282574116.
- [24] <http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/view.php?id=2448> et chapterid=1522.
- [25] Belaïd Lalouni, S. (2014/2015). "Cours Energie solaire photovoltaïque." Université A. Mira de Béjaia, p. 18.
- [26] Yassine, I. (2013). "Système Hybride Photovoltaïque – Éolien – Diesel Sans Stockage." Projet De Fin D'études, Université Libanaise.
- [27] Mohammed, B. (2008). "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome." Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Bechar.
- [28] Reda, M. (2010). "Modélisation D'un Dispositif MPPT Pour L'étude De L'augmentation De La Puissance Produite Par Les Générateurs Photovoltaïques." Diplôme De Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [29] <https://www.bonst.net/solar-power-technology.htm>
- [30] <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-electricite-solaire-energie-rayonnante-1225/page/12/>.
- [31] Slama, F. (2011). "Modélisation D'un Système Multi Générateurs Photovoltaïques Interconnectés Au Réseau Électrique." Mémoire De Magister, Université Ferhat Abbas – Setif.
- [33] Helali, K. (25/06/2012). "Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Étude Comparative." Mémoire de Magister en Électrotechnique, Machines Électriques, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [34] Noble, G. (2016, March 17). Des trackers nouvelle génération pour capter et concentrer le soleil. Batiactu.
- [35] Benmohammadi, Z. (2014). Etude, conception et réalisation d'une commande d'un suiveur solaire (Mémoire de projet de fin d'étude). Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès.
- [36] <https://www.monkitsolaire.fr/blog/tracker-solaire-n241>.

- [37] Boulahbal, A. Etude et simulation du fonctionnement du système suiveur des panneaux solaires (Mémoire de master). Université Badji Mokhtar Annaba.
- [38] Rida, B., & Abderraouf, S. (2014). Réalisation d'un suiveur solaire base de PIC (Mémoire de fin d'étude).
- [39] Saheb, S. (2017). Étude et réalisation d'un suiveur solaire bi-axial à base d'un microcontrôleur Arduino (Mémoire de Master 2). Université El Arbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi.
- [40] Taie, N. Etude du refroidissement des cellules photovoltaïques par un matériau à changement de phase (Mémoire de Doctorat en Sciences). Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [41] <https://www.eco-performance.eu/aerovoltaique-comment-ca-marche/>.
- [42] https://www.econologie.com/forums/solaire-thermique/panneau-solaire-hybride-photovoltthermique-pvt-solar-t7723-10.html#google_vignette
- [43] <https://www.pv-magazine.fr/2020/04/02/une-entreprise-francaise-developpe-un-systeme-pour-refroidir-les-panneaux-solaires-avec-de-leau/>.
- [44] <https://www.lechodusolaire.fr/sunibrain-leve-des-fonds-pour-se-developper-a-linternational/>.
- [45] <https://unitedpressuresystems.com/solar-panel-cleaner-5/>.
- [46] Le grand livre Arduino edition 3.
- [47] <https://www.framboise314.fr/scratch-raspberry-pi-composants/module-detecteur-de-lumiere-a-ldr/>.
- [48] <https://passionelectronique.fr/photoresistance/>.
- [49] <https://www.hwlibre.com/fr/servomoteur-sg90/>.
- [50] <https://powertech-dz.net/products/single/module-de-relais-de-declenchement-de-bas-niveau-5v-1246816-canaux-vente-composants-electronique-blida-algerie-1110>.
- [51] <https://www.hwlibre.com/fr/tp4056/>.
- [52] <https://latinafy.com/fr-es/products/pack-of-5-rechargeable-18650-6800mah-4-2v-batteries-by-uitrafirc>.
- [53] <https://www.elektor.fr/products/standard-2x16-character-back-lit-lcd>.