

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie électrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Eléctrotechnique

Spécialité : Machines électrique

Présenté par :

Mohammed Akram Mesli Mohammed Sayah Zouzou

Étude et réalisation de système suiveur photovoltaïque

Soumis au jury composé de:

M ^F Abderrahman Abbassi	MCB	Président	UKM Ouargla
Mr Sidali Kouras	MAA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^F Mohammed Arrif	MCB	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu qui m'a donné la patience
nécessaire pour achever ce travail.

Mes remerciements particuliers vont à mon encadrant,

Monsieur **Sid Ali Kouras**, pour son rôle dans l'élaboration
de ce travail.

J'exprime ma gratitude à tous les membres du jury pour
avoir accepté de lire ce manuscrit et pour leurs remarques
précieuses ayant contribué à sa version finale.

Dédicace

À celle qui a semé en moi les valeurs, m'a offert son amour
et n'a jamais cessé de prier pour moi,

À ma chère mère...

À celui qui m'a appris la persévérance et m'a toujours
soutenu dans les moments difficiles,

À mon père bien-aimé...

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur
encouragement et leur présence constante...

À mes enseignants, pour leurs efforts, leur patience et leur
accompagnement précieux...

À mes amis et camarades, avec qui j'ai partagé de beaux
souvenirs tout au long de ce parcours...

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la
réalisation de ce travail...

Je vous dédie humblement ce mémoire, en témoignage de
ma reconnaissance et de mon respect.

Zouzou mohammed sayah

Dédicace

À celui qui a quitté ce monde mais n'a jamais quitté mon cœur...

À mon cher père, que Dieu ait ton âme en paix.

Ce travail est l'aboutissement de ton amour, de tes sacrifices et de tes rêves pour moi.

Puisse ce modeste succès t'atteindre là où tu es, comme un hommage rempli d'amour et de prière.

À ma mère bien-aimée, source inépuisable de tendresse et de force,

Merci pour ton soutien, ta patience et tes prières qui m'ont guidé jusqu'ici.

À mes frères et sœurs, ma force et mon refuge,

À mes amis fidèles et à tous ceux qui m'ont encouragé de près ou de loin...

Résumé :

L'énergie solaire devient actuellement une énergie alternative de l'énergie pétrolière devant les changements économiques, climatiques et la demande progressive de l'énergie dans la vie sociale. Au cours de la journée, le soleil se déplace continuellement, Si le panneau solaire photovoltaïque est fixé dans une position fixe qui ne change pas dans ce cas l'énergie ne peut être maximale seulement à midi. Pour obtenir un rendement maximal d'énergie, le panneau solaire photovoltaïque doit se situer exactement en face de la position du soleil pendant toute la journée.

Alors, il est nécessaire de le fixer sur un support vertical actionné par un système d'asservissement qui lui permet d'obtenir la position requise. Le matin, le système démarre en détectant la position du soleil et suit sa position durant la journée. Le soir, l'heure fixée suivant le mois, permet le retour automatique en position initiale. Après le retour, l'alimentation du dispositif de commande est coupée.

Mots clés : Energies renouvelable, traqueur solaire, suiveur solaire, panneaux photovoltaïques asservi, capteurs, microcontrôleur, commande, asservissement des moteurs.

Abstract :

The solar energy becomes currently an alternative energy of the oil energy the economic, climatic changes and the progressive demand of the energy in the social life. During the day, the sun moves continually, If the photovoltaic solar panel is fixed in a stationary position that doesn't change in this case the energy cannot be only at noon maximal. To get a maximal output of energy, the photovoltaic solar panel must be located precisely in front of the position of the sun during all day.

Then, it is necessary to fix it on a vertical support manipulated by a system of servitude that allows him to get the requisite position. The morning, the system starts while detecting the position of the sun and follows his position during the day. In the

evening, the hour fixed according to the month, permits the automatic return in initial position. After the return, the food of the order device is cut.

Key words : Energies renewable, solar tracker, solar follower, enslaved photovoltaic panels, sensors, microcontrôleur, command, servitude of the motors.

الملخصة

أصبحت الطاقة الشمسية في الوقت الحالي طاقة بديلة للطاقة البترولية، نظرًا للتغيرات الاقتصادية والمناخية، وكذلك الطلب المتزايد على الطاقة في الحياة الاجتماعية. وخلال اليوم، تتحرك الشمس باستمرار، فإذا تم تثبيت اللوح الشمسي الكهروضوئي في وضعية ثابتة لا تتغير، فإن الطاقة لن تكون في أقصى قيمها إلا وقت الظهيرة فقط.

وللحصول على أقصى مردود من الطاقة، يجب أن يكون اللوح الشمسي الكهروضوئي مواجهًا تمامًا لموضع الشمس طوال اليوم.

لذا، من الضروري تثبيته على حامل عمودي يتم تشغيله بواسطة نظام تحكم آلي (نظام تتبع)، يسمح له بالحصول على الوضعية المطلوبة. ففي الصباح، يبدأ النظام عمله برصد موضع الشمس ويتابع حركتها طوال اليوم. وفي المساء، يسمح التوقيت المضبوط حسب كل شهر بعودة اللوح تلقائيًا إلى وضعه الابتدائي.

الكلمات المفتاحية

طاقات جديدة , متتبع شمسي , متعقب شمسي , لوحة شمسي موجه , لاقط , متحكم مجهري .

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
CHAPITRE 01	
I. Introduction	4
II. L'énergie solaire	4
III. Le rayonnement solaire	4
<i>III.1. Rayonnement direct</i>	5
<i>III.2. Rayonnement diffus</i>	5
<i>III.3. Rayonnement solaire réfléchi</i>	6
<i>III.4. Rayonnement global</i>	6
IV. Systèmes photovoltaïques	6
<i>IV.1. Systèmes photovoltaïques avec stockage électrochimique</i>	8
IV.1.1. Systèmes PV autonomes	8
IV.1.2. Systèmes PV hybrides	8
<i>IV.2. Systèmes photovoltaïques au fil du soleil (couplage direct)</i>	9
<i>IV.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau</i>	10
<i>IV.3.1. Systèmes PV connecté au réseau (centrale)</i>	10
<i>IV.3.2. Systèmes PV inter changent l'énergie avec le réseau</i>	11
V. Les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	11
VI. Types de Technologie d'une cellule photovoltaïque	12
<i>VI.1. Cellules au silicium mono cristallin</i>	12
<i>VI.2. Cellule au silicium poly-cristallin</i>	12
<i>VI.3. Cellule au silicium amorphe</i>	13
VII. Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques	13
VIII. Composants de base d'un système photovoltaïque	14
<i>VIII.1. Générateur photovoltaïque</i>	14
<i>VIII.2. Régulateur solaire de charge et de contrôle</i>	14
<i>VIII.3. Batteries</i>	14
<i>VIII.4. Onduleur</i>	15
IX. Conclusion	15
CHAPITRE 02	
I. Introduction	17
II. Comparaison entre panneaux fixes et panneaux mobiles	17
III. Principes d'orientation solaire	20

IV. Les suiveurs solaires : avantages et inconvénients	23
I.1. Mécanisme d'orientation (système de positionnement)	25
V.3. Types de commande	25
VI. Étude d'un suiveur solaire spécifique	27
<i>Degrés de liberté de mouvement</i>	28
II. Description du suiveur solaire :	30
VII. Conclusion	32
<u>CHAPITRE 03</u>	
I. Introduction :	35
II. Instrumentation	35
II.1. Spécifications Techniques	35
II.2. Architecture Matérielle	36
II.3. Design Mécanique	40
II.4. Architecture Logicielle	42
❖ Logique de commande : algorithmes de suivi	42
❖ Code Arduino (langage C/C++)	43
III. Réalisation et Implémentation	43
III.1. Assemblage du Prototype.....	43
III.3. Développement du code	45
❖ Explication des fonctions clés	45
❖ Optimisations logicielles	46
❖ Explication du code :	49
❖ Objectif de la synchronisation :	52
❖ Validation de la synchronisation :	52
❖ Exemple de validation :	53
IV. Test et analyse des résultats	53
IV.1. Protocole de Test.....	53
IV.1.1. Méthodes de mesure de l'énergie produite.....	54
IV.2. Résultats expérimentaux	54
IV.3. Analyse des Données	62
IV.4. Évaluation du Système	62
IV.5. Synthèse des Résultats	63
IV.6. Applications potentielles :	63
V. Conclusion	64

VI.	<i>Conclusion Générale</i>	64
❖	<i>Propositions d'Améliorations</i>	65
❖	<i>Travaux Futurs</i>	65
❖	<i>Annexes</i>	65

Liste des figures & des tableaux

⇒ Les tableaux :

Tableau I-1 : Avantage et inconvénient de l'énergie photovoltaïques.....	11
Tableau I-2 : Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques.....	13

⇒ Les figures :

<i>Figure I-1</i> : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	5
<i>Figure I-2</i> : Le déférent type du rayonnement solaire.....	6
<i>Figure I-3</i> : Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général....	7
<i>Figure I-4</i> : Schéma synoptique d'un système PV autonome	8
<i>Figure I-5</i> : Schéma synoptique d'un système PV hybride.....	9
<i>Figure I-6</i> : Schéma synoptique d'un système PV au fil du soleil	10
<i>Figure I-7</i> : Cellule au Silicium Monocristallin.	12
<i>Figure I-8</i> : Cellule au Silicium Poly cristallin.	12
<i>Figure I-9</i> : Cellule au Silicium amorphe.....	13
<i>Figure II-1</i> :Un panneau photovoltaïque fixe (a) et avec système suiveur (b).....	19
<i>Figure II-2</i> :Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système fixe	20
<i>Figure II-3</i> : Les angles de l'inclinaison, de projection et de l'incidence.....	21
<i>Figure II-4</i> :Exemple et fonctionnement du suiveur passif [13].	25
<i>Figure II-5</i> :Commande en boucle ouverte d'un tracker PV.....	26
<i>Figure II-6</i> :Commande en boucle fermée d'un tracker [14]......	26
<i>Figure II-7</i> : Génération de trajectoire discontinue.....	27
<i>Figure II-8</i> : Traqueur à un seul axe avec angle d'inclinaison de Latitude.....	28
<i>Figure II-9</i> :Traqueur à deux axes avec angle d'inclinaison de Latitude.....	29
<i>Figure II-10</i> :Traqueur à deux axes Azimut/Élévation [5].....	30
<i>Figure II-11</i> : Description de suiveur solaire.	30
<i>Figure III-1</i> : Microcontrôleur (Arduino Uno)	37
<i>Figure III-2</i> : Capteur LDR.....	38
<i>Figure III-3</i> : Servomoteur.....	38
<i>Figure III-4</i> : Structure mécanique	39
<i>Figure III-5</i> : Schéma électrique et câblage.....	39

Figure III-6: Structure porte-panneau.....	41
Figure III-7: Montage mécanique.....	44
Figure III-8: Montage électrique (Simulation)	44
Figure III-9: la courbe de la puissance par jour.....	56
Figure III-10: Courbe d'irradiance solaire.....	57
Figure III-11: Température du panneau solaire	58
Figure III-12: Courbes I-V et P-V à midi	59
Figure III-13: Irradiance solaire avec effet des nuages	60
Figure III-14: courbe de production d'énergie – avec et sans suiveur.....	60
Figure III-15: diagramme de production énergétique – avec et sans suiveur	61

Abréviations

PV : Photovoltaïque

L : Longitude

δ : Déclinaison solaire

φ : Latitude

ω : Angle horaire.

Az : Angle Azimut

α : Angle d'altitude

θ_z : Angle de zénith

J : Date du jour

h : Hauteurs solaire

β : Angle d'inclinaison

LDR : light-dépendent résistor

SM1 : Servomoteur 1

SM2 : Servomoteur 2

HEX : Hexadécimal

IDE : interface logiciel Ardui

Introduction Générale

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique, le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'importation de sources d'énergies fossile (pétrole, gaz, charbon, ...etc.) ou en énergie d'origine thermonucléaire (Uranium, Plutonium,...), motivée par des considérations économiques. D'autres facteurs comme l'épuisement inévitable de ces sources, leur impact négatif sur l'environnement (les émissions de CO_2 , la catastrophe nucléaire de Tchernobyl,...etc.), et l'indépendance énergétique nationale n'ont pas été prise en compte.

Comme alternative à ces préoccupations, ont beaucoup stimulé la recherche et le développement de nouvelles sources dites renouvelables, sont potentiellement inépuisables, la nature peut les reconstituer assez rapidement telles que l'énergie hydraulique, éolienne, géothermique, biomasse ou notamment la plus ancienne le soleil. Actuellement, il existe deux voies d'utilisation de l'énergie solaire qui transforment le rayonnement en chaleur ou en électricité, respectivement le solaire thermique et le solaire photovoltaïque. Cette dernière basée sur l'effet photoélectrique, la conversion du rayonnement solaire en électricité par le biais des cellules photovoltaïques. Plusieurs cellules sont reliées entre elles pour former un module photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former un générateur photovoltaïque qui produise de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière [1].

La puissance électrique produite par un système photovoltaïque dépend de l'intensité du flux lumineux reçu sur la surface du module photovoltaïque selon la position du soleil qui varie le long de la journée. Dans la majorité des cas, le générateur photovoltaïque est fixé par rapport au sol et orienté vers le sud (implantation en hémisphère nord), l'énergie solaire incidente sur les modules n'est donc pas optimale en fonction de la variation du temps dans la journée et par rapport aux changements des saisons, son rendement énergétique n'est pas constant au cours de la journée, le mauvais positionnement du panneau, diminue le rendement de production électrique [2].

Afin de collecter le maximum d'énergie, l'optimisation par poursuite de la trajectoire du soleil est une technique qui permet de mieux exploiter les cellules

photovoltaïques et avoir un gain de 30% à 40% supérieure à celle qui est fixe (orientée plein sud et inclinée d'un angle égal à la latitude du lieu) [2].

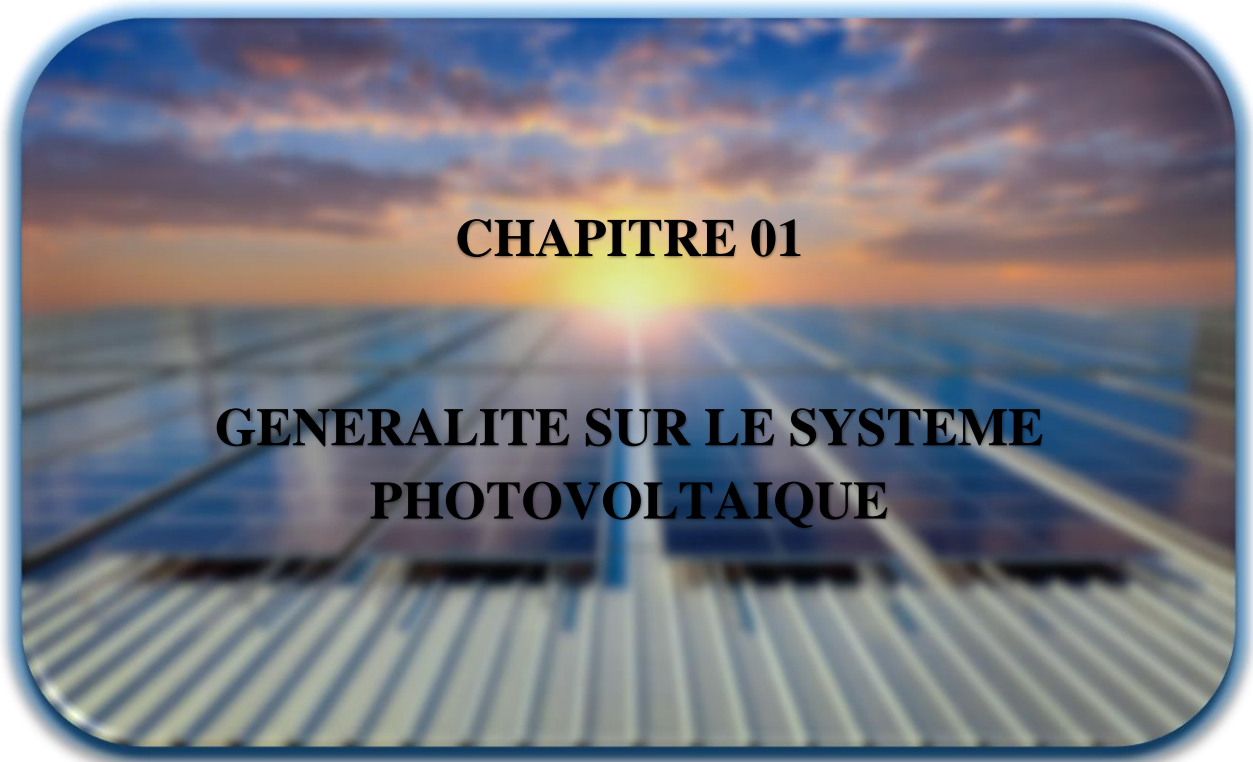
On utilise des dispositifs dits systèmes de poursuite solaires, ce dernier doit être ajusté de sorte qu'il soit toujours visé avec précision face au soleil, afin de maximiser l'ensoleillement en gardant la surface active du module photovoltaïque perpendiculaire aux radiations solaires [3].

On peut distinguer deux types de systèmes de poursuite solaire, les systèmes à un seul axe (Est-Ouest ou bien Nord-Sud) et les systèmes à deux axes (Est-Ouest et Nord-Sud), le premier type sont moins coûteux et leur commande est facile à mettre en oeuvre, par contre leur efficacité est inférieure à celle du deuxième type [4].

Les techniques de commande sont diverses, mais peuvent être subdivisées en deux catégories, les unes basées sur l'asservissement, des capteurs détectent en permanence la position du soleil, les autres sur la pré-programmation de la trajectoire du soleil, ce type basé sur le fait que le soleil suit une trajectoire relativement périodique pour un observateur situé à un endroit donné sur la terre [3].

Notre travail est consacré à la conception réalisation d'un suiveur solaire à deux axes à base de la carte Arduino UNO. Nous l'avons alors partagé en trois chapitres. Dans le premier nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Le deuxième chapitre est consacré au système de poursuite solaire où nous avons présenté une vue d'ensemble sur la géométrie solaire et la trajectoire du Soleil puis on a étudié les différents types des suiveurs et leurs méthodes de poursuite et vers la fin a description des composants électroniques, et nous présentons notre réalisation de suiveur solaire dans le chapitre trois.

On termine avec une conclusion regroupant les différents aspects étudié



I. Introduction

L'être humain a pu exploiter de nombreuses richesses terrestres tels que le pétrole, le gaz, le fer, l'or, mais n'a pu jusqu'à aujourd'hui exploiter l'énergie de la plus grande étoile de l'univers qui est le soleil. Cet énorme gisement émet une énergie de 175 milliards de kW/h.

Depuis les siècles derniers des recherches ont été entamées pour transformer les rayons solaires en énergie électrique de type continu directement utilisable. Cette opération est appelée la conversion photovoltaïque, elle a été découverte en 1839 par le physicien français Antoine Henri Becquer[5].

II. L'énergie solaire

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable et inépuisable qui convertit la lumière du soleil (le rayonnement) en électricité à l'aide de panneaux photovoltaïque, les systèmes photovoltaïque utilisent des cellules en silicium pour transformer la lumière solaire en courant électrique .

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1361 W/m², cette valeur est appelée la constante solaire. Et pour calculer l'énergie totale reçue par la terre[6] :

$$\text{Surface du disque} : \pi * R^2 \approx 1,28 * 10^{14} \text{ m}^2$$

$$\text{Énergie totale reçue} : 1361 \text{ W/m}^2 * 1,28 * 10^{14} \text{ m}^2 \approx 1,74 * 10^{17} \text{ W}$$

La consommation énergétique mondiale est d'environ 18 TW (en 2020, D'après l'agence internationale de l'énergie) et cette statistique est faible par rapport l'énergie reçue

III. Le rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 µm à 10 µm. La figure (I-8) représente la variation de la répartition spectrale énergétique[7].

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

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

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

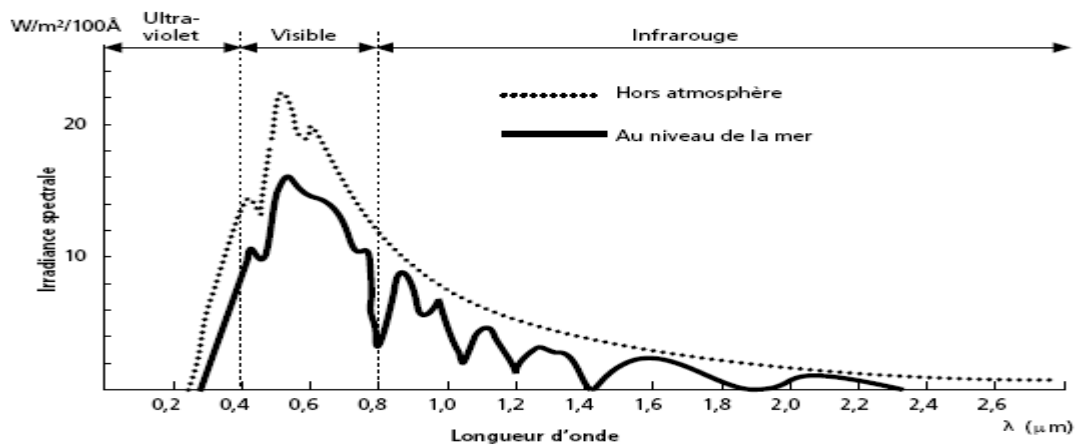


Figure I-1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

Il y a quatre types de rayonnement[8] :

III.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol.

Le pyréliomètre est l'instrument qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement direct. Il doit être muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le soleil.

III.2. Rayonnement diffus

Rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

III.3. Rayonnement solaire réfléchi

Le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

III.4. Rayonnement global

La somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point.

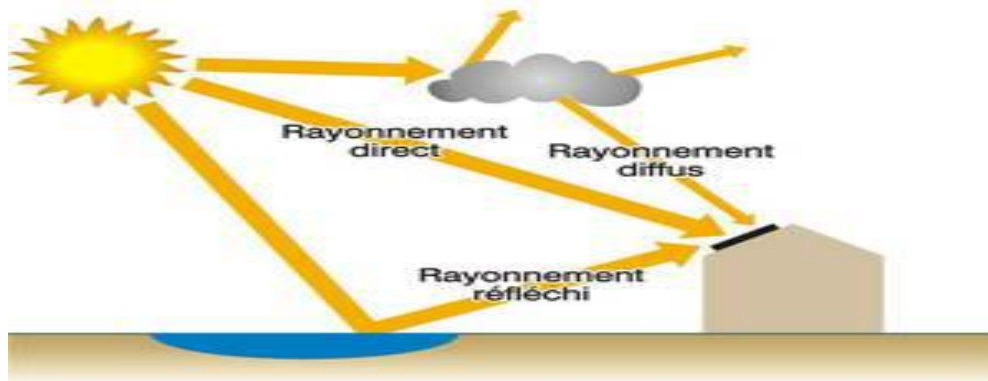


Figure I-2 : Le différent type du rayonnement solaire.

IV. Systèmes photovoltaïques

Le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait l'associer étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique. Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur précédemment décrit, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants :

- Un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),

- Une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- Un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- Un convertisseur DC/AC (Onduleur)
- Une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

La Figure (I-1) représente symboliquement les divers éléments du système le plus général. Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales.

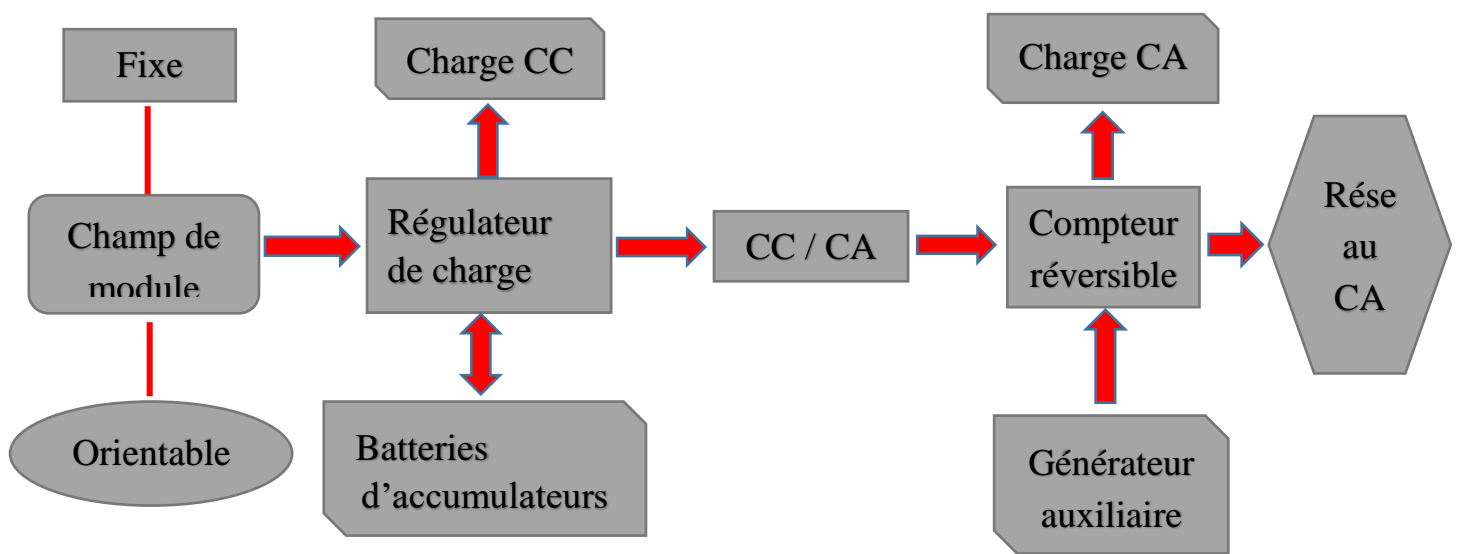


Figure I-3 : Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général

Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont de trois types :

1. Les systèmes PV avec stockage électrique (batterie d'accumulateurs électrochimiques).

Ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :

- Soit directement en courant continu.
- Soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu -alternatif (onduleur).

2. Les systèmes à couplage direct sans batterie (fonctionnement dit aussi « au fil du soleil »). Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu – continu (adaptateur d'impédance). Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique.

3. Les systèmes connectés au réseau local par l'intermédiaire d'un onduleur piloté à la fréquence du réseau, le réseau servant de stockage.

L'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge.

On recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

IV.1. Systèmes photovoltaïques avec stockage électrochimique (couplage indirect)

Deux configurations sont possibles :

IV.1.1. Systèmes PV autonomes

C'est la configuration la plus courante des systèmes PV, il se caractérise par leur capacité à couvrir la totalité de la demande énergétique. Dans la plupart des applications des systèmes autonomes la consommation se produit à des horaires distincts du soleil, ce qui nécessite un système de stockage adéquat. Ce même système doit assurer la fourniture énergétique durant les périodes climatiques les plus défavorables et dans la nuit.

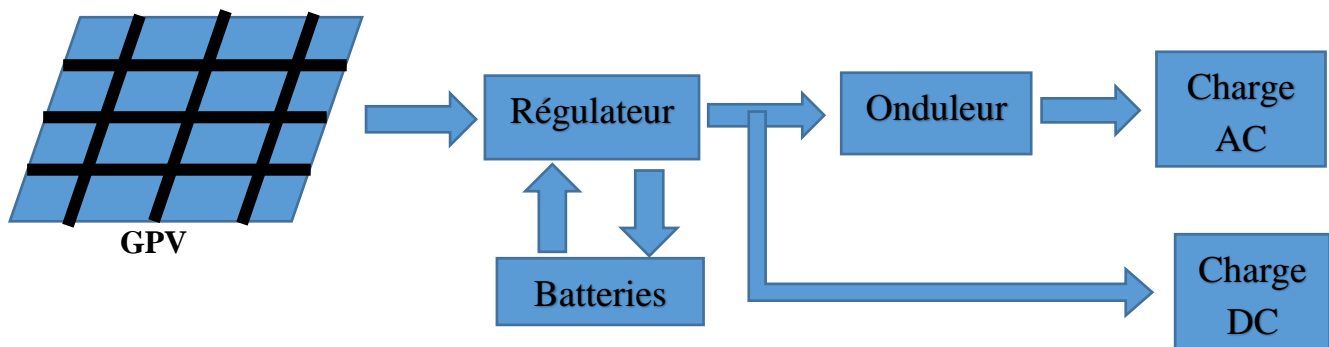


Figure I-4 : Schéma synoptique d'un système PV autonome

IV.1.2. Systèmes PV hybrides

Appelé aussi système PV autonome avec source auxiliaire, il se caractérise par l'adjonction d'une autre source auxiliaire de puissance qui peut être un générateur diesel ou essence ou un générateur à éolien ou encore PAC.

Normalement ces systèmes incluent des batteries de faible capacité que celle du système PV autonome. Sa fiabilité due à la disponibilité de plusieurs sources d'énergies peut être plus grande, l'inconvénient majeur est la complexité de système de régulation et contrôle.

La figure (I-3) représente un schéma synoptique des différents composants d'un système PV hybride.

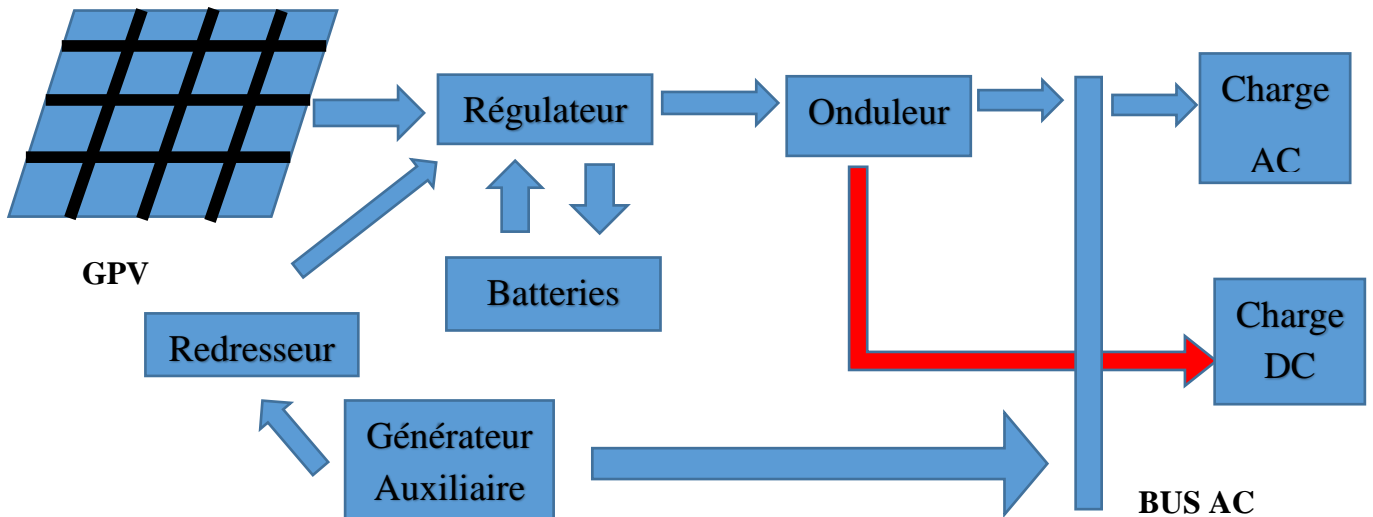


Figure I-5 : Schéma synoptique d'un système PV hybride

IV.2. Systèmes photovoltaïques au fil du soleil (couplage direct)

Ce sont les systèmes les plus simples, puisque l'énergie PV est utilisée directement à partir des modules PV, c'est-à-dire la charge est alimentée directement par le champ de panneaux "au fil du soleil". Les appareils utilisés ne fonctionnent pas qu'en l'absence de la lumière.

Exemple : le pompage PV au fil du soleil.

Il existe plusieurs cas importants pour lesquels le stockage sous forme d'énergie électrique n'est pas nécessaire :

- l'électrolyse de l'eau avec stockage sous forme d'hydrogène.
- le pompage de l'eau et on stockage dans des réservoirs.
- les réfrigérateurs et le stockage du froid sous forme de glace.
- le séchage des végétaux par ventilation, qui ne nécessite pas de stockage.

Comme il n'y a pas de batterie interposée pour fixer la tension de travail, c'est l'impédance de la charge qui fixe le point de fonctionnement. Il faut donc adapter du mieux qu'il est possible le groupement de modules à la charge. Nous allons considérer plus en détail certaines de ces adaptations d'impédance, en particulier celles qui se font de façon naturelle

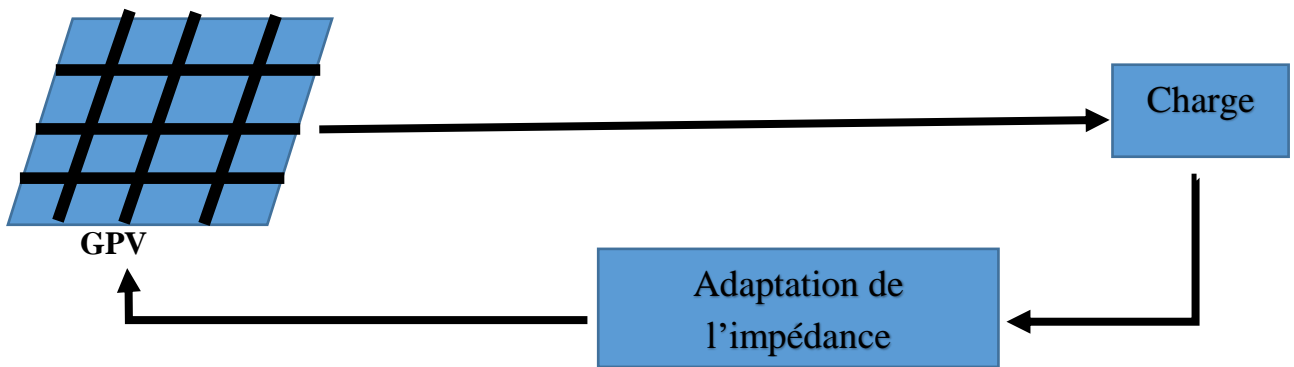


Figure I-6 : Schéma synoptique d'un système PV au fil du soleil

IV.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

N'incluent pas de batteries, la connexion entre le GPV et le réseau est obtenue à travers un onduleur (convertisseur DC/AC), cet onduleur doit être capable d'accepter les variations de tensions et de puissance propres aux modules PV, et travail de façon instantané au PPM, dépendant de la tension du réseau au point de connexion et pour des valeurs plus grandes que (220V – 380V), il est nécessaire d'utiliser des transformateurs avec les protections adéquats.

L'interconnexion au réseau de système PV peut s'effectuer grâce à deux types d'application :

IV.3.1. Systèmes PV connecté au réseau (centrale)

Ces systèmes injectent toute l'énergie électrique produite dans le réseau via de grands onduleurs. Le courant électrique continu, de tension variable, fourni par les panneaux solaires photovoltaïques est transformé par des onduleurs en courant alternatif de fréquence, tension et phase adaptées aux caractéristiques du réseau. Il est ensuite injecté dans le réseau électrique. La production d'une centrale photovoltaïque est cyclique et varie en fonction de l'intensité solaire et donc de l'heure du jour et de la saison. Ces centrales

comprennent généralement des traqueurs solaires automatiques pour orienter les panneaux solaires photovoltaïques face au soleil.

IV.3.2. Systèmes PV inter changent l'énergie avec le réseau

Ces systèmes sont destinés essentiellement à des consommateurs qui utilisent le réseau conventionnel à qui on ajoute le système PV, cette association de deux formes d'énergie permet soit de soustraire l'énergie de réseau (hachât), soit d'injecter dans le réseau (vente) via des compteurs bidirectionnels (réversible).

Déficit = utilisation du réseau.

Surplus = injection dans le réseau.

V. Les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit[9].

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Le photovoltaïque est une technologie sûre et sans risque. En général, les panneaux PV sont garantis 25 ans. - une haute fiabilité. - Ce système produit de l'électricité sur place ; il peut donc être installé là où on en a besoin, sans être raccordé à un quelconque réseau. - Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas des installations éoliennes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent. - Le photovoltaïque souffre d'une "pénurie" de silicium : l'accroissement de la demande ayant été sous-estimé, la production de cet élément chimique n'arrive pas à couvrir la demande actuelle des industries électroniques et solaires.

Tableau I-1: Avantage et inconvénient de l'énergie photovoltaïques.

VI. Types de Technologie d'une cellule photovoltaïque

Cette technologie est modulable, allant des petites installations que se soit domestique aux l'industrie, on peut stocké cette énergie dans des batterie (DC) et pour utilise cette énergie on a besoin des onduleurs.

Il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe [10].

VI.1. Cellules au silicium mono cristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales. Le terme «cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'ya aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes. Les cellules monocristallines offrent le meilleur rendement (jusqu'à 20 %).



Figure I-7: Cellule au Silicium Monocristallin.

VI.2. Cellule au silicium poly-cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 11 et 15%.

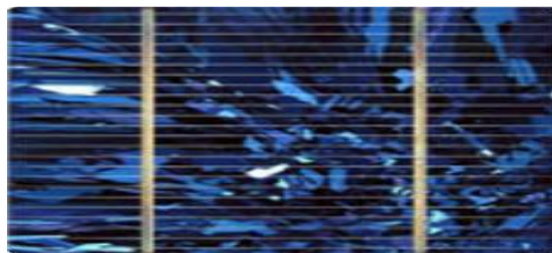


Figure I-8 : Cellule au Silicium Poly cristallin.

VI.3. Cellule au silicium amorphe

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 8%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière.



Figure I-9: Cellule au Silicium amorphe

VII. *Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques*

Le tableau (I.1) présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque[11].

Type	Silicium mono cristallin	Silicium poly cristallin	Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	<10 ans
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement en soleil direct. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Souplesse. • Prix moins élevé que le cristallin • Bon rendement en diffus.
Inconvénient	<ul style="list-style-type: none"> • Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...). • Prix élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...). • Prix élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mauvais rendement en pleine soleil.

Tableau I-2: Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques.

VIII. Composants de base d'un système photovoltaïque

Il y a quatre composants essentielles :

VIII.1. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est un groupement des cellules photovoltaïques en série et en parallèle. Donc l'élément de base d'un générateur photovoltaïque est la cellule solaire photovoltaïque.

VIII.2. Régulateur solaire de charge et de contrôle

Un régulateur de charge appelé aussi contrôleur de charge, est un système ou appareil électronique fonctionnant de façon complètement automatique auquel sont raccordés le générateur (modules PV) la batterie ainsi que d'éventuels équipements de l'installation.

Il a principalement sert avant tout à contrôler l'état de la batterie. Il existe plusieurs valeurs limites correspondant chacune à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc. Les nouvelles générations de régulateurs, quant à eux, sont de plus en plus perfectionnées et proposent des fonctionnalités plus nombreuses et de plus en plus évoluées.

Il intègre aussi la fonction MPPT, le contrôle et l'optimisation des paramètres de fonctionnement des composants de l'installation (générateur, batterie, etc.) via des mécanismes de type MPPT («Maximum Power Point Tracking» c'est-à-dire «Poursuite du point de puissance maximal»).

VIII.3. Batteries

Une batterie est constituée d'un ensemble de plaques de plomb interconnectées qui baignent dans un bain d'électrolyte (eau distillée + acide sulfurique). L'ensemble est contenu dans un bac plastique rigide[12].

Il existe différentes sortes de batteries, les alliages les plus utilisés sont :

- Plomb-calcium
- Plomb-antimoine (6%)
- Plomb-antimoine (<2%)
- Nickel- cadmium

Les batteries (au plomb) stationnaires à usage solaire se déchargent naturellement lorsqu'elles sont laissées en circuit ouvert c'est-à-dire au repos. Les facteurs qui augmentent l'autodécharge sont :

- La température qui double le taux d'autodécharge des batteries
- Le vieillissement de la batterie
- Le complément avec l'eau non déminéralisée contenant des impuretés
- Le mauvais entretien.

VIII.4. Onduleur

Un onduleur est convertisseur DC/AC permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables. Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion AC/DC est le même. La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système.

IX. Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs (le silicium, le Germanium, l'Arséniure des Galium,...). Afin de la rendre réalisable physiquement, elle nécessite un équipement complémentaire dit Système photovoltaïque, contenant les composants d'amélioration nécessaires qui rendent l'électricité produite consommable (régulation, conversion CC/AC...).

Dans ce chapitre on a donné une présentation des différents systèmes photovoltaïques et leurs composants, maintenant nous orientons notre travail dans le but d'améliorer la puissance obtenue par un panneau solaire photovoltaïque et ce, en lui appliquant une orientation suivant le mouvement apparent du soleil.



I. Introduction

La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend principalement de l'ensoleillement, et dans une moindre mesure, de la température des cellules. Ces deux paramètres, sujets à des variations journalières et saisonnières, influencent considérablement le rendement du système. Afin d'optimiser cette production, il est essentiel d'intégrer un dispositif de contrôle dans le circuit de commande, capable de faire fonctionner le panneau photovoltaïque à son point de puissance maximale.

Deux approches principales sont généralement utilisées pour ce suivi énergétique, souvent désigné sous le terme de "**tracking**" :

1. La méthode **MPPT (Maximum Power Point Tracking)**, qui repose sur des algorithmes permettant de localiser en temps réel le point de puissance maximale sur la courbe caractéristique du panneau.
2. Les **systèmes de poursuite solaire** (sun tracking systems), qui assurent l'orientation dynamique des panneaux tout au long de la journée. L'objectif est de maintenir la surface active des modules perpendiculaire aux rayons solaires, afin de maximiser l'ensoleillement reçu et, par conséquent, le rendement énergétique.

De nombreux travaux de recherche s'intéressent à ces systèmes de poursuite, reconnus pour leur efficacité dans l'amélioration de la performance des installations photovoltaïques.

II. Comparaison entre panneaux fixes et panneaux mobiles

L'exploitation de l'énergie solaire repose essentiellement sur la capacité des panneaux photovoltaïques à capter le rayonnement solaire de manière efficace. Cette efficacité dépend en grande partie de l'orientation des panneaux par rapport à la position du soleil. On distingue principalement deux configurations : les **panneaux fixes**, et les **panneaux mobiles ou à suivi solaire**.

1. Panneaux photovoltaïques fixes

Les panneaux fixes sont installés avec une inclinaison et une orientation déterminée une fois pour toutes, généralement optimisées pour l'ensoleillement moyen annuel d'une région. Cette configuration a l'avantage d'être **simple, robuste, peu coûteuse**, et **sans entretien mécanique particulier**. Elle est largement utilisée dans les installations domestiques, les fermes solaires de taille modérée ou dans les zones rurales.

Cependant, cette simplicité a un prix : **la perte de rendement**. En effet, la position du soleil varie tout au long de la journée (de l'est vers l'ouest), et aussi selon les saisons. Un panneau fixe ne peut donc capter le rayonnement solaire de manière optimale qu'à certaines heures ou périodes de l'année. Cela entraîne une **perte d'énergie significative**, estimée entre **20 % et 40 %**, selon l'emplacement géographique et l'angle d'installation.

2. Panneaux photovoltaïques mobiles (ou suiveurs solaires)

Les panneaux mobiles, également appelés **panneaux à suivi solaire**, sont montés sur un système mécanique permettant leur orientation automatique en fonction du déplacement du soleil. Cette technologie peut être **mono-axiale** (suivi est-ouest ou nord-sud) ou **bi-axiale** (suivi complet sur les deux axes).

L'objectif principal est de **maintenir les cellules photovoltaïques perpendiculaires aux rayons solaires pendant toute la durée d'ensoleillement**, ce qui permet de maximiser le rayonnement reçu et donc la production d'énergie. Selon les études, l'utilisation d'un système de suivi solaire peut améliorer le rendement de **25 % à 45 %** en moyenne par rapport à un système fixe.

3. Analyse comparative

Critère	Panneaux fixes	Panneaux mobiles
Coût d'installation	Faible	Élevé (mécanique + commande)
Maintenance	Très faible	Moyenne à élevée

Production énergétique	Variable, dépend de l'angle fixe	Optimisée toute la journée
Complexité	Simple (aucune motorisation)	Complexe (moteurs, capteurs, algorithmes)
Durée de vie	Longue (peu de pièces mobiles)	Potentiellement réduite (usure mécanique)
Utilisation typique	Résidentiel, petites installations	Fermes solaires, sites à fort potentiel

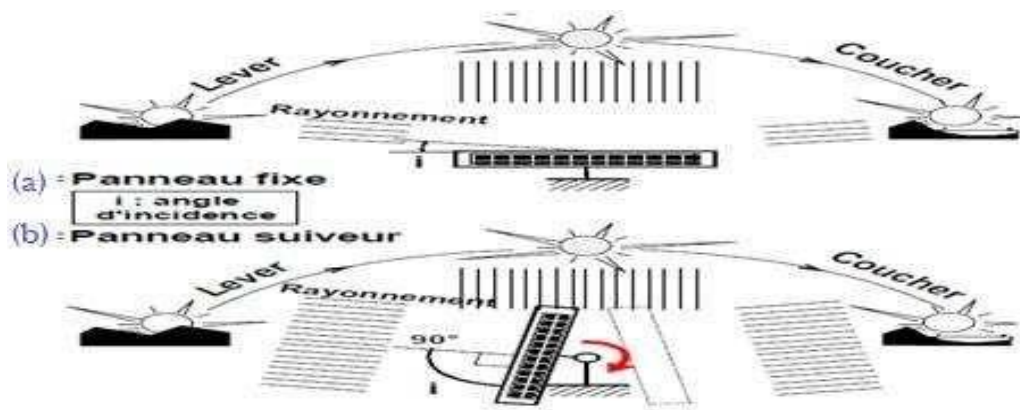


Figure II-1 :Un panneau photovoltaïque fixe (a) et avec système suiveur (b).

Le diagramme comparatif de production électrique (Figure III. 2) montre pour une journée ensoleillée d'été, le gain de production électrique obtenu en passant d'une installation fixe à une installation équipée.

Au cours d'une journée complètement ensoleillée, un système fixe de 1 kW bien orienté, produit 5,5 kWh d'énergie, alors que le même système avec suiveur, dans les mêmes conditions d'ensoleillement, produit 11 kWh d'énergie.

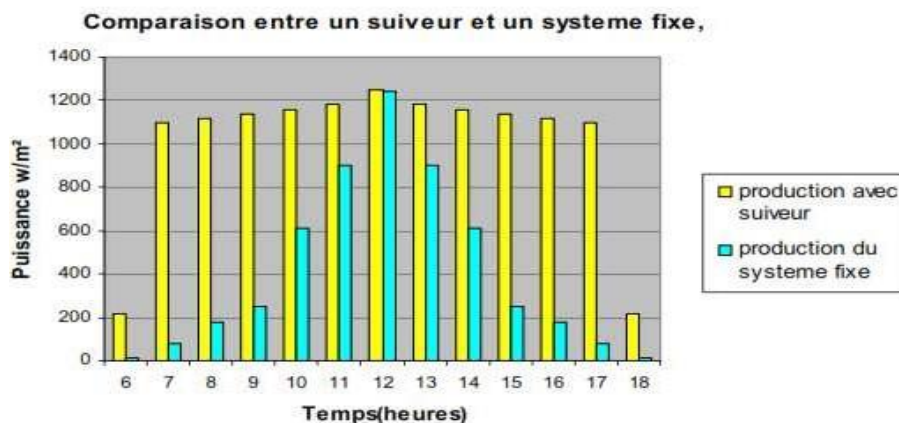


Figure II-2 :Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système fixe .

Le choix entre panneaux fixes et panneaux mobiles dépend des objectifs énergétiques, du budget disponible, et des contraintes techniques du site. Les panneaux fixes sont recommandés pour leur fiabilité et leur faible coût, tandis que les panneaux mobiles sont préférables lorsque l’optimisation de la production est prioritaire, en particulier dans les régions à fort ensoleillement.

III. Principes d’orientation solaire

L’orientation des panneaux solaires joue un rôle fondamental dans l’optimisation de la captation de l’énergie solaire. Le rendement d’un panneau photovoltaïque dépend étroitement de sa capacité à recevoir le rayonnement solaire de manière perpendiculaire. Pour cela, il est crucial de comprendre et de maîtriser les principes d’orientation solaire, à savoir : l’angle d’inclinaison et l’angle d’incidence.

III.1. L’angle d’inclinaison du panneau

L’angle d’inclinaison (ou angle de tilt) correspond à l’angle formé entre le plan du panneau photovoltaïque et l’horizontale. Cet angle a une influence directe sur la quantité de rayonnement solaire captée. Une mauvaise inclinaison peut entraîner une diminution significative du rendement.

La valeur optimale de cet angle dépend de plusieurs facteurs :

- **La latitude géographique** : en général, pour une installation fixe, l'angle d'inclinaison optimal est approximativement égal à la latitude du lieu.
- **La saison** : en hiver, un angle plus élevé est préférable pour capter les rayons solaires plus bas dans le ciel ; en été, un angle plus faible est plus adapté.
- **L'application visée** : pour une production annuelle maximale, un compromis est généralement adopté ; pour une production saisonnière spécifique (chauffage hivernal, par exemple), on ajuste l'angle en conséquence.

Dans les systèmes mobiles, cet angle peut être automatiquement ajusté pour s'adapter aux variations saisonnières, ce qui permet d'améliorer significativement la productivité énergétique. L'angle d'inclinaison Q (Figure II. 3) est l'angle entre le panneau et le plan horizontal, il vérifié la condition suivant: $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$

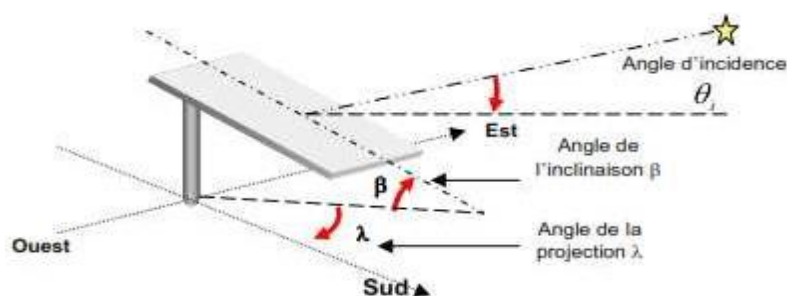


Figure II-3 : Les angles de l'inclinaison, de projection et de l'incidence.

III.2. L'angle d'incidence

L'angle d'incidence est défini comme l'angle entre les rayons du soleil et la normale (la perpendiculaire) à la surface du panneau. Plus cet angle est faible (idéalement proche de 0°), plus la densité d'énergie captée par le panneau est importante.

Lorsque l'angle d'incidence augmente (c'est-à-dire que les rayons du soleil frappent la surface de manière oblique), une partie du rayonnement est réfléchi et ne participe pas à la production d'électricité. La performance chute alors.

Quelques situations illustrant cet effet :

- **Incidence perpendiculaire (0°)** : rendement maximal.
- **Incidence oblique ($> 30^\circ$)** : pertes d'énergie importantes dues à la réflexion et à la réduction de l'intensité.
- **Incidence extrême ($> 60^\circ$)** : rendement très faible, voire nul en cas d'incidence rasante.

Dans ce contexte, les **systèmes de poursuite solaire** ont pour objectif de maintenir l'angle d'incidence aussi proche que possible de 0° , en ajustant en permanence l'orientation du panneau par rapport à la position du soleil.

III.3. Importance de l'orientation azimutale

Outre l'inclinaison, l'orientation azimutale (l'orientation horizontale du panneau) est un facteur clé. Dans l'hémisphère nord, l'orientation optimale est généralement vers le sud, tandis que dans l'hémisphère sud, elle est vers le nord. Toute déviation par rapport à cette orientation optimale réduit la durée pendant laquelle le panneau reçoit directement les rayons du soleil.

L'angle d'incidence θ_i (Figure II. 3) est l'angle qui se trouve entre le rayon du soleil et la normale de la surface du plan, il est donné par l'équation suivante :

$$(\theta_i) = \sin(\beta) \cos(h) \cos(\alpha - a) + \cos(\beta) \sin(h) \quad E. 28$$

Avec :

i: L'angle d'incidence.

β : L'inclinaison du plan récepteur

h: La hauteur du soleil

α : l'azimut du plan récepteur a: l'azimut solaire

λ : Angle de la projection horizontale de la normale au plan considéré avec N-S.

β : Angle de la normal au plan considéré avec le plan horizontal.

Le rendement en puissance solaire exploitée peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\eta = (\theta) * 100 \quad E. 29$$

La valeur de θ qui donne le meilleur rendement c'est $\theta = 90^\circ$.

La maîtrise des principes d'orientation solaire est essentielle pour maximiser la productivité énergétique d'un système photovoltaïque. Les systèmes de suivi solaire, qu'ils soient manuels ou automatisés, permettent d'ajuster l'inclinaison et l'orientation en temps réel afin de conserver un angle d'incidence optimal tout au long de la journée et de l'année.

IV. Les suiveurs solaires : avantages et inconvénients

Les suiveurs solaires, ou traqueurs solaires, sont des dispositifs mécaniques et électroniques conçus pour ajuster l'orientation des panneaux photovoltaïques en temps réel, afin de suivre la trajectoire apparente du soleil. Contrairement aux systèmes fixes, ces dispositifs permettent de maximiser l'exposition au rayonnement solaire durant toute la journée. Bien que leur efficacité énergétique soit indéniable, leur intégration présente à la fois des avantages significatifs et des inconvénients notables.

1. Avantages des suiveurs solaires

Le principal avantage des suiveurs réside dans leur capacité à augmenter considérablement la production énergétique. Selon le type de suivi utilisé (mono-axial ou bi-axial), un gain de production de 25 % à 40 % peut être observé par rapport à un système fixe de même surface. Cette amélioration est particulièrement précieuse dans les zones à fort ensoleillement ou sur des sites où l'espace disponible pour les panneaux est limité.

De plus, les suiveurs solaires permettent de rentabiliser des terrains difficilement exploitables par des systèmes fixes classiques, comme des espaces restreints ou inclinés. Ils offrent également plus de flexibilité dans les cas d'implantation complexes, notamment dans des environnements urbains ou des sites présentant des ombrages partiels à certaines heures.

2. Inconvénients des suiveurs solaires

Malgré leurs avantages, les suiveurs présentent plusieurs contraintes techniques, économiques et pratiques. Le premier inconvénient majeur est leur sensibilité au vent : en cas de vents forts (généralement supérieurs à 11–14 m/s), les traqueurs doivent automatiquement se replier pour éviter les dommages mécaniques, ce qui interrompt temporairement la production. Cela les rend moins adaptés à certaines régions ventées.

Par ailleurs, leur installation est plus coûteuse que celle des systèmes fixes, en raison de la présence de moteurs, capteurs, et d'un système de commande sophistiqué. Ces composants augmentent également la probabilité de pannes ou de dysfonctionnements, ce qui nécessite une maintenance plus régulière et parfois coûteuse.

D'un point de vue réglementaire et pratique, les suiveurs peuvent également poser des problèmes : leur taille imposante les rend encombrants, nécessitant des surfaces importantes pour permettre une rotation sans obstacle. Dans certaines zones, leur installation est soumise à des autorisations administratives, comme un permis communal, ce qui peut allonger et complexifier les délais de mise en œuvre.

En somme, les suiveurs solaires représentent une solution technologiquement avancée pour améliorer le rendement des installations photovoltaïques. Leur adoption doit toutefois être soigneusement évaluée en fonction du contexte environnemental, économique et réglementaire. Le choix entre un système fixe et un système à suivi dépendra des priorités énergétiques, du budget, de l'emplacement géographique et des contraintes techniques du site.

IV. Typologie des suiveurs solaires

Compte tenu des avantages considérables qu'offrent les suiveurs solaires en termes d'optimisation énergétique, et malgré certaines contraintes techniques, leur intégration dans les installations photovoltaïques suscite un intérêt croissant. Afin de mieux comprendre leur fonctionnement et d'identifier les solutions les plus adaptées aux différents contextes d'utilisation, il est essentiel de s'intéresser à leur classification. Les suiveurs solaires se déclinent en plusieurs types, selon leur mode de mouvement, leur système de commande ou encore leur degré de liberté. Cette typologie permet de distinguer les technologies disponibles et d'en évaluer la pertinence en fonction des besoins spécifiques du projet.

V.2. Mécanismes d'orientation (systèmes de positionnement)

La stratégie de commande d'un tracker consiste essentiellement à générer la trajectoire du tracker afin de poursuivre parfaitement le soleil dans le but de maximiser la production. En effet, l'asservissement des actionneurs des trackers est généralement considéré comme maîtrisé et n'est par conséquent pas abordé.

Cette stratégie de commande peut avoir d'autres objectifs et d'autres contraintes comme la minimisation de l'énergie consommée, l'adaptation aux variations des conditions météorologiques.

Les traqueurs solaires peuvent être divisés en deux types principaux selon le type de la commande et de la sensibilisation ou du système de positionnement qu'ils incorporent.

I.1. Mécanisme d'orientation (système de positionnement)

1- Les traqueurs passifs: en cas de mises en mouvement par des phénomènes physiques autonomes, emploient le rayonnement des soleils pour chauffer gaz qui déplace le traqueur à travers le ciel utilisé, ne nécessitant pas d'énergie électrique (Figure III.4)

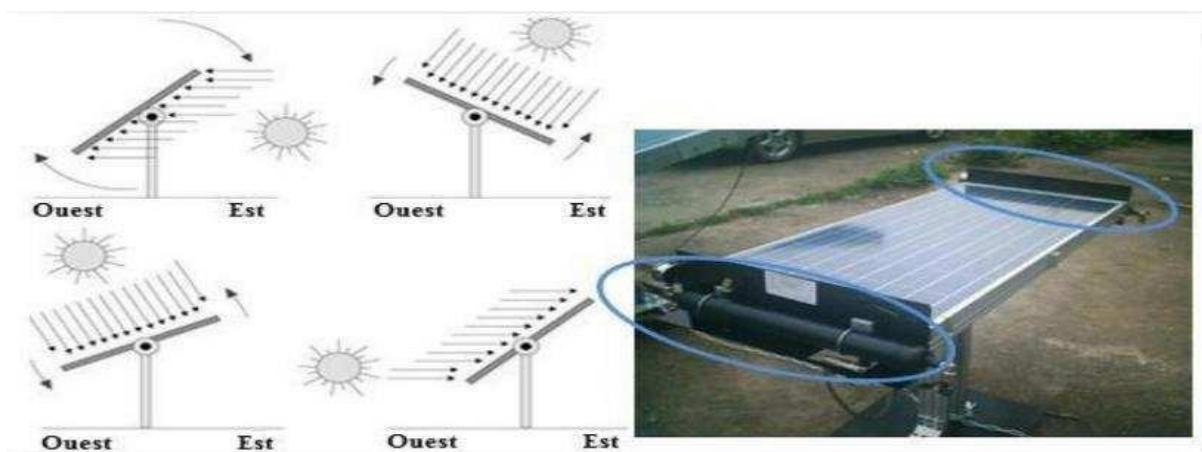


Figure II-4 :Exemple et fonctionnement du suiveur passif [13].

Les traqueurs actifs: en cas de mise en mouvement par des éléments électromécaniques, emploient les commandes électriques ou hydrauliques pour déplacer le traqueur.

V.3. Types de commande

Beaucoup de travaux ont été menés sur les stratégies de commande des trackers solaires dans le cas des modules PV ou CPV. Trois grandes catégories de stratégies se dégagent, le troisième, hybride, étant une combinaison des deux premières, dites stratégie en boucle ouverte et en boucle fermée .

Commande en boucle ouverte

La commande dite en boucle ouverte (Figure III.5) est une commande active de poursuite basée uniquement sur des calculs astronomiques de la position du soleil (calcul d'éphémérides), sans mesure de la position du soleil. En fait, il permet de générer les consignes de la trajectoire de poursuite du tracker (dans notre cas l'angle d'azimut et l'élévation) à partir de l'heure et des coordonnées GPS d'une centrale. Comme toute commande en boucle ouverte, elle est très sensible aux perturbations (absence de feedback) et aux erreurs de modélisation.

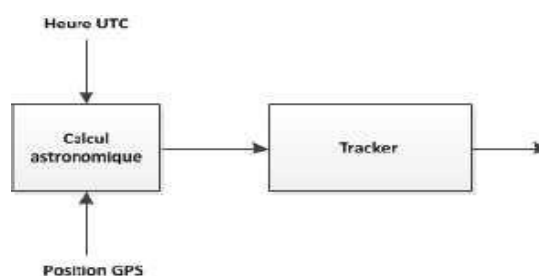


Figure II-5 :Commande en boucle ouverte d'un tracker PV.

Commande en boucle fermée

La commande en boucle fermée est une commande active qui se base sur une mesure de l'erreur de poursuite réelle pour contrôler les actionneurs du tracker. Cette mesure de l'erreur (Figure III.6) est fournie généralement par un capteur solaire, aussi appelé viseur solaire. Dans certains cas, le retour n'est pas une erreur de poursuite mais une puissance produite par le module

En effet, cette stratégie consiste à orienter les trackers suivant la position du tracker le mieux orienté, en partant de n'importe quelle position (position aléatoire).

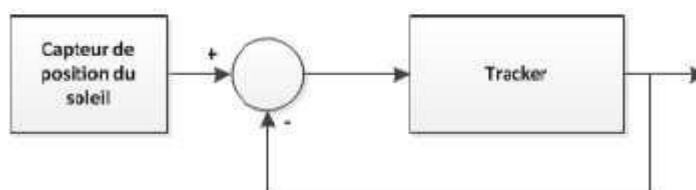


Figure II-6 :Commande en boucle fermée d'un tracker [14].

Commande hybride

La commande hybride est une commande de poursuite qui combine le calcul de la position de référence proposée par la « boucle ouverte », et la donnée de retour proposée par la commande à boucle fermée.

Commande tenant compte de la consommation

Les stratégies de commandes présentées précédemment ont un seul objectif qui est la maximisation de l'ensoleillement, et donc de la production, sans tenir compte de l'état de fonctionnement des actionneurs ni de leur consommation d'énergie.

Le principe de la commande, comme illustré par la figure III. 7, est le suivant : le tracker reste en arrêt jusqu'à ce que l'écart entre la position (théorique) du soleil et la position du tracker atteigne un certain seuil de tolérance ("Initial tolérance"). A ce moment, le tracker rattrape la position du soleil et prend de l'avance ("Final tolérance").

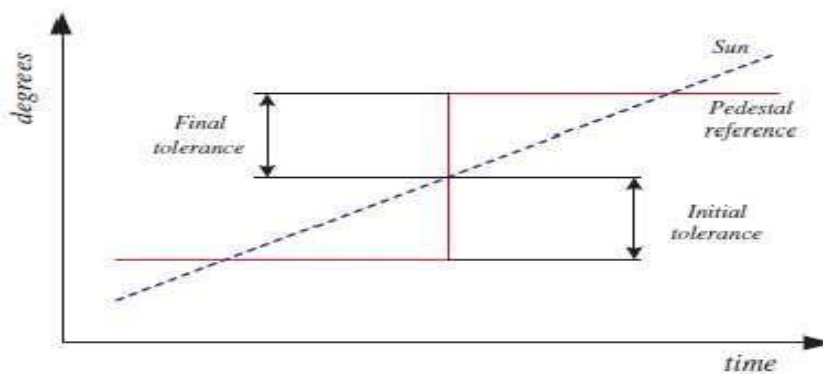


Figure II-7 : Génération de trajectoire discontinue.

VI. Étude d'un suiveur solaire spécifique

L'étude d'un suiveur solaire réel permet de mieux comprendre le fonctionnement global d'un système de suivi, depuis la détection de la position du soleil jusqu'au déplacement physique du panneau. Un suiveur solaire se compose généralement de deux grandes parties : une partie commande ou programmation, qui traite les données et prend les

décisions, et une partie opérative ou électronique, qui exécute les ordres mécaniquement à travers des actionneurs et capteurs.

VI.1. Partie commande ou programmation

La partie commande constitue le "cerveau" du système. Elle est généralement réalisée à l'aide d'un microcontrôleur ou d'un microprocesseur (comme un Arduino, PIC, STM32, ou Raspberry Pi), chargé de piloter les composants du suiveur solaire. Elle reçoit en entrée les données issues de capteurs (luminosité, position angulaire, tension, courant) et envoie des signaux de commande vers les actionneurs (moteurs, vérins).

Le programme embarqué dans le microcontrôleur applique un algorithme de suivi, qui peut être de différents types :

- **Suivi basé sur capteurs de lumière** : le système compare l'intensité lumineuse mesurée de part et d'autre du panneau et ajuste sa position jusqu'à équilibre.
- **Suivi astronomique** : le mouvement est calculé selon des données prédéfinies en fonction de la date, de l'heure et de la localisation géographique.
- **Algorithme hybride** : combinant les deux approches pour une précision renforcée.

L'algorithme contrôle également la gestion des conditions exceptionnelles (vent fort, nuit, détection d'erreur) et l'optimisation énergétique (mise en veille, repositionnement au lever du soleil, etc.).

Degrés de liberté de mouvement

Traqueurs Mono axiaux : Suiveur Mono-axiaux disposent d'un seul degré de liberté et tournent autour d'un seul axe. Le plan de ce type de traqueur est incliné à un angle de latitude de lieu dirigé en plein sud et l'angle de suivi égal à l'angle horaire (Figure III. 8).

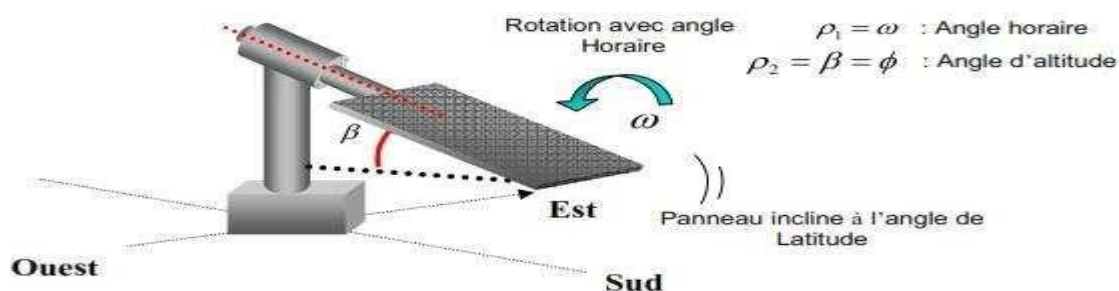


Figure II-8 : Traqueur à un seul axe avec angle d'inclinaison de Latitude.

Traqueurs Bi axiaux : Ils disposent de deux degrés de liberté grâce auxquels l'axe perpendiculaire aux panneaux photovoltaïques est aligné parfaitement et en temps réel avec les rayons du soleil, au détriment en revanche d'une plus grande complexité de construction.

- **Traqueur équatorial**

Dans ce type de traqueur, le panneau est incliné par l'angle local (latitude), et l'angle de suivi ρ_1 de cet axe tourne avec un angle égal à l'angle horaire ω (Figure III. 9).

L'angle de suivi ρ_2 du deuxième axe tourne avec un angle égal à l'angle de $\rho_2 = \varphi - \delta$. La variation horaire de l'angle de déclinaison est considérée très lente ; par conséquent l'orientation de ce dernier peut être ajustée une ou plusieurs fois par saison.

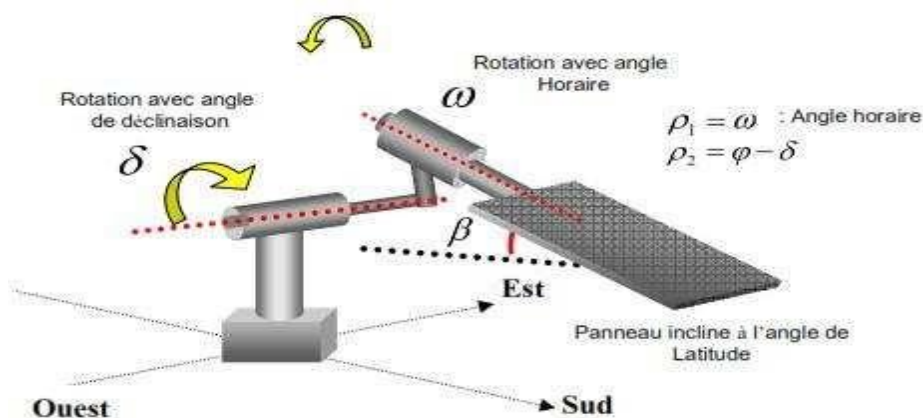


Figure II-9 : Traqueur à deux axes avec angle d'inclinaison de Latitude.

- **Traqueur azimut/élévation**

L'idée consiste à la rotation de l'axe autour de zénith avec un angle de rotation égal à l'angle d'azimut, tandis que l'autre axe est parallèle à la surface de la Terre et tourne avec un angle de rotation égale à l'angle d'altitude (Figure III.10).

Les traqueurs d'altitude/azimut emploient des données ou des algorithmes astronomiques de position du soleil pour déterminer la position du soleil pendant n'importe quelles heures et endroits donnés. Le lieu, la date et le temps de traqueur sont saisis par un contrôleur pour fixer la position du soleil.

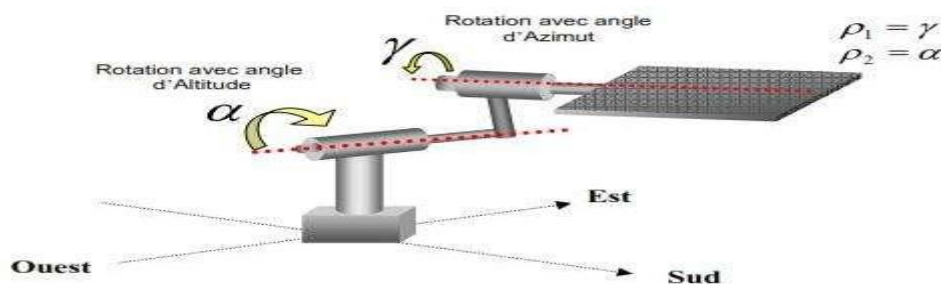
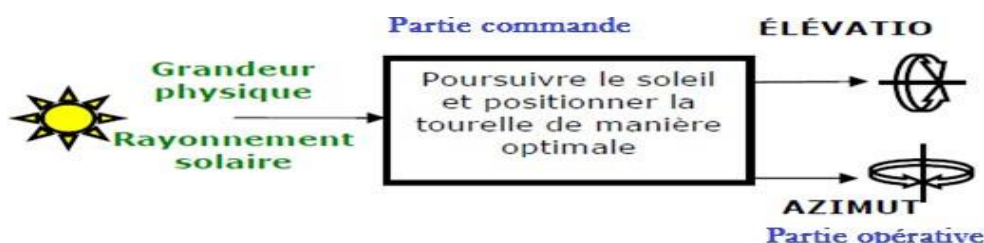


Figure II-10 :Traqueur à deux axes Azimut/Élévation [5].

L'avantage principal de ce système est que la position du soleil peut être déterminée indépendamment de la couverture de nuage. En outre, des variations saisonnières de la position du soleil sont prises en considération.

II. Description du suiveur solaire :



Le système de poursuite se compose essentiellement de deux parties (Figure III. 11) :

Figure II-11 : Description de suiveur solaire.

- **La partie commande ou programmation**

Cette partie apte à traiter les informations de position du soleil et les transmettent aux actionneurs pour effectuer la poursuite du soleil, détecter les anomalies de fonctionnement et effectuer les opérations de mise en sécurité de l'équipement.

Il assure, aussi, d'autres fonctions, dont :

- ✓ Le contrôle des mouvements mécaniques du système en limitant les angles de rotation à partir des fins de courses (0° à 200° sur l'horizontal et 0° à 90° sur la verticale) ;
- ✓ L'orientation du panneau en fin de journée vers la position de départ ou de démarrage du système.

- **Partie opérative ou électronique**

La partie opérative est l'ensemble des composants qui interagissent physiquement avec l'environnement et exécutent les ordres de la partie commande. Elle se compose principalement de :

- **Capteurs** : photorésistances (LDR), capteurs d'ensoleillement, accéléromètres ou capteurs de position angulaire (potentiomètres, encodeurs).
- **Actionneurs** : moteurs à courant continu (DC), moteurs pas-à-pas, ou vérins électriques, utilisés pour faire pivoter le panneau selon l'angle calculé.
- **Circuits de puissance** : ponts en H, relais, MOSFETs, alimentations régulées, qui permettent de faire fonctionner les moteurs en toute sécurité.
- **Interface de communication ou de supervision** : elle peut inclure un affichage LCD, des LED de diagnostic, ou une communication sans fil (Bluetooth, Wi-Fi) pour le contrôle à distance.

Cette partie repose sur des systèmes qui permettent la réception des ordres envoyés par le calculateur, leur conversion en signaux électriques et leur transmission au système mécanique articulé, ainsi que l'activation du monte (vérin). Cette opération assure que le rayonnement solaire soit toujours perpendiculaire au panneau

L'expression de l'angle incidence est :

$$\cos i = \vec{n} \cdot \vec{S}$$

On trouve :

$$\cos i = \sin \varphi \sin \delta \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \alpha + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \alpha$$

$$\cos \beta \cos \omega + \cos \varphi \sin \alpha \sin \omega$$

cas particulier

- Capteur orienté plein sud ($\alpha = 0$) :

$$\cos i = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \omega \cos \delta \cos(\varphi - \beta)$$

- Pour un captage annuel de type ($\beta = \varphi$)

$$\cos i = \cos \omega \cos \delta$$

- Pour une incidence parfaite (cas d'un système de poursuite du soleil)

$$i = 0.$$

L'intégration soignée de ces éléments est essentielle pour garantir la réactivité, la stabilité, et la fiabilité du système. Une bonne coordination entre la partie commande et la partie opérative assure un fonctionnement optimal, même dans des conditions climatiques variables.

VII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en détail le concept de suivi solaire appliqué aux systèmes photovoltaïques, en mettant en évidence ses principes fondamentaux, ses avantages, ses limites ainsi que les différentes technologies disponibles. Nous avons tout d'abord souligné l'importance cruciale de l'orientation et de l'inclinaison dans la performance des panneaux solaires, notamment à travers l'analyse de l'angle d'incidence et de l'angle d'inclinaison, qui conditionnent directement le rendement énergétique.

Ensuite, une comparaison entre les systèmes fixes et mobiles a permis de constater que les suiveurs solaires offrent une amélioration significative de la production d'énergie, bien qu'ils impliquent des coûts, une complexité mécanique et des contraintes d'installation plus élevés. Cette réflexion nous a conduits à identifier les différents types de suiveurs, selon le degré de liberté (mono-axial ou bi-axial), le mode de commande (boucle ouverte, fermée, hybride), ainsi que la technologie de positionnement utilisée.

Enfin, l'étude d'un cas concret de suiveur solaire a permis de mieux comprendre l'architecture fonctionnelle de ces systèmes. Elle a mis en évidence la collaboration entre la partie commande, où sont exécutés les algorithmes de suivi, et la partie opérative, composée des capteurs, moteurs et circuits électroniques nécessaires à l'ajustement physique du panneau.

Ce chapitre met donc en lumière l'intérêt stratégique du suivi solaire dans les installations photovoltaïques modernes, tout en soulignant la nécessité d'un

dimensionnement adapté et d'une évaluation technico-économique rigoureuse pour garantir son efficacité.



CHAPITRE 03

**Conception , Réalisation et Implémentation du
Système**

I. Introduction :

Dans un contexte mondial marqué par la transition énergétique et la recherche de solutions durables, l'énergie solaire s'impose comme l'une des alternatives les plus prometteuses aux sources d'énergie traditionnelles. Les panneaux solaires photovoltaïques, capables de convertir l'énergie lumineuse en électricité, représentent une technologie clé dans ce domaine. Toutefois, leur rendement reste fortement dépendant de l'orientation par rapport au soleil.

Afin d'optimiser la production énergétique, il devient essentiel de mettre en œuvre des systèmes de suivi solaire capables d'orienter automatiquement les panneaux en fonction de la position du soleil tout au long de la journée. Le projet présenté ici s'inscrit dans cette démarche d'optimisation. Il vise à concevoir, réaliser et implémenter un système intelligent de suivi du soleil, permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des panneaux photovoltaïques.

Ce chapitre aborde les différentes étapes de la réalisation pratique du projet, la conception théorique étant été discutée dans les chapitres précédents, pour une éventuelle implémentation technique du système. L'objectif est de proposer une solution à la fois fiable, automatisée et énergétiquement efficiente, adaptée aux besoins actuels en matière d'énergie renouvelable

II. Instrumentation

Dans cette section, nous présentons les choix techniques et matériels retenus pour la conception du système de suivi solaire. L'objectif est de garantir un système fiable, précis, à faible consommation, et accessible en termes de coût, tout en assurant une bonne durabilité dans le temps.

A. Spécifications Techniques

Pour concevoir un système efficace, plusieurs critères techniques ont été pris en compte :

- **Précision :**

Le système doit être capable de détecter la position du soleil avec une erreur angulaire minimale afin d'assurer un alignement optimal du panneau solaire. L'utilisation de capteurs LDR avec comparaison de leur intensité permet une précision suffisante pour une application amateur ou semi-professionnelle.

- **Coût :**

Le choix des composants a été orienté vers des solutions économiques, facilement disponibles sur le marché, comme l'Arduino Uno/Nano, les LDR, et les servomoteurs standards.

- **Consommation électrique :**

Le système étant destiné à fonctionner de manière autonome, la consommation d'énergie doit rester faible. Le choix de composants basse consommation (microcontrôleur Arduino, servomoteurs à usage intermittent) permet de limiter la demande énergétique.

- **Durabilité :**

Les composants doivent résister aux conditions extérieures (chaleur, humidité, poussière). Le boîtier de protection et l'utilisation de matériaux robustes pour la structure contribuent à la longévité du système.

B. Architecture Matérielle

L'architecture matérielle du système repose sur une combinaison cohérente de capteurs, de commande et d'actionneurs. Voici les principaux éléments :

❖ Composants Principaux

- **Microcontrôleur :** dans notre cas nous avons opter pour un microcontrôleur de type (*Arduino Uno*), c'est la pièce maitresse du système, il permet entre-autre la lecture des capteurs et le contrôle des moteurs, c'est ici que l'on charge notre code,

Propriété	Détails
Microcontrôleur	ATmega328P
Tension de fonctionnement	5 V
Tension d'entrée recommandée	7 – 12 V

Tension d'entrée limite	6 – 20 V
Broches d'E/S numériques	14 (dont 6 avec sortie PWM)
Entrées analogiques	6 (A0 à A5)
Courant max par broche E/S	20 mA
Courant max pour la sortie 3.3V	50 mA
Mémoire Flash	32 Ko
SRAM	2 Ko
EEPROM	1 Ko
Fréquence d'horloge	16 MHz
Port USB	Type B ou Micro-USB
Bouton de réinitialisation (Reset)	Oui

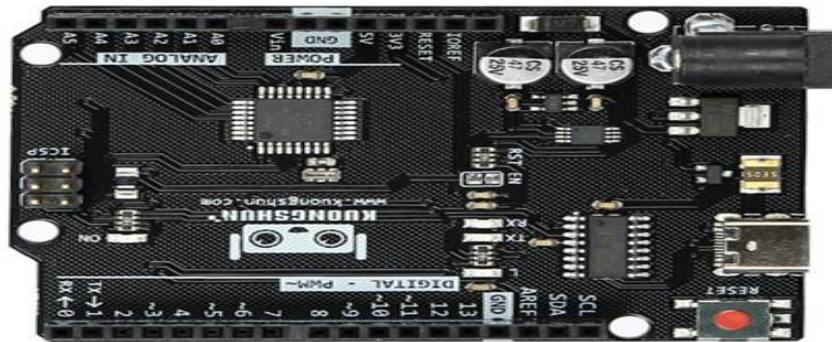


Figure III-1: Microcontrôleur (Arduino Uno)

- **Capteurs** : les principaux capteurs dans notre étude sont des capteurs de type (photorésistant) *LDR*, ils sont en nombre de quatre 4 , disposés dans un montage en croix , jouant sur l'ombre et la lumière, la disposition de ces capteur permet d'optimiser l'orientation du panneau perpendiculairement sur le soleil.

Propriété	Détail
Nom complet	Light Dependent Resistor
Type	Capteur analogique passif
Symbole électronique	![symbole] inclus à gauche dans l'image
Tension de fonctionnement	3,3 V à 5 V (selon le montage)
Gamme de résistance	- Haute résistance ($> 1 \text{ M}\Omega$) dans l'obscurité



Figure III-2: Capteur LDR

- **Actionneurs** : ce sont des moteur de type pas à pas au nombre de deux 2 appeler communiaient *servomoteurs* (pour suivi uniaxial) choisis selon leurs puissance et portance et assurant le mouvement du panneau.

Propriété	Détail
Modèle	SG90 Micro Servo
Tension de fonctionnement	4.8 V – 6 V
Couple (torque)	- 1.8 kg·cm à 4.8 V



Figure III-3: Servomoteur

- **Alimentation** : Batterie 12V ou source externe stabilisée. Un régulateur 5V (ex. LM7805) est utilisé pour alimenter le microcontrôleur.
- **Boîtier** : En plastique ou métal, résistant aux intempéries, pour protéger les composants électroniques.
- **Structure mécanique** : le Support mobile est la partie la plus importante de notre étude, car c'est lui qui va nous donner une idée sur l'emplacement des moteur le mode de tracking, l'emplacement des capteurs ainsi que de leurs dispositifs, et bien

sûr l’organigramme pour le développement du code arduino, la structure assurant l’inclinaison du panneau solaire selon un ou deux axes change tout la suite du projet.

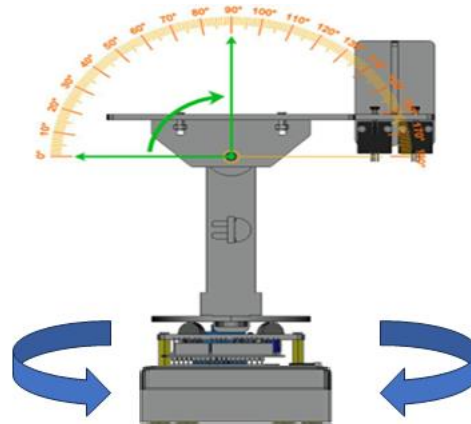


Figure III-4: Structure mécanique

❖ Schéma Électrique et Câblage

Le système est câblé selon le schéma suivant :

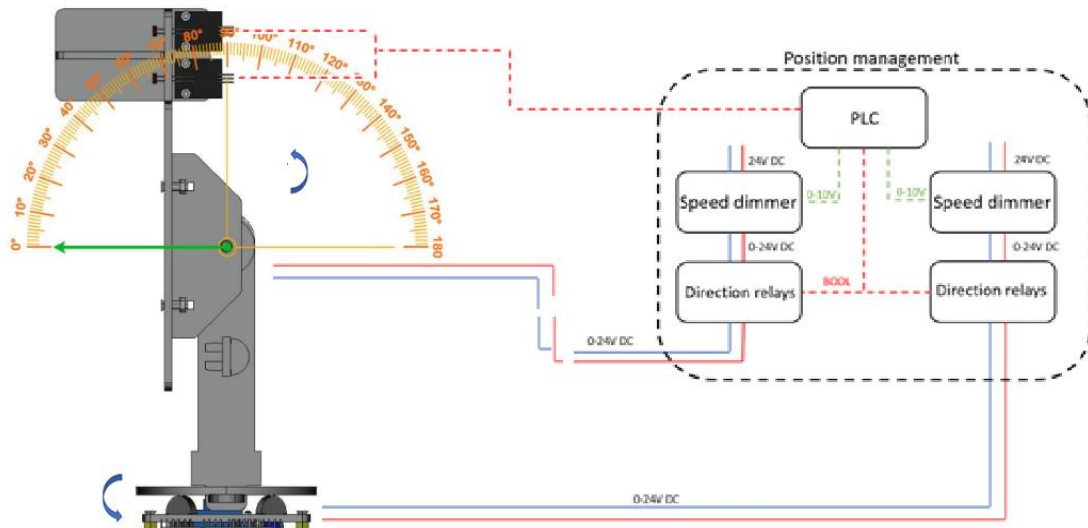


Figure III-5: Schéma électrique et câblage

- Les 4 LDR sont reliés à des résistances en série (pont diviseur) et connectés aux entrées analogiques de l'Arduino.
- Les servomoteurs sont connectés aux sorties numériques PWM de l'Arduino.
- L'alimentation principale (batterie ou adaptateur) alimente le système via un régulateur de tension.
- Ajout d'un écran LCD pour surveiller l'état du système

***I.1.* Design Mécanique**

Le design mécanique constitue une étape essentielle dans la mise en œuvre d'un système de suivi solaire, car il détermine la stabilité, la précision du mouvement, ainsi que la durabilité de l'installation dans des conditions extérieures.

❖ Structure porte-panneau

Le système mécanique est constitué d'une structure qui supporte le panneau solaire et lui permet de se déplacer dans deux directions (horizontale et verticale). Les éléments principaux de cette structure sont :

- **Bras :**

Les bras sont des éléments mécaniques qui assurent la liaison entre le panneau solaire et les moteurs. Leur rôle principal est de **transmettre le mouvement généré par les moteurs** au panneau afin de permettre son orientation vers le soleil.

Ils doivent être **suffisamment solides** pour supporter le poids du panneau solaire et résister aux conditions environnementales (vent, pluie, etc.), tout en restant **légers** pour **ne pas surcharger les moteurs**. Un excès de poids pourrait entraîner une usure prématurée des moteurs ou une consommation d'énergie plus élevée

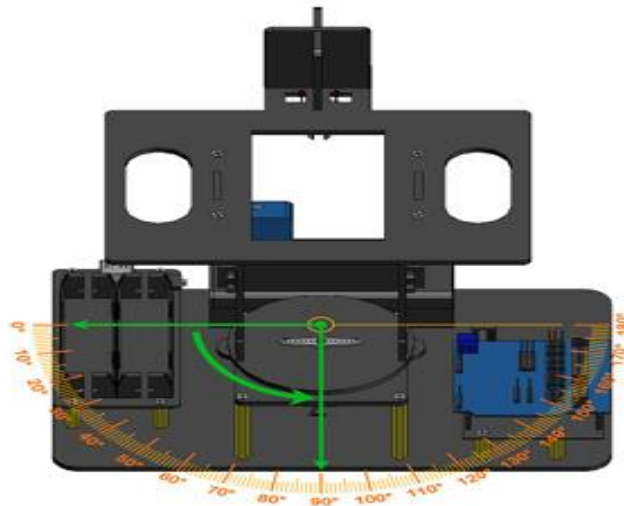


Figure III-6: Structure porte-panneau

Roulements (paliers) :

Les roulements jouent un rôle crucial dans le système de suivi solaire. Ils sont installés aux axes de pivotement de la structure (notamment entre la base fixe et les bras mobiles) et permettent une rotation fluide du panneau solaire avec un minimum de friction.

Grâce à leur utilisation, le mouvement devient plus précis, stable et moins énergivore, ce qui permet de réduire l'usure des moteurs et d'améliorer l'efficacité globale du système. Leur choix dépend de plusieurs critères : capacité de charge, matériau, résistance à la corrosion, et coût.

- **Matériaux :**

Le choix des matériaux est crucial pour garantir la solidité et la résistance aux intempéries. Les matériaux couramment utilisés incluent :

- *Aluminium* : léger, résistant à la corrosion.
- *Acier galvanisé* : très résistant pour les structures fixes.
- *Plastique renforcé* : utilisé dans certains composants secondaires ou boîtiers de protection.

Dimensionnement des pièces

Le dimensionnement correct des composants mécaniques permet de garantir la fiabilité du système. Il tient compte des éléments suivants :

- **Dimensions du panneau solaire** : pour adapter la structure à sa taille et son poids.
- **Charges mécaniques** : notamment le poids du panneau, la force du vent et le couple nécessaire au mouvement.
- **Amplitude de mouvement** : la conception doit permettre une rotation suffisante, typiquement jusqu'à 180° à l'horizontale et environ 90° à la verticale.
- **Stabilité** : la base doit être suffisamment large et lourde pour empêcher tout basculement du système.

1.2. Architecture Logicielle

L'architecture logicielle joue un rôle fondamental dans le fonctionnement précis et autonome du système de suivi solaire. Elle repose sur un ensemble d'algorithmes de contrôle, associés à un code embarqué exécuté par une carte Arduino.

❖ Logique de commande : algorithmes de suivi

Le système utilise des capteurs de lumière (LDR) pour détecter l'intensité lumineuse provenant de différentes directions. L'algorithme compare les valeurs mesurées afin de déterminer la position optimale du panneau solaire. Deux méthodes peuvent être appliquées :

- **Suivi actif (Active Tracking)** : basé sur la lecture en temps réel des capteurs pour ajuster l'orientation.
- **Boucle de contrôle** : permet de déplacer les moteurs de façon incrémentale jusqu'à atteindre un équilibre lumineux entre les capteurs opposés.

Dans notre cas précis nous avons opter pour le suivi actif (Active Tracking) : car l'énergie dépenser dans le tracking est négligeable, et aussi nos capteurs sont de type ultra réactif, adéquat à ce type de suivi.

Le système peut également inclure une condition de seuil pour éviter les mouvements inutiles lorsque la variation de lumière est minime, dans notre conception, les conditions de seuil sont essentiellement régies par la structure et le câblage, afin d'éviter toute cassure ou coupure de câble.

❖ *Code Arduino (langage C/C++)*

Le programme embarqué, écrit en langage C/C++ dans l'environnement Arduino IDE, assure :

- **Lecture des capteurs** : acquisition des valeurs analogiques des LDR.
- **Traitement des données** : comparaison des lectures pour identifier la direction dominante de la lumière.
- **Contrôle des moteurs** : commande des servomoteurs pour ajuster l'orientation du panneau.
- **Boucle de contrôle (loop)** : répétition continue du processus pour assurer un ajustement dynamique et autonome du système.

Le code peut également intégrer un écran LCD pour afficher des informations comme l'état du système ou la position actuelle.

II. Réalisation et Implémentation

a) *Assemblage du Prototype*

L'assemblage du prototype représente l'étape de concrétisation du système, où les composants mécaniques et électroniques sont intégrés pour former un ensemble fonctionnel.

Étapes mécaniques et électroniques

1. **Montage mécanique** :

- Installation de la structure porte-panneau (châssis, bras, roulements).
- Fixation du panneau solaire sur l'axe mobile.
- Intégration des servomoteurs pour les mouvements horizontal et vertical.
- Vérification de la stabilité de la base.

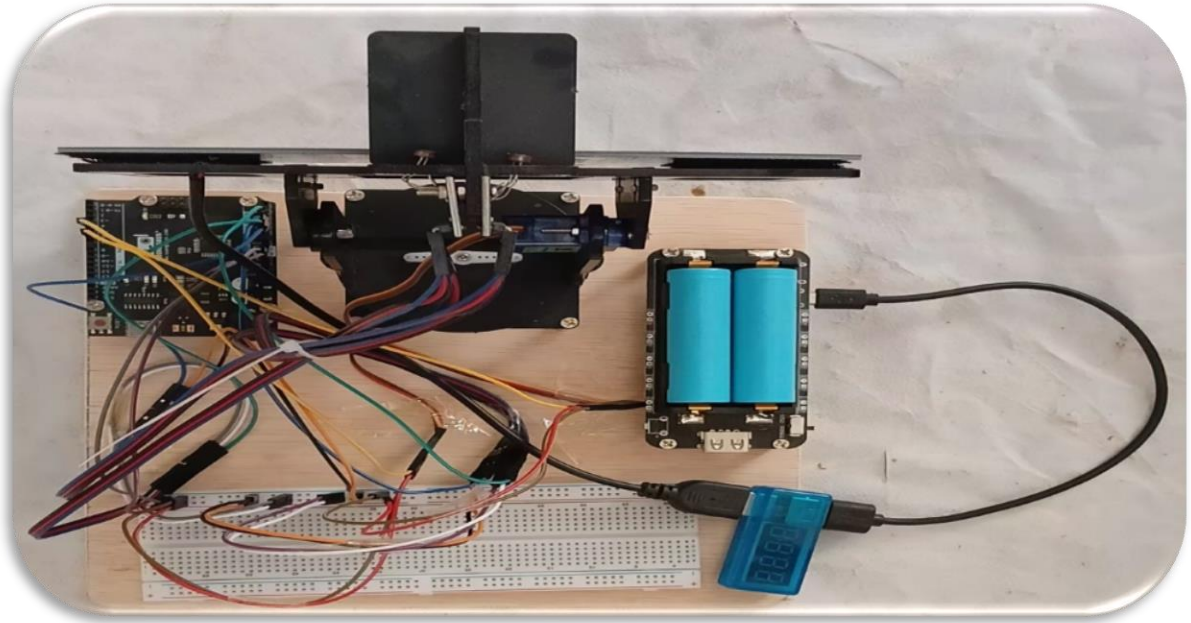


Figure III-7: Montage mécanique

2. Montage électronique :

- Connexion des capteurs LDR à la carte Arduino.
- Câblage des servomoteurs aux broches de sortie PWM.
- Alimentation de l'ensemble via une source stable (batterie).
- On peut également ajouter un écran LCD.

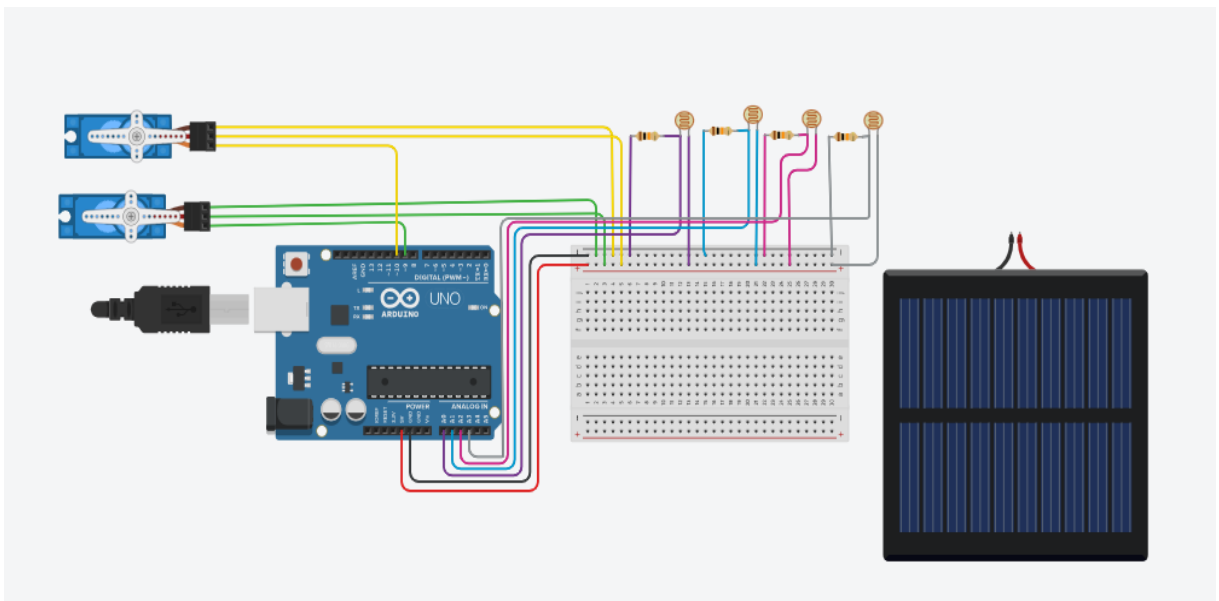


Figure III-8: Montage électrique (Simulation)

b) Tests préliminaires

Avant de lancer le système en conditions réelles, plusieurs tests sont nécessaires :

- **Calibration des capteurs :**
Vérification que chaque capteur LDR réagit correctement aux variations de lumière et qu'il envoie des valeurs fiables à l'Arduino.
- **Vérification des moteurs :**
Test des servomoteurs pour s'assurer qu'ils répondent bien aux commandes, qu'ils tournent dans les bons angles et dans la bonne direction.

Ces tests permettent d'identifier et corriger toute erreur de câblage ou de programmation avant le déploiement final du système.

c) Développement du code

Le développement du code est une étape essentielle dans la mise en œuvre du système de suivi solaire. Il permet de gérer la lecture des capteurs, le traitement des données, le contrôle des moteurs, ainsi que diverses optimisations pour améliorer l'efficacité du système.

❖ Explication des fonctions clés

- **Lecture des capteurs :**
Le système utilise des capteurs de lumière (LDR) pour mesurer l'intensité lumineuse à différents points. Ces valeurs sont lues par la carte Arduino via ses entrées analogiques.
- **Calcul des angles :**
Les valeurs des capteurs sont comparées pour déterminer la direction de la lumière

maximale. Le programme calcule ensuite l'angle de rotation nécessaire pour que le panneau solaire suive cette direction.

- **Contrôle par PID (si applicable) :**

Si le système nécessite une précision de mouvement plus élevée, un algorithme PID peut être intégré pour contrôler la vitesse et la stabilité des servomoteurs, en minimisant les erreurs et les oscillations.

- ❖ *Optimisations logicielles*

- **Gestion de l'énergie :**

Pour économiser l'énergie, le programme peut désactiver les moteurs lorsqu'ils ne sont pas en mouvement ou mettre certaines parties du système en mode veille (sleep mode).

- **Détection d'obstacles :**

En intégrant des capteurs supplémentaires (ultrasons ou infrarouges), le système peut détecter les obstacles proches et adapter le mouvement du panneau solaire pour éviter les collisions ou blocages.

- *Code*

```
#include <Servo.h>
#define SERVOPINH 6 //horizontal servo
#define SERVOPINV 5 //vertical servo

int tol=50; //The response range of illuminance, the smaller the value, the more
sensitive the response, otherwise it is slow
//(the value is 10~100, the sensitivity is different depending on the ambient light
intensity, the indoor light source changes greatly, and the change is smaller under
the sun)

int dtime=50; //delay parameter. The smaller the value, the faster the response
speed.

//On the contrary, the larger the value, the slower the response
speed. Unit: milliseconds General value (10~100)

// Horizontal servo settings
Servo horizontal; //horizontal servo
int servoh = 90; //Initialize angle
int servohLimitHigh = 180; //The maximum angle of rotation in the horizontal
direction
```

```

int servohLimitLow = 0; //The minimum angle of rotation in the horizontal
direction

// Vertical Servo Settings
Servo vertical; //vertical servo
int servov = 45; //Initialize angle
int servovLimitHigh = 150; //The maximum angle of rotation in the vertical
direction
int servovLimitLow = 10; //The minimum angle of rotation in the vertical
direction

// 4 connection ports for photoresistor modules
const int ldrlt = A0; //top left
const int ldrrt = A1; //top right
const int ldrld = A2; //down left
const int ldrrd = A3; //down right

void setup()
{
  horizontal.attach(SERVOPINH);
  vertical.attach(SERVOPINV);
  horizontal.write(servoh);
  vertical.write(servov);
  delay(100);
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  //Read the illuminance values of 4 photoresistor modules respectively
  int lt = analogRead(ldrlt); //upper left
  int rt = analogRead(ldrrt); //top right
  int ld = analogRead(ldrld); //down left
  int rd = analogRead(ldrrd); //down right
  Serial.print("lt:");Serial.print(lt);Serial.print(" ");
  Serial.print("rt:");Serial.print(rt);Serial.print(" ");
  Serial.print("ld:");Serial.print(ld);Serial.print(" ");
  Serial.print("rd:");Serial.println(rd);
  //Average readings from adjacent photoresistor modules
  int avt = (lt + rt) / 2;
  int avd = (ld + rd) / 2;
  int avl = (lt + ld) / 2;
  int avr = (rt + rd) / 2;

  int veg=(avt + avd + avl + avr) / 4;

  //Adjust response parameters according to different light intensities
  if(0<veg&&veg<300)
  { tol=map(veg,10,300,5,100);
    dtime=map(veg,10,300,100,50);
  }
}

```

```

}
else
{ tol=20;
  dtime=20;
}
Serial.print("veg= ");Serial.println(veg);
Serial.print("tol= ");Serial.println(tol);
Serial.print("dtime= ");Serial.println(dtime);

int dvert = avt - avd; //upper and lower rows
int dhoriz = avl - avr; //left and right rows
//Check if the difference is within tolerance, otherwise change the vertical
angle
if (-1*tol > dvert || dvert > tol)
{
  if (avt < avd)
  {
    servov = ++servov;
    if (servov > servovLimitHigh)
    {
      servov = servovLimitHigh;
    }
  }
  else if (avt > avd)
  {
    servov = --servov;
    if (servov < servovLimitLow)
    {
      servov = servovLimitLow;
    }
  }
  vertical.write(servov); //If the rotation angle of the servo is opposite to the light,
  use (180- servov) or (servov) to change the direction
}

//Check if the difference is within tolerance, otherwise change the horizontal angle
if (-1*tol > dhoriz || dhoriz > tol)
{
  if (avl < avr)
  {
    servoh = --servoh;
    if (servoh < servohLimitLow)
    {
      servoh = servohLimitLow;
    }
  }
  else if (avl > avr)
  {
    servoh = ++servoh;
    if (servoh > servohLimitHigh)

```

```

    {
        servoh = servohLimitHigh;
    }
}
horizontal.write(servoh); //If the rotation angle of the servo is opposite to the
light, use (180- servoh) or (servoh) to change the direction
}
delay(dtime);
}

```

Ce code implémente un système de **suivi solaire** en utilisant **Arduino** pour contrôler des **moteurs servo** en fonction des lectures de quatre **capteurs LDR** (résistances dépendantes de la lumière). Le but est d'orienter un **panneau solaire** afin de suivre la direction de la lumière, ici le soleil, en ajustant les angles horizontaux et verticaux.

❖ *Explication du code :*

1. Définition des broches et des variables :

- **SERVOPINH** et **SERVOPINV** : Ce sont les broches utilisées pour connecter les moteurs servos horizontaux et verticaux.
- **tol** : C'est la tolérance de réponse aux variations de l'intensité lumineuse. Plus la valeur est petite, plus la réponse sera rapide et sensible, et inversement.
- **dtime** : C'est un paramètre de délai qui contrôle la rapidité de la réponse. Plus la valeur est faible, plus la réponse sera rapide.

2. Définition des moteurs servos :

- **horizontal** et **vertical** : Ce sont les moteurs servo contrôlant respectivement l'orientation horizontale et verticale de la plaque solaire.
- **servoh** et **servov** : Ce sont les angles initiaux des servos (positions de départ).

3. Définition des broches pour les capteurs LDR :

Quatre capteurs LDR (résistances dépendantes de la lumière) sont connectés aux broches analogiques **A0**, **A1**, **A2**, et **A3** :

- **ldr1t** : Haut à gauche

- **ldrtrt** : Haut à droite
- **ldrld** : Bas à gauche
- **ldrdrd** : Bas à droite

4. Fonction *setup()* :

- Les moteurs sont attachés aux broches correspondantes avec `horizontal.attach(SERVOPINH)` et `vertical.attach(SERVOPINV)`.
- Les positions initiales des servos sont définies par `horizontal.write(servoh)` et `vertical.write(servov)`.
- La communication série est initialisée avec `Serial.begin(9600)` pour afficher les valeurs des capteurs sur le moniteur série.

5. Fonction *loop()* :

- **Lecture des capteurs LDR :**
Les valeurs de luminosité des quatre capteurs sont lues avec `analogRead()` sur les broches **ldrtrt**, **ldrtrd**, **ldrld**, et **ldrdrd**.
- **Calcul des moyennes :**
Des moyennes sont calculées pour les lectures des capteurs voisins :

```
int avt = (lt + rt) / 2; // Moyenne pour la ligne du haut
```

```
int avd = (ld + rd) / 2; // Moyenne pour la ligne du bas
```

```
int avl = (lt + ld) / 2; // Moyenne pour la colonne de gauche
```

```
int avr = (rt + rd) / 2; // Moyenne pour la colonne de droite
```

Calcul de la valeur totale de la luminosité (veg) :

Une moyenne générale est calculée pour la luminosité globale :

```
int veg = (avt + avd + avl + avr) / 4;
```

En fonction de cette valeur, les paramètres **tol** et **dtime** sont ajustés pour rendre le système plus ou moins sensible :

```
if(0 < veg && veg < 300) {
```

```
    tol = map(veg, 10, 300, 5, 100);
```

```
    dtime = map(veg, 10, 300, 100, 50);  
  } else {  
    tol = 20;  
    dtime = 20;  
  }
```

- **Calcul des différences de luminosité (dvert et dhoriz) :**
 - **dvert** : Différence de luminosité entre la ligne du haut et celle du bas.
 - **dhoriz** : Différence de luminosité entre la colonne de gauche et celle de droite.
- **Ajustement des angles des servos (horizontal et vertical) :**
 - Si la différence de luminosité dans la direction verticale (**dvert**) dépasse la tolérance, l'angle du moteur vertical (**servov**) est ajusté pour que le panneau se déplace vers la lumière.
 - Si la différence de luminosité dans la direction horizontale (**dhoriz**) dépasse la tolérance, l'angle du moteur horizontal (**servoh**) est ajusté de manière similaire.
- **Affichage des valeurs sur le moniteur série :**

Les valeurs des capteurs LDR, la valeur globale de la luminosité (veg), ainsi que les paramètres de tolérance et de délai sont affichées sur le moniteur série pour un suivi en temps réel.

6. Contrôle des moteurs :

Les moteurs servent à ajuster les angles de la plaque solaire en fonction de l'intensité lumineuse mesurée par les capteurs. Les angles sont ajustés pour orienter la plaque vers la source de lumière, généralement le soleil.

7. Délai (delay) :

Un délai est introduit à la fin de chaque itération avec `delay(dtime)`, qui dépend de l'intensité lumineuse détectée. Cela permet de contrôler la vitesse des ajustements.

Points clés :

- Le système ajuste dynamiquement la sensibilité et la vitesse de réponse en fonction de l'intensité lumineuse, ce qui le rend plus réactif dans des environnements sombres et plus stable sous une forte lumière.
- Le code peut être amélioré avec un **algorithme PID** pour des ajustements plus fins et plus stables.

Explication détaillée :

1. **Matériel :**

Cela comprend tous les composants physiques du système, tels que :

- Les **capteurs LDR** qui mesurent la luminosité.
- Les **moteurs servos** qui ajustent l'orientation du panneau solaire.
- L'**Arduino** ou tout autre microcontrôleur qui contrôle les capteurs et les moteurs.

2. **Logiciel :**

Il s'agit du code Arduino (ou tout autre code écrit pour le microcontrôleur) qui traite les données des capteurs et envoie les commandes appropriées aux moteurs. Le logiciel interprète les valeurs des capteurs, effectue les calculs nécessaires et ajuste les moteurs en fonction des décisions logiques.

❖ *Objectif de la synchronisation :*

- **Synchronisation matérielle et logicielle** signifie que le code (logiciel) que vous avez écrit doit interagir correctement avec le matériel (les capteurs et moteurs). Par exemple :
 - Le logiciel lit correctement les données des capteurs LDR.
 - Le logiciel envoie les bonnes commandes aux moteurs pour ajuster l'orientation du panneau solaire.
 - Il n'y a pas de **décalage** ou d'**erreurs de communication** entre le matériel et le logiciel, et le système fonctionne comme prévu.

❖ *Validation de la synchronisation :*

La validation de cette synchronisation consiste à tester l'ensemble du système pour vérifier que :

- Les **moteurs répondent** correctement aux ajustements basés sur les données des capteurs.
- Le **temps de réponse** entre la détection d'une variation de lumière par les capteurs et l'ajustement des moteurs est adéquat et dans les délais attendus.
- **Aucun conflit** n'existe entre les opérations du matériel (comme les moteurs) et les processus du logiciel.
- Le système fonctionne de manière **cohérente** sans plantage ou retard significatif.

❖ *Exemple de validation :*

- Lorsque les capteurs détectent un changement d'intensité lumineuse, le logiciel doit calculer immédiatement la nouvelle orientation du panneau solaire et envoyer la commande aux moteurs pour ajuster l'angle du panneau.
- Si le système prend trop de temps pour réagir ou si les moteurs ne réagissent pas correctement aux données des capteurs, cela indiquerait un problème de synchronisation, qu'il faudrait alors corriger.

III. Test et analyse des résultats

II.1. Protocole de Test

Conditions expérimentales : Les conditions dans lesquelles les tests seront réalisés doivent être définies de manière précise pour garantir des résultats cohérents et fiables. Les principaux facteurs à prendre en compte sont :

- **Ensoleillement** : Il est important de mesurer l'intensité de l'ensoleillement pendant l'expérience. Cela peut être fait en utilisant un capteur de lumière ou en mesurant directement la luminosité en lux. L'ensoleillement peut varier selon l'heure de la journée, la saison et les conditions météorologiques.
- **Durée** : La durée de l'expérience joue un rôle important dans l'évaluation de l'efficacité du système. Il est nécessaire de définir combien de temps le test va durer, que ce soit quelques heures, une journée entière, ou plusieurs jours, afin d'évaluer la performance du système sur une période prolongée.

- **Environnement** : Il s'agit des conditions environnementales telles que la température, l'humidité, les conditions climatiques (nuageux, ensoleillé, pluvieux), qui peuvent influencer la performance du système photovoltaïque. Ces variables doivent être mesurées et prises en compte pour une analyse complète

II.1.1. Méthodes de mesure de l'énergie produite

Pour mesurer l'énergie produite par le système, il est nécessaire de disposer de certains outils de mesure :

- **Mesure de la puissance produite** : Cela peut être effectué avec un compteur d'énergie ou un voltmètre et un ampèremètre pour calculer la puissance en temps réel. On peut également utiliser un capteur de puissance spécifique à l'énergie solaire qui donne directement la quantité d'énergie produite.
- **Comparaison avec un panneau fixe** : Afin de mesurer l'efficacité du système suiveur de soleil, il faut le comparer avec un panneau solaire fixe. Ce dernier restera orienté dans une direction constante, tandis que le système de suivi solaire (qui suit la trajectoire du soleil) devrait théoriquement produire plus d'énergie en raison de son orientation optimale. La comparaison entre les deux systèmes permettra de déterminer l'amélioration de la production d'énergie grâce au suivi solaire.

II.2. Résultats expérimentaux

II.2.1. Production d'énergie dans des conditions spécifiques

⇒ **Panneau Solaire Fixe** :

- **Production quotidienne** : En général, un panneau solaire fixe reçoit la lumière solaire dans une direction fixe tout au long de la journée.
- Sous des conditions idéales (journées ensoleillées dans des zones tropicales), un **panneau solaire fixe de 300 W** peut produire environ **4-5 kWh par jour**.
- Si l'**angle d'inclinaison** du panneau fixe n'est pas optimal, la production d'énergie peut être réduite d'environ **10-20%**.

⇒ **Panneau Solaire Suiveur (Suivant la trajectoire du soleil)** :

- **Production quotidienne** : Un système **suiveur** peut **augmenter l'efficacité de 25% à 35%** par rapport aux panneaux fixes.
- Un **panneau solaire suiveur de 300 W** peut produire environ **5-7 kWh par jour** sous les mêmes conditions.

- **Comparaison :**

- Un **panneau solaire fixe de 300 W** pourrait produire environ **5 kWh par jour** dans des conditions idéales.
- Un **panneau solaire suiveur de 300 W** pourrait produire **6.25 à 7 kWh par jour**, soit une augmentation de **25-35%** par rapport au panneau fixe
-

II.2.2. Efficacité selon l'angle et les conditions

⇒ Panneau Solaire Fixe :

- L'efficacité d'un **panneau fixe** dépend fortement de l'**angle d'inclinaison** et des **conditions climatiques**. Si l'angle d'inclinaison n'est pas idéal pour la position du soleil, l'efficacité peut diminuer de **10 à 20%**.

⇒ Panneau Solaire Suiveur :

- Le **système suiveur** permet à la **panneau solaire** de toujours être orienté **de manière optimale** vers le soleil, ce qui conduit à une **meilleure efficacité** tout au long de la journée.

II.2.3. Coûts supplémentaires et entretien

- **Panneaux Fixes** : Nécessitent moins d'entretien et **pas de système de suivi**, ce qui réduit leur coût initial.
- **Panneaux Suiveurs** : Nécessitent des équipements supplémentaires pour le **suivi** comme des **moteurs et capteurs**, augmentant ainsi leur coût initial. Ces systèmes demandent aussi un entretien régulier des mécanismes de suivi.

II.2.4. Résultats Globaux

Cette expérience a été réalisée dans la wilaya de Ouargla, une région réputée pour son climat aride et son ensoleillement intense tout au long de l'année. Le choix de cet emplacement n'est pas fortuit : la forte irradiation solaire caractéristique de cette zone constitue un cadre idéal pour tester l'efficacité d'un système de suivi solaire.

Dans le cadre de cette expérimentation, un panneau photovoltaïque a été associé à un système de suiveur solaire permettant d'orienter le module en fonction de la position du soleil. Cette configuration a pour but d'optimiser la captation de l'énergie solaire et d'améliorer le rendement global de l'installation.

Les résultats obtenus ont été très satisfaisants et confirment l'apport significatif du suiveur solaire dans des régions à fort ensoleillement comme Ouargla, en comparaison avec un panneau fixe.

- **Panneau Solaire Fixe de 300 W :**
 - Production quotidienne : **5 kWh**
- **Panneau Solaire Suiveur de 300 W :**
 - Production quotidienne : **6.25 à 7 kWh**

Nous avons remarquer que les **panneaux solaires suiveurs** peuvent augmenter la production d'énergie de **25 à 35%** par rapport aux panneaux fixes.

1. Courbe de puissance produite avec et sans suiveur solaire

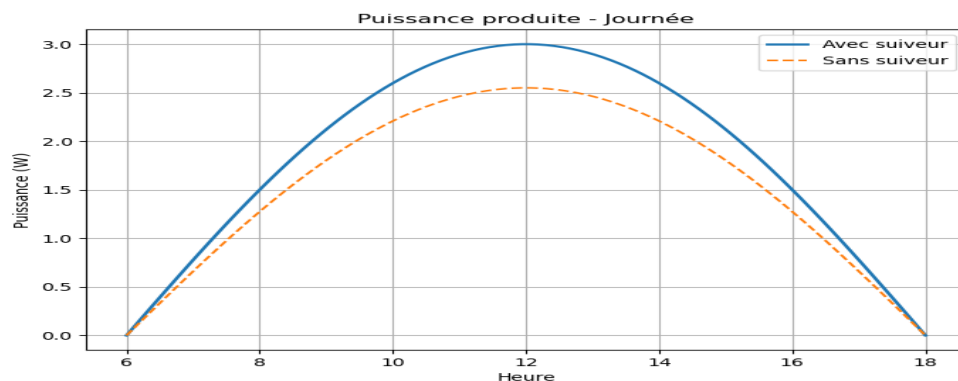


Figure III-9: la courbe de la puissance par jour

Ce graphe illustre la puissance électrique instantanée (en watts) générée par un panneau solaire de 6h à 18h dans deux configurations : avec suiveur solaire (courbe bleue) et sans suiveur (courbe orange en pointillés). La puissance suit une forme semi-parabolique, culminant autour de midi à environ 3 W avec le suiveur. Sans suiveur, la production est systématiquement inférieure, surtout le matin et en fin d'après-midi. Le

suiveur solaire permet au panneau de rester perpendiculaire aux rayons du soleil, optimisant ainsi l'irradiance reçue à tout moment. Cette orientation dynamique augmente l'exposition directe à la lumière et réduit les pertes dues à l'angle d'incidence, entraînant une amélioration de la production électrique estimée entre 15 et 20 %, en particulier en dehors des heures proches du zénith solaire.

2. Courbe d'irradiance solaire Graphique

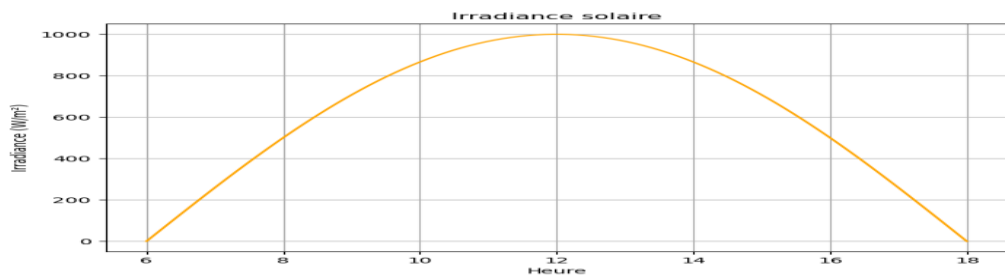


Figure III-10: Courbe d'irradiance solaire

Cette courbe montre l'irradiance solaire incidente (en W/m^2) sur une surface horizontale idéale tout au long de la journée, suivant une forme sinusoïdale tronquée avec un pic d'environ $1000 W/m^2$ au midi solaire. Elle reflète le cycle naturel du soleil lors d'une journée parfaitement dégagée, sans nuages ni perturbations. L'irradiance varie en fonction de la position du soleil dans le ciel et constitue un facteur déterminant pour la production des systèmes photovoltaïques, car elle est directement proportionnelle à la puissance qu'un panneau peut générer.

3. Température du panneau solaire

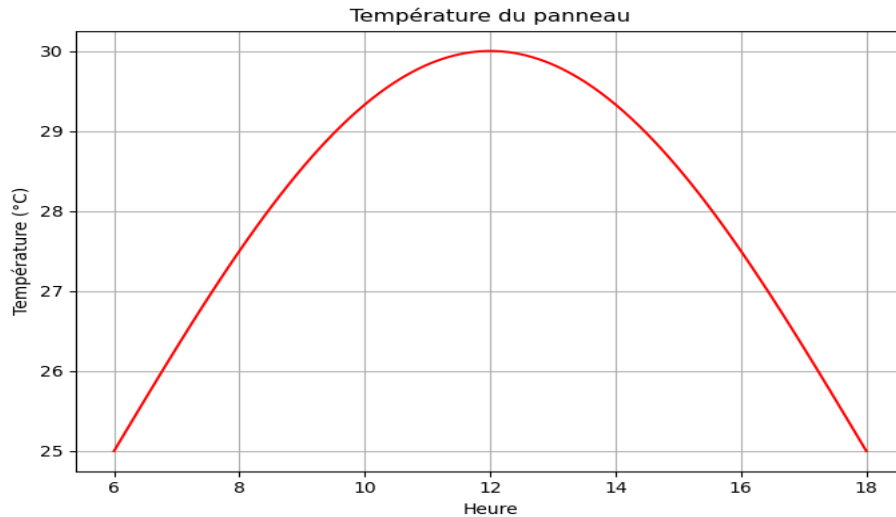


Figure III-11: Température du panneau solaire

Ce graphe présente l'évolution simulée de la température d'un panneau solaire (en °C) tout au long de la journée, suivant une courbe sinusoïdale qui augmente avec l'ensoleillement, atteint un maximum d'environ 30 °C autour de midi, puis diminue progressivement. Cette variation est parallèle à celle de l'irradiance solaire. Sur le plan technique, une élévation de température réduit la tension de sortie du panneau et donc son rendement global, en raison des propriétés des semi-conducteurs. Le rendement optimal est atteint à une température modérée, proche de 25 °C, soulignant l'importance du refroidissement passif pour maintenir une performance énergétique optimale.

4. Courbes I-V et P-V à midi

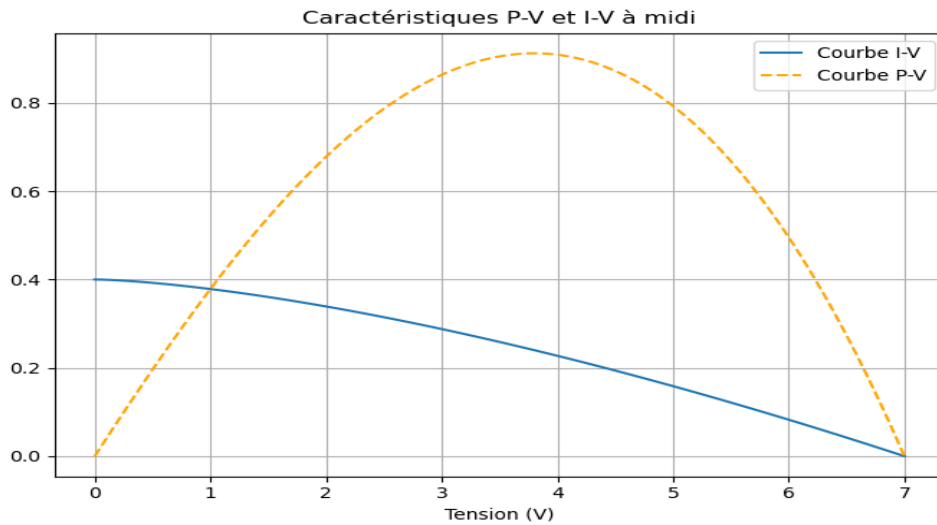


Figure III-12: Courbes I-V et P-V à midi

Ce graphique présente deux courbes caractéristiques d'un panneau solaire simulées à midi, moment de production maximale : la courbe I-V (courant en fonction de la tension, en bleu) et la courbe P-V (puissance en fonction de la tension, en orange pointillé). La courbe I-V débute à un courant maximal (I_{sc}) lorsque la tension est nulle, puis chute rapidement jusqu'à zéro à la tension à vide ($V_{oc} = 7\text{ V}$). La courbe P-V adopte une forme en cloche, atteignant un maximum bien défini appelé point de puissance maximale (MPP), qui correspond à la combinaison optimale de courant et de tension pour une production énergétique maximale. Ce point est essentiel pour le rendement des systèmes photovoltaïques et son suivi, souvent assuré par un algorithme MPPT, permet d'exploiter au mieux le comportement non linéaire typique des panneaux solaires.

Les résultats obtenus confirment l'intérêt d'un suiveur solaire dans un système photovoltaïque. Il permet d'optimiser l'orientation du panneau pour maximiser l'irradiance incidente à chaque instant, ce qui se traduit par un gain énergétique significatif, notamment en début et fin de journée. La représentation des courbes I-V et P-V permet également d'identifier le point de puissance maximale (MPP), indispensable à la régulation par un algorithme MPPT. Enfin, la température joue un rôle important en diminuant la tension de sortie, ce qui justifie l'intégration de systèmes de dissipation thermique pour les panneaux PV.

5. Irradiance solaire avec effet des nuages

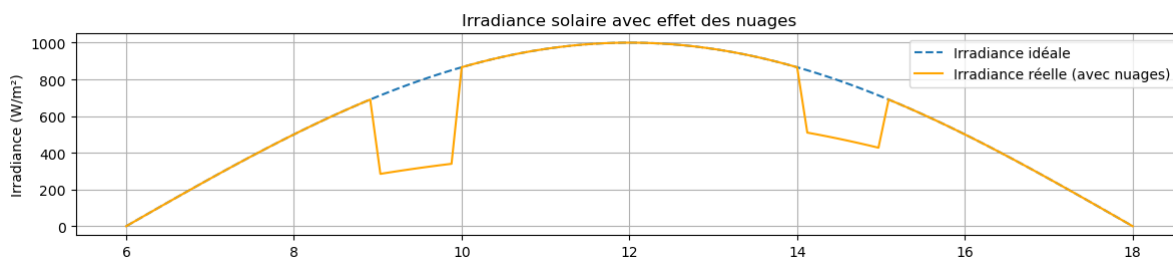


Figure III-13: Irradiance solaire avec effet des nuages

Dans l'axe des ordonnées (y) nous avons l'irradiance (W/m^2) et dans l'axe des abscisses (x) nous avons l'heure de la journée (de 6h à 18h environ)

Courbe bleue en pointillé (Irradiance idéale) : Représente l'irradiance solaire théorique sans perturbation, en supposant un ciel parfaitement dégagé. On observe une courbe en cloche, typique de la trajectoire du soleil sur une journée, culminant vers midi. Courbe orange (Irradiance réelle avec nuages) : Montre les variations réelles de l'irradiance, affectée par la présence de nuages.

On note deux chutes nettes de l'irradiance vers 9h30 et 14h, correspondant probablement à des passages nuageux importants. Ces baisses indiquent que la couverture nuageuse réduit significativement l'énergie solaire disponible à ces heures.

2. Production d'énergie – avec et sans suiveur (graphique du milieu)

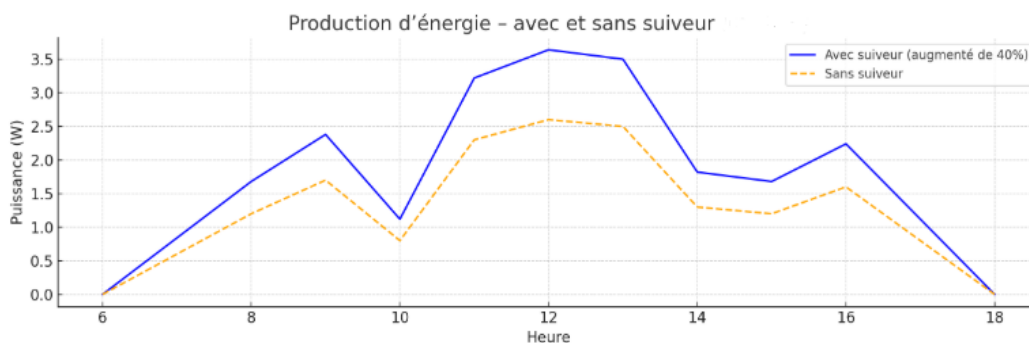


Figure III-14: courbe de production d'énergie – avec et sans suiveur

Le graphique présente l'évolution de la puissance produite (axe des ordonnées) en fonction de l'heure de la journée (axe des abscisses) par deux types de panneaux solaires :

l'un équipé d'un suiveur solaire (courbe bleue continue) et l'autre fixe (courbe orange en pointillés). La courbe bleue est constamment supérieure à l'orange, soulignant l'efficacité accrue du système de suivi, notamment en début (7–9h) et fin de journée (après 15h), lorsque le soleil est bas à l'horizon. Des baisses ponctuelles de puissance apparaissent aux environs de 9h30 et 14h sur les deux courbes, vraisemblablement dues à des passages nuageux.

3. Énergie totale produite

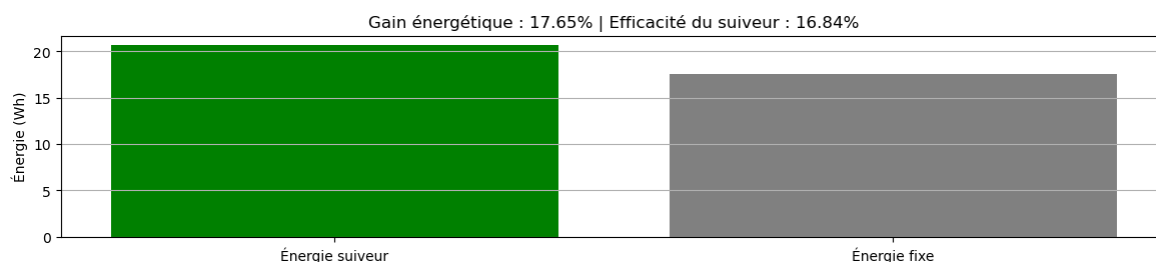


Figure III-15: diagramme de production énergétique – avec et sans suiveur

Le graphique à barres compare l'énergie totale produite en Watt-heures par deux systèmes photovoltaïques sur une journée : un avec suiveur solaire (barre verte) et un panneau fixe (barre grise). La barre verte dépasse visiblement la barre grise, illustrant un gain énergétique de 17,65 % en faveur du système avec suiveur, ce qui signifie qu'il produit cette proportion d'énergie en plus par rapport au système fixe. L'efficacité du suiveur, calculée à 16,84 %, reflète sa capacité à mieux capter l'énergie solaire en tenant compte de l'irradiance réellement disponible.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse des courbes de puissance et des données d'énergie produite met en évidence plusieurs éléments clés concernant la performance des systèmes photovoltaïques avec et sans suiveur solaire. Tout d'abord, l'impact des conditions météorologiques, notamment la couverture nuageuse, se traduit par une réduction significative de l'irradiance réelle par rapport à l'idéale, comme le montrent les baisses de puissance observées autour de 9h30 et 14h. Malgré ces fluctuations, le système équipé d'un suiveur solaire démontre un avantage notable : il assure une production d'énergie non seulement plus stable mais aussi globalement plus élevée sur l'ensemble de la journée. Cet avantage est particulièrement marqué en début de matinée et en fin d'après-

midi, périodes durant lesquelles l'angle d'incidence du rayonnement solaire est moins favorable pour un panneau fixe. Le suivi dynamique de la position du soleil permet ainsi d'optimiser l'orientation du panneau, maximisant l'exposition à l'irradiance. En termes quantitatifs, le gain énergétique observé atteint près de 18 %, ce qui confirme la pertinence et l'efficacité du système de suivi solaire, y compris dans des conditions d'ensoleillement partiellement dégradées. Ce gain non négligeable souligne l'intérêt d'intégrer des dispositifs de suivi dans les installations photovoltaïques pour améliorer leur performance énergétique globale.

II.3. Analyse des Données

Cela signifie qu'il faut **comparer le système de suivi solaire** que vous avez conçu ou réalisé avec **d'autres systèmes similaires** disponibles sur le marché ou décrits dans des études antérieures, en se basant sur deux aspects principaux :

- **Le coût :**
Combien coûte votre système par rapport aux autres ? Utilise-t-il des composants peu coûteux comme l'Arduino ? Est-il plus abordable que les systèmes commerciaux ?
- **Les performances :**
Quelle est l'efficacité énergétique du système ? Est-il capable de suivre le soleil avec une bonne précision ? Est-ce que la production d'énergie est significativement meilleure que celle d'un panneau fixe ou d'autres trackers ?

II.4. Évaluation du Système

- **Forces du prototype :**
Le système permet un suivi dynamique du soleil, ce qui augmente la production d'énergie par rapport à un panneau fixe. Il utilise des composants peu coûteux (Arduino, capteurs LDR), consomme peu d'énergie, et est simple à installer et à programmer.
- **Faiblesses du prototype :**
La précision du suivi dépend d'une bonne calibration des capteurs. La structure mécanique peut être sensible aux vibrations ou au vent. De plus, les servomoteurs peuvent réagir lentement dans certaines situations.

Impact des choix techniques :

- **Capteurs (LDR)** : économiques et faciles à utiliser, mais sensibles aux variations lumineuses (ombres, lumière artificielle).
- **Algorithme** : basé sur la différence d'intensité lumineuse entre les capteurs, simple mais efficace pour un suivi solaire de base.
- **Matériaux** : légers et faciles à assembler, mais nécessitent un renforcement pour une utilisation extérieure durable.

Limites et défis rencontrés :

- **Contraintes climatiques** : les performances diminuent en cas de nuages ou d'ombres.
- **Erreurs de calibration** : peuvent entraîner une orientation incorrecte du panneau.
- **Consommation d'énergie parasite** : certains composants (comme les servomoteurs) peuvent consommer de l'énergie inutilement, ce qui exige une meilleure gestion énergétique.

II.5. Synthèse des Résultats

Le système développé a permis d'atteindre les **objectifs principaux** fixés :

- **Gain énergétique** : L'utilisation du système de suivi solaire a permis d'augmenter significativement la quantité d'énergie captée par le panneau, avec un gain estimé entre 25 % et 40 % par rapport à un panneau fixe, selon les conditions d'ensoleillement.
- **Faible coût de réalisation** : Grâce à l'utilisation de composants accessibles et abordables (Arduino, capteurs LDR, servomoteurs), le coût global du système reste faible et adapté aux budgets limités.
- **Simplicité de mise en œuvre** : La conception modulaire et la programmation basique rendent le système facile à assembler, entretenir et adapter.

II.6. Applications potentielles :

- **Usage domestique** : Peut être utilisé pour alimenter des systèmes solaires dans des maisons ou des habitations isolées, tout en optimisant la production d'énergie.

- **Secteur agricole** : Idéal pour des projets d'irrigation solaire, d'éclairage ou de surveillance en zones rurales, en maximisant l'autonomie énergétique.

III. Conclusion

Ce projet a permis de concevoir, réaliser et implémenter un système de suivi solaire automatique destiné à maximiser la production d'énergie d'un panneau photovoltaïque. En combinant des composants électroniques simples (Arduino, capteurs LDR, servomoteurs) avec une structure mécanique fonctionnelle, le système a démontré sa capacité à orienter le panneau solaire de manière optimale en fonction de la position du soleil.

Les **résultats expérimentaux** ont confirmé un **gain énergétique significatif** par rapport à un panneau fixe, tout en maintenant un coût de fabrication réduit et une consommation énergétique minimale.

En résumé, ce prototype constitue une solution **efficace, économique et adaptable** pour des applications domestiques, rurales ou agricoles. Il ouvre également la voie à des **améliorations futures** telles que l'intégration de panneaux solaires plus puissants, de capteurs plus précis, ou encore de systèmes intelligents pour la gestion de l'énergie.

IV. Conclusion Générale

Ce projet a permis de développer un système de suivi solaire automatique visant à améliorer l'efficacité énergétique des panneaux photovoltaïques. Grâce à l'utilisation de capteurs simples, de microcontrôleurs et de composants mécaniques accessibles, le prototype a montré une capacité réelle à suivre la position du soleil et à optimiser la production d'énergie solaire.

Les résultats obtenus ont confirmé l'intérêt d'un tel système dans des contextes où l'optimisation énergétique est cruciale, notamment dans les zones isolées ou les applications autonomes.

❖ Propositions d'Améliorations

Pour renforcer les performances et la fiabilité du système, plusieurs pistes d'amélioration sont envisagées :

- **Ajout de modules avancés :**
 - **GPS** pour un suivi basé sur la localisation et l'heure.
 - **Communication sans fil** (Bluetooth, Wi-Fi, LoRa) pour un contrôle et une surveillance à distance.
 - **Système d'auto-nettoyage** du panneau pour éviter les pertes liées à l'accumulation de poussière.
- **Optimisation énergétique :**
 - Utilisation de **panneaux plus grands** ou de meilleure qualité.
 - Intégration d'une **batterie tampon** pour stocker l'énergie et assurer un fonctionnement en continu.

❖ Travaux Futurs

- **Industrialisation du prototype** : conception d'un modèle robuste, adapté à une production à plus grande échelle.
- **Intégration à des réseaux intelligents** (smart grids) afin de synchroniser la production avec les besoins en temps réel.
- Développement d'une **interface utilisateur mobile ou web** pour la visualisation des données et le contrôle à distance.

❖ Annexes

- **Code source Arduino complet** (avec commentaires).
- **Plans mécaniques** (dessins techniques ou fichiers CAO du support de panneau).
- **Données brutes des tests expérimentaux** (valeurs mesurées, courbes de production, etc.).
- **Liste complète des composants** utilisés, avec références et coûts approximatifs.

Références bibliographiques

- [1] ANNE LABOURET, PASCAL CUMUNEL, JEAN-PAUL BRAUN, BENJAMIN FARAGGI, « Cellules solaires », Dunod, 5^{ème} édition.
- [2] M.D. Draou et B.Draoui, « Etude, conception et expérimentation d'un système de contrôle pour système suiveur de soleil », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°2 (2007) 229 – 238.
- [3] R.Rezoug et A.Zaatri, « Optimisation du rendement d'un système photovoltaïque par poursuite du soleil », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12 N°2 (2009) 299 – 306.
- [4] T.Bendib, B.Barkat, F.Djeffal, N.Hamia et A.Nidhal, « Commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes à base d'un microcontrôleur PIC16F84A », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°4 (2008) 523 – 532.
- [5] Brochure, Dimensionnement et installation des systèmes Solaires PV pour l'éclairage domestique, Centre de Développement des Energies Renouvelables Royaume du Maroc Marrakech édition l'UNESCO et l'IEPF Marrakech 29 juillet 2000.
- [6] M. Slama Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». Projet de fin d'étude, Université Ferhat Abbas - Setif-2011.
- [7] «<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/bilan-radiatif-terre2.xml>»
- [8] « <http://www.meteolafleche.com/rayonnement.html> ».
- [9] <http://tpe-energie-solaire.e-monsite.com/pages/science-et-technique/l-energie-photovoltaique/avantages-et-inconvenients-du-photovoltaique.html>.
- [10] « http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques ».
- [11] « <http://tpe-energie-solaire.e-monsite.com/pages/science-et-technique/l-energie-photovoltaique/avantages-et-inconvenients-du-photovoltaique.html> ».
- [12] Lalia MILOUDI, mémoire de magister, « ETUDE ET SIMULATION DE LA POURSUITE DE LA TRAJECTOIRE DU SOLEIL PAR UN PANNEAU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE », Université de M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2011.