

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



Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Automatique

**Spécialité :** Automatique et système

**Par : Maidi Rym**

**Thème**

**Titre**

**Développement d'une carte électronique à base d'Arduino avec interface de communication pour la commande d'un héliostat**

**Soutenu publiquement le : 18 / 09 /2019**

**Devant le jury :**

<b>Dr.Hammed Boukhari</b>	Maître de Recherche A	Université. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>Dr.Bouaroudj Nouradine</b>	Maître de Recherche B	URAER. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>Dr. GAMA Amor</b>	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
<b>Dr. YETTOU Fatiha</b>	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	<b>Co-encadreur</b>

**Année Universitaire : 2018 / 2019**

## REMERCIEMENTS

---

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dieu soit loué et remercie Dieu

Mes premiers remerciements vont d'abord à mon encadreur Dr. GAMA

Amor pour le temps qu'il m'a consacré et son engagement, pour les précieux conseils et la liberté qu'il m'a accordée au cours de ces mois.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mon Co-encadrant Dr.

YETTOU Fatiha pour son aide constant et minutieux tout au long du développement et de la rédaction de mon mémoire. Je le remercie aussi pour ses précieux conseils ainsi que sa patience lors des explications tout le long de mémoire.

Mes remerciements à mes rapporteurs, président examinateurs, pour avoir accepté d'évaluer mon travail, pour le temps qu'ils ont accordé à la lecture de cette mémoire et à l'élaboration de leurs rapports.

C'est également avec plaisir que je remercie Dr. K.Bouaarour doyen de la faculté des sciences et technologies et le chef département Mr. M.Arif pour l'assistance qu'il m'a fournie.

Je remercie également le Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa), Dr DJAFER Djelloul ; qui nous a permis de réaliser ce travail au sein de l'URAER.

J'exprime ma plus profonde reconnaissance à ma famille de m'avoir encouragé et soutenus pendant toutes ces années et particulièrement à mes très chers parents.

A tous ceux qui ont assistés de près ou de loin dans la réalisation de ce projet de fin d'étude.

## *Dédicace*

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

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

*A mon très cher père Mohammed, que dieu  
les garde et les protège pour leurs soutien  
moral et financier, pour leurs  
encouragements et les sacrifices*

*Et surtout pour son sacrifice afin que rien  
n'entrave*

*Le déroulement de mes études.*

*A mes chers frères*

*A mes sœurs*

*A tous mes amis*

*Rym*

## RESUME

---

Le champ d'une centrale solaire est caractérisé par un nombre très important d'héliostats qui peuvent atteindre les 10000 héliostats. La taille du champ présente une grande contrainte de commande. La centralisation de la commande semble une solution optimale pour la gestion est le suivi de système de poursuite du champ solaire.

Dans ce travail, nous avons proposée d'étudier et de réaliser une carte électronique à base d'Arduino, la carte doit commander les deux moteurs d'héliostats et assurer une communication sans fil avec la salle de contrôle, pour cela nous avons choisi un système de communication Wifi (Nodemcu ESP8255). Un serveur embarqué a été programmé et implémenté pour l'affichage de toutes les fonctionnalités des héliostats. Utilisant un explorateur internet on peut afficher la page web du serveur embarquer qui présente le statut de l'héliostats et donne aussi une interface de commande des deux moteurs de poursuite solaire.

**Mots clés :** Commande automatique – héliostat - Système de poursuite –Energie solaire – carte Arduino -Nodemcu ESP8255 - centrale solaire- commande sans fil (Wi-Fi)

## TABLE DES MATIERES

<b>RESUME</b>		
<b>SOMMAIRE</b>		
<b>LISTE DES FIGURES</b>		
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>		
<b>NOMENCLATURE</b>		
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>		
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES SOLAIRES</b>		
<b>I.1.</b>	<b>Introduction</b>	01
<b>I.2.</b>	<b>Energie solaire</b>	01
I.2.1.	<b>Le Soleil</b>	01
I.2.2.	Le rayonnement solaire	02
I.2.2. 1	Types de rayonnements	02
I.3.	Conversion d'énergie : les différentes technologies solaires	03
I.3.1.	Solaire photovoltaïque	04
I.3.1.1	Description de Cellule photovoltaïque	04
I.3.1.2.	Types cellules photovoltaïques	04
	Les cellules monocristallines	05
	Les cellules poly cristallines	05
	Les cellules amorphes	05
I.3.1.3	Les modules photovoltaïques	05
I.3.1.4.	Le système photovoltaïque	06
I.3.1.5.	Le générateur photovoltaïque	06
.I.3.1.6	La batterie	07
I.3.1.7.	Le régulateur	07
I.3.1.8.	L'onduleur	07
I.1.2.3	Les différents systèmes photovoltaïques	07
	Les systèmes photovoltaïques autonomes	07
	Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau	08
	Les systèmes photovoltaïques hybrides	08
	Les systèmes photovoltaïques au fil du soleil	08
I.3.2.	Solaire thermodynamique	08
I.3.2.2 .	Les centrales à tour	08
.I.3.2.3	Les éléments de la tour solaire	09
.	La chaudière	09
	Les Héliostats	10
I.3.2.4.	Réflecteur cylindro-parabolique	11
I.3.2.5.	Réflecteur parabolique	11
I.3.2.6.	Miroirs de Fresnel	12
I.4.	Etat de l'art des techniques de suivi	12
I.5.	Les premières utilisations	12
<b>I.6.</b>	<b>Conclusion</b>	13
<b>CHAPITRE II : SYSTEME DE POURSUITE SOLAIRE DANS LES CENTRALES</b>		
<b>II.1.</b>	<b>Introduction</b>	16
<b>II.2.</b>	<b>Les centrales Solaires</b>	17
II.2.1.	Les centrales photovoltaïques	17

II.2.2.	Les centrales solaires thermiques	17
<b>II.3</b>	<b>Théorie des systèmes de poursuite solaire</b>	18
II.3.1.	Sphère céleste	18
II.3.2.	Les coordonnées célestes	19
II.3.2.1.	Coordonnées géographiques	19
II.3.2.2.	Coordonnées horaires	19
II.3.2.3.	Coordonnées horizontales	20
II.3.3.	Angle d'incidence	21
II.3.4.	Suivi continu du soleil	22
II.3.5.	Energie solaire reçue par un concentrateur avec poursuite solaire	23
II.4.	Poursuite solaire dans les concentrateurs	24
II.5.	Les suiveurs solaires	27
II.5.1.	Définition de suiveur solaire	27
II.5.2.	Type des suiveurs solaires	27
II.5.2.1.	Suiveur à axe horizontal	28
II.5.2.2.	Suiveur à axe vertical incliné	28
II.5.2.3.	Suiveur à deux axes	29
II.6.	Les stratégies de commande d'un tracker	29
II.6.1.	Commande en boucle ouverte	30
II.6.2.	Commande en boucle fermée	30
II.6.3.	Commande hybride	31
<b>II.7.</b>	<b>Conclusion</b>	32
<b>CHAPITRE 3 : REALISATION D'UN SYSTEME DE COMMANDE D'UN CHAMP SOLAIRE SOUS RESEAU</b>		
<b>III.1.</b>	<b>Introduction</b>	34
<b>III.2.</b>	<b>Composants utilisés</b>	34
III.2.1.	Carte Arduino UNO R3	34
III.2.2.	Caractéristique de la carte Arduino Uno R3	35
III.2.3.	La carte de connexion Wi-Fi « NODEMCU ESP8255 »	35
III.2.4.	La carte de pilotage pas à pas L298N	36
III.3.	La carte de gestion de fonctionnement d'héliostats	37
III.4.	Programme de gestion de la carte électronique	38
III.4.1.	Test sur le système réalisé	41
III.5.	Conclusion	42
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		<b>45</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>		<b>47</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Composition du soleil	01
Figure I.2	Répartition spectrale du rayonnement solaire	02
Figure I.3	Types de rayonnement solaire.	03
Figure I.4	Plan de l'utilisation de l'énergie solaire.	03
Figure I.5	Collision entre un photon et un atome.	04
Figure I.6	Cellule photovoltaïque	04
Figure I.7	Les différents types de la cellule photovoltaïque	05
Figure I.8	Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque (T=25°C et E=1000 W/m <sup>2</sup> )	06
Figure I.9	Schéma bloc d'une installation PV autonome avec stockage d'énergie	06
Figure I.10	Centrale à tour	09
Figure I.11	Première mini Tour solaire à concentration en Algérie, Ghardaïa	09
Figure I.12	Le récepteur d'une centrale solaire à tour	10
Figure I.13	les Héliostats	10
Figure I.14	Concentrateur cylindro-parabolique	11
Figure I.15	Concentrateur parabolique	11
Figure I.16	Central solaire à miroirs de Fresne	12
Figure I.17	Modèle d'un héliostat dans ses premières applications	13
Figure I.18	Centrale thermo-solaire à taille industrielle	13
Figure II.1	Système photovoltaïque	17
Figure II.2	Schéma global d'une centrale solaire thermique	18
Figure II.3	La sphère céleste	18
Figure II.4	Les coordonnées géographiques	19
Figure II.5	Les coordonnées horaires	20
Figure II.6	Les coordonnées horizontales	21
Figure II.7	Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire	21
Figure II.8	Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de Linke et du temps pour le jour le plus court (21 Décembre) de l'année	23
Figure II.9	Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de Linke et du temps pour le jour le plus long (21 Juin) de l'année	23
Figure II.10	Variation de l'énergie reçue (en Wh/m <sup>2</sup> ) par un concentrateur solaire horizontal en fonction du jour	24
Figure II.11	Variation de l'énergie reçue (en Wh/m <sup>2</sup> ) par un concentrateur solaire incliné à la latitude en fonction du jour	24
Figure II.12	Monture altazimutale des systèmes à 3 dimensions	25
Figure II.13	Monture équatoriale des systèmes à 2 dimensions	25
Figure II.14	Monture des systèmes à 2 dimensions (Est-Ouest)	26
Figure II.15	Monture des systèmes à 2 dimensions (Parallèle à l'axe du monde)	26
Figure II.16	Les différents types des suiveurs solaires	26
Figure II.17	Suiveur à axe horizontal	28
Figure II.18	Suiveur à 1axe vertical incliné	28
Figure II.19	Suiveur à deux axes	29
Figure II.20	Schéma synoptique de commande d'un tracker	29
Figure II.21	Commande en boucle ouverte d'un tracker PV	30

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure II.22	Commande en boucle fermée d'un tracker	31
Figure.II.23	Commande hybride d'un tracker doubles axes	32
Figure. II.24	Analyse de la constitution de la partie viseur et référence de la commande hybride	32
Figure III.1	schéma fondamental de l'Arduino	34
Figure III.2	La carte ESP8255	36
Figure III.3	La carte de pilotage L298N	36
Figure III.4	Schéma synoptique de la carte réalisée	37
Figure III.5	Composant de la carte finale de commande d'un système de poursuite solaire à distance WIFI	38
Figure III.6	La carte de commande sur plaque d'essai	38
Figure III.7	Contrôle de la connexion	41
Figure III.8	Le système de gestion dans navigateur	42

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Tableau 1: Les différents types des cellules avec leur rendement	6
Tableaux.III.1	Les caractéristiques de la carte Arduino Uno R3	35

## NOMENCLATURE

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>
DC	Direct current (courant continu)
AC	Alternating current (courant alternatif)
DC/AC	Conversion continu/alternatif
DC/DC	Conversion continu/continu
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateurs photovoltaïques
CPV	Centrale photovoltaïque
CSP	Solaire à concentration thermodynamique
$I_c$	Le courant de court-circuit
$I_{ph}$	Photocourant généré par le rayonnement
P	Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV
I-V	Courant-tension
P-V	Puissance-tension
WC	Watt-crête
$I_{sat}$	Le courant de saturation de la jonction
SI	Silicium
P	Couche P
N	Couche N
N-P	Jonction N-P
K	Constante de Boltzmann avec $k = 1.38 \times 10^{-23}$
$N_s$	Nombre de cellules série
$V_{co}$	La tension de circuit ouvert
$FF$	Le facteur de forme
$\eta$	Le rendement du panneau solaire
H	Hauteur angulaire du soleil
A	L'Azimut
R(E)	La résistance de la LDR
BO	Boucle ouvert
BF	Boucle fermé
$c^{de}$	La Commande
PAP	Pas à pas
S	La surface

# **INTRODUCTION GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE

---

## Introduction générale

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. Le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. L'énergie solaire est une solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages : [1]

- Elle fournit de l'électricité avec l'énergie gratuite et renouvelable du soleil.
- Elle ne nécessite aucun combustible.
- Elle est silencieuse et non polluante respectueuse de l'environnement.
- Elle est polyvalente et peut être ajustée selon les besoins.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées surtout dans les zones désertiques.

Les centrales solaires photovoltaïques (PV) et les centrales solaires à concentration (CSP) sont les deux importantes filières de production d'énergie électrique sur une grande échelle.

Les héliostats sont l'élément le plus important du point de vue coût dans la composition de ces centrales.

L'héliostat dans les centrales solaires à concentration (CSP) a pour but de réfléchir les rayons solaires incidents vers une cible fixe (la tour) durant toute la trajectoire diurne de l'astre solaire. Pour assurer convenablement sa commande, il est nécessaire de connaître ses paramètres et de déterminer sa position par rapport à la tour, ce qui se traduit par la détermination de son angle d'élévation (nord-sud) et son angle de rotation (est-ouest). [2]

Dans un monde en perpétuelle évolution, la question de Communication devient de plus en plus récurrente par son impact sur la technologie ; La communication relie entre deux systèmes pour permettre la transformation des données et les informations, on a deux types de communication :

- Communication câblée.
- Communication sans fil.

# INTRODUCTION GENERALE

---

Dans ce travail, nous avons étudié et réalisé une carte électronique qui gère le fonctionnement d'un héliostat d'une centrale solaire, la carte doit donner l'accès aux utilisateurs au niveau de la salle du contrôle pour la commande et le contrôle du statut du champ solaire.

Le document est divisé en trois chapitres principaux résumés dans ce qui suit :

## Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes solaire

Dans le premier chapitre, on va donner une description générale, et le principe de fonctionnement des centrales solaire.

## Chapitre 2 : Système de poursuite solaire dans les centrales

Le deuxième chapitre est consacré à la description des éléments du système de poursuite solaire.

## Chapitre 3 : Réalisation d'un système de commande et de contrôle sans fil d'un héliostat

Dans le troisième chapitre, on va présenter les étapes de réalisation de la carte de commande et de contrôle de l'héliostat avec système de communication sans fil (Arduino, ESP8255).

La carte réalisée a montré une efficacité remarquable de commande et de transfert des données, entre l'héliostat et un PC de contrôle par le baie d'interface Wifi. Le travail peut être extensible pour gérer le contrôle du bloc de puissance et bien sûr les différentes parties de la centrale solaire.



**CHAPITRE I**

**GENERALITES SUR**

**LES SYSTEMES**

**SOLAIRES**

### I.1. Introduction :

La conversion de la lumière en électricité, se divise en deux parties : la conversion directe qui s'appelle l'effet photovoltaïque et la conversion indirecte qui s'appelle le solaire thermique.

Ce chapitre présente les notions de bases qui aident à la compréhension du domaine d'énergies renouvelables. Nous donnons quelques notions sur l'énergie solaire. Ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales. Puis, nous donnons des généralités sur le rayonnement solaire.

### I.2. Energie solaire

Le Soleil est à l'origine de toutes énergies renouvelables dans le monde. Ainsi peut-on considérer l'énergie solaire comme une ressource énergétique renouvelable fondamentale dans le monde.

Il y a cependant différentes sortes d'énergie solaire :

- L'énergie solaire historique : les combustibles fossiles (non renouvelables) ;
- La conversion directe de l'énergie solaire en électricité : le photovoltaïque ;
- La conversion indirecte de l'énergie solaire en électricité : le solaire thermique ;
- L'énergie solaire indirecte par la photosynthèse : la biomasse.

Dans cette section, nous allons nous occuper seulement des formes dites 'classiques' de l'énergie solaire, c'est-à-dire le solaire thermique et le solaire électrique (Photovoltaïque)

#### I.2.1. Le Soleil

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments (figure I.1), le soleil est une bombe thermonucléaire à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre.

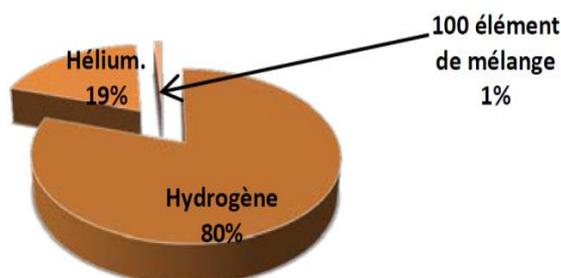


Figure I.1: Composition du soleil.

### I.2.2. Le rayonnement solaire :

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de  $0.22\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$ . La figure.1.2 représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Sur ce graphe on constate que pour  $0.3\mu\text{m}$  et  $1.5\mu\text{m}$  le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre  $0.3$  et  $0.7\mu\text{m}$  l'absorption par l'atmosphère est faible. [3]

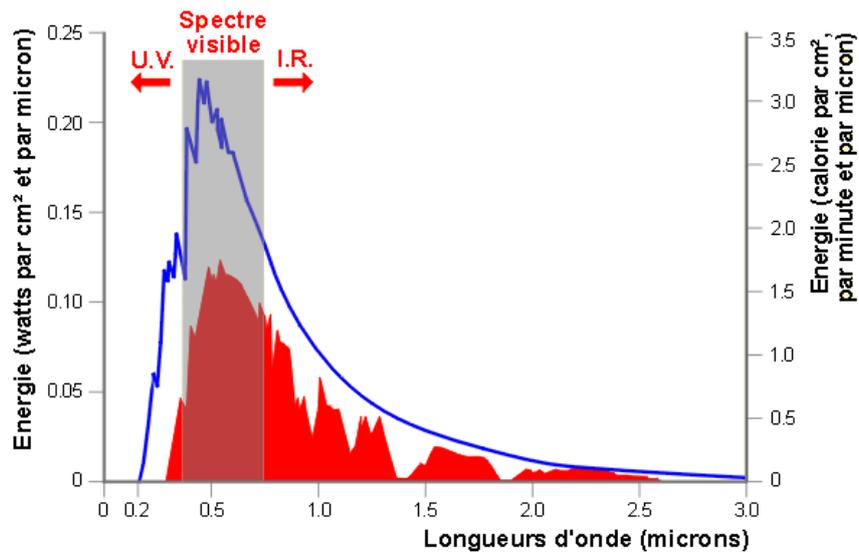


Figure I.2: Répartition spectrale du rayonnement solaire. [3]

#### I.2.2.1 Types de rayonnements :

##### A. Rayonnement direct :

Le rayonnement solaire direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

##### B. Rayonnement diffus :

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit.

##### C. Rayonnement global :

C'est la somme des deux types de rayonnements direct et diffus. (Figure I.3.)

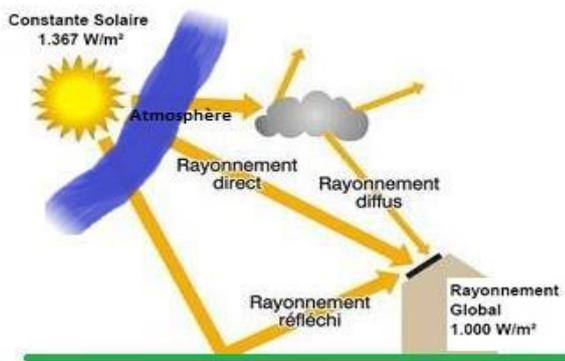


Figure I.3: Types de rayonnement solaire. [3]

### I.3. Conversion d'énergie : les différentes technologies solaires

Il existe principalement deux façons d'utiliser directement l'énergie solaire : la thermique et le photovoltaïque. (Figure I.4)[16]

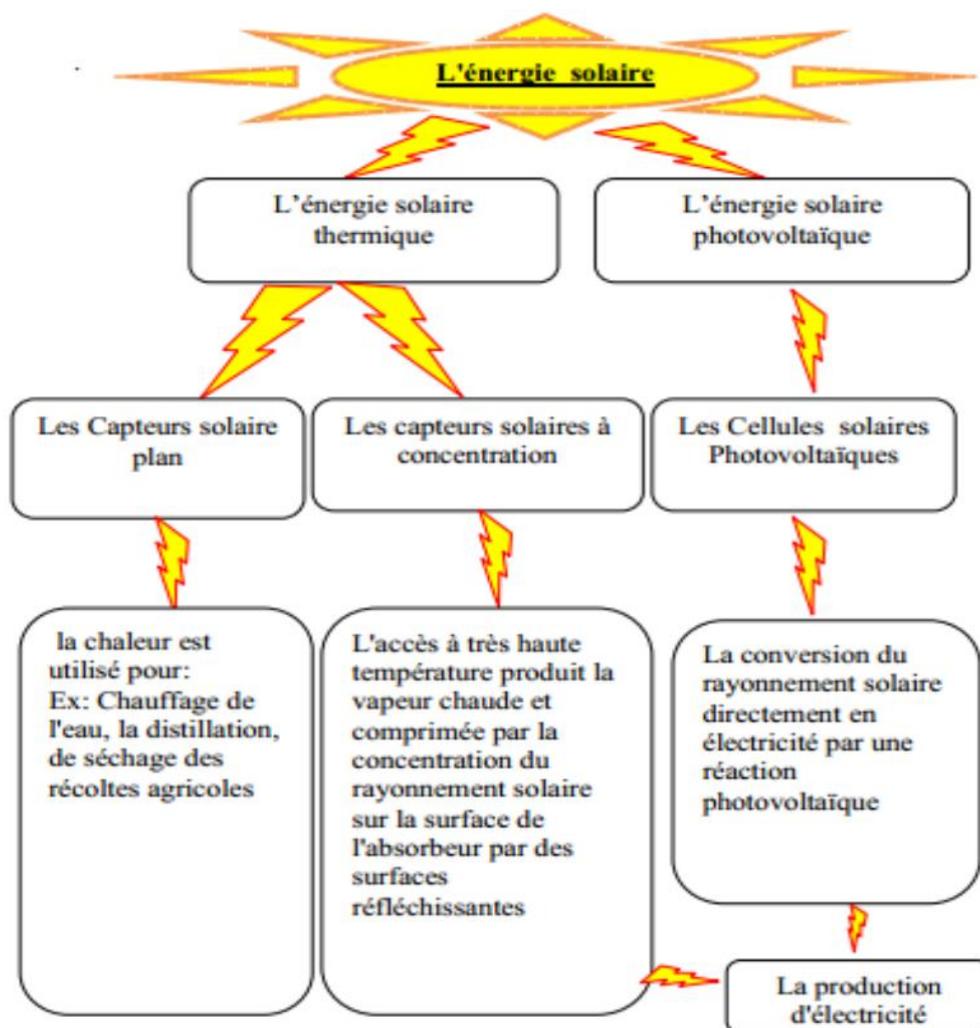


Figure I.4 : Plan de l'utilisation de l'énergie solaire. [16]

### I.3.1. Solaire photovoltaïque

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière (Figure I.5.)

Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable, alors il passe vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par un pair électron-trou, de même énergie électrique.

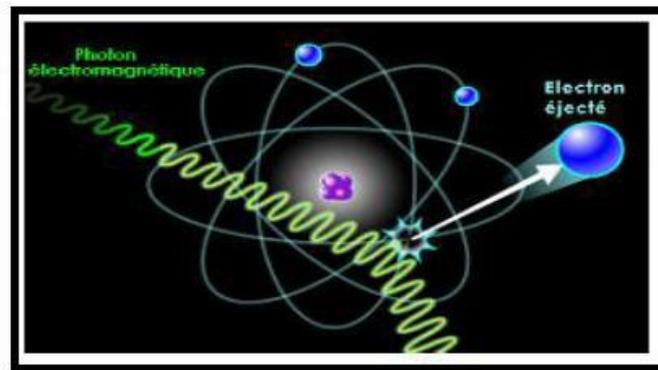


Figure I.5 : Collision entre un photon et un atome. [16]

#### I.3.1.1. Description de Cellule photovoltaïque :

La cellule PV (Figure I.6) est le plus petit élément dans l'installation photovoltaïque, elle est composée de matériaux semi-conducteurs du type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Les cellules sont raccordées entre-elles pour former des modules photovoltaïques pouvant convertir en électricité environ 15% de l'énergie solaire reçue. [8]

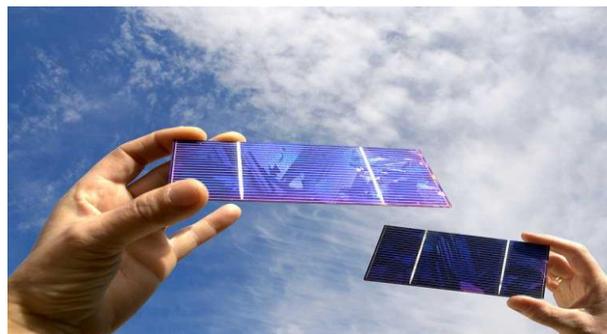
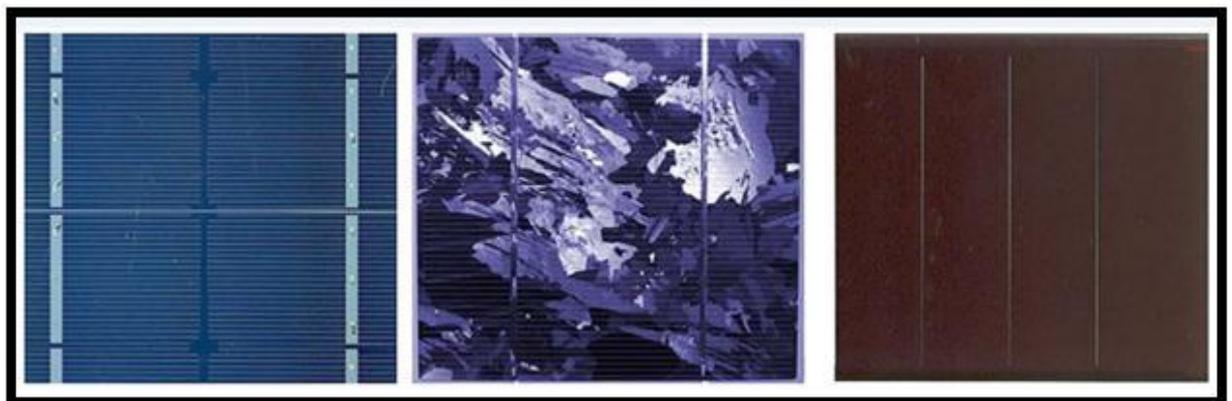


Figure I.6 : Cellule photovoltaïque. [8]

#### I.3.1.2. Types des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellule a un rendement et un coût qui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle. (Figure I.7.)

- **Les cellules monocristallines** : Elles ont le meilleur rendement mais aussi elles sont très chères, du fait que leur fabrication est compliquée.
- **Les cellules polycristallines** : Elles ont un rendement plus faible, leur conception est plus facile, leur coût de fabrication est moins important.
- **Les cellules amorphes** : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans des petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. [9]



Monocrystalline

Polycristallines

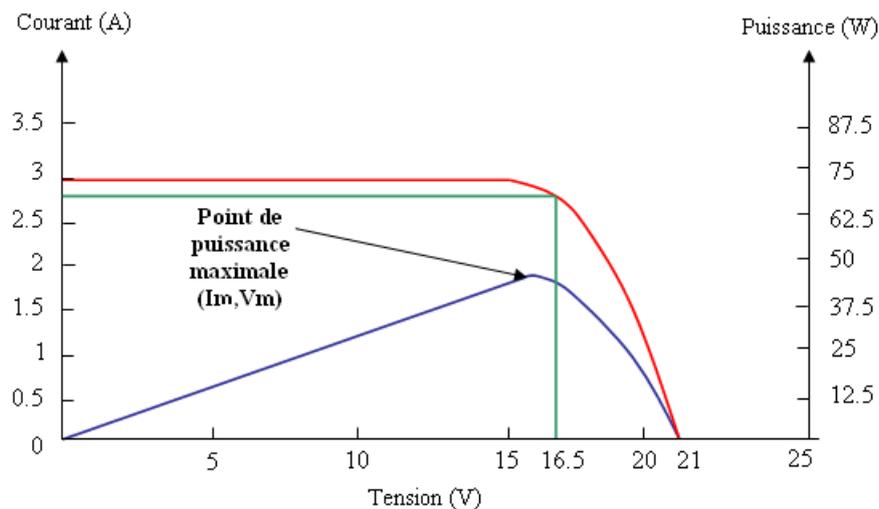
Amorphes

**Figure I.7** : Les différents types de la cellule photovoltaïque. [9]

### I.3.1.3. Les modules photovoltaïques

Chaque cellule fournit fort peu d'énergie électrique, sous une tension max de l'ordre de 0.45V environ ; il est donc indispensable de grouper ces cellules, pour obtenir une énergie exploitable, sous une tension pratique à utiliser. Généralement les cellules sont montées en série, la tension du module étant égale à la somme des tensions des cellules ; par contre, le courant est celui d'une seule cellule. [8]

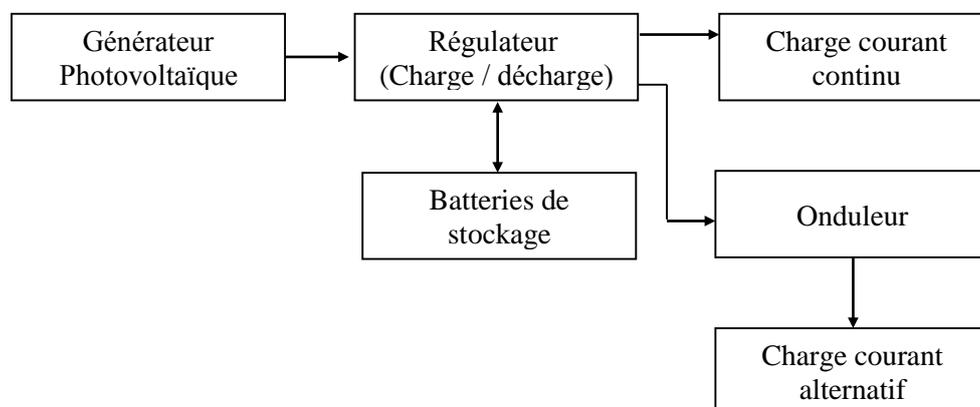
La caractéristique  $I=f(V)$  d'un module photovoltaïque est schématisée sur la (figure I.8):



**Figure I.8 :** Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ( $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $E=1000 \text{ W/m}^2$ ). [8]

#### I.3.1.4. Le système photovoltaïque

Les différents éléments constituant le système photovoltaïque (figure.1.6), générateur d'énergie électrique, sont essentiellement : le module ou le panneau solaire, la batterie d'accumulateur, le régulateur et l'onduleur. Ils sont représentés dans le schéma bloc suivant :



**Figure I.9 :** Schéma bloc d'une installation PV autonome avec stockage d'énergie.

#### I.3.1.5. Le générateur photovoltaïque

La puissance électrique crête délivrée par un module s'avérant très insuffisante, dans la majorité des applications, il faudra donc associer plusieurs modules. Ce groupement s'effectue entre des modules ayant des caractéristiques identiques pour former des associations en série ou en parallèle ou encore série parallèle. Cette interconnexion de modules entre eux définit la notion de champ photovoltaïque.

**I.3.1.6. La batterie**

Les caractéristiques de l'énergie solaire posent le problème du stockage au niveau des installations photovoltaïque. En effet, l'apport et les besoins en énergie ne coïncident pas, les besoins augmentent là où les apports solaires n'existent pas. Le moyen le plus adapté aux systèmes photovoltaïques est le stockage électrochimique. Le système le plus couramment utilisé est la batterie d'accumulateur électrochimique qui permet le stockage d'énergie électrique sous forme chimique pour la restituer sur demande grâce à des réactions réversibles.

**I.3.1.7. Le régulateur**

La batterie d'accumulateurs est l'un des éléments les plus fragiles du système photovoltaïque. En effet, une charge excessive entraîne un dégagement gazeux dû aux réactions internes, ce qui provoque l'oxydation des électrodes, de même qu'une décharge profonde provoque la sulfatation des électrodes, c'est à dire une couche blanche de sulfate de plomb qui empêche toute recharge. Afin de contrôler au mieux les conditions de charge et de décharge on intercale entre le générateur et la batterie un dispositif de régulation appelé régulateur de charge et de décharge, il est l'électronique entièrement automatique à laquelle sont reliés le panneau photovoltaïque, la batterie, ainsi que les équipements destinataire de l'électricité solaire. [11]

**I.3.1.8. L'onduleur**

Un onduleur est un dispositif électronique statique servant à convertir le courant électrique continu produit par le générateur photovoltaïque en courant alternatif (signal carré ou sinusoïdal) avec la fréquence souhaitée, dont il existe une très grande variété sur le marché.

**1.2.3. Les différents systèmes photovoltaïques**

Il existe différents types de générateurs en fonction du service et des applications recherchées:

**a. Les systèmes photovoltaïques autonomes**

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les

applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum. [12]

#### **b. Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau**

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires, ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique. [12]

#### **c. Les systèmes photovoltaïques hybrides**

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes photovoltaïques sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée ou lorsque l'énergie doit être fournie sur demande. [12]

#### **d. Les systèmes photovoltaïques au fil du soleil**

L'énergie électrique produite par les modules solaires est directement utilisée par le récepteur, il n'y a donc pas de stockage électrochimique. Généralement les générateurs au fil du soleil sont destinés à alimenter des moteurs électriques en courant continu ou alternatif (dans ce cas un appareil de conversion d'énergie est requis). [13]

### **I.3.2. Solaire thermodynamique**

On désigne par "solaire thermodynamique" l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique à travers un cycle thermodynamique. La concentration du rayonnement solaire permet de diminuer la surface de réception et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur, ainsi la température atteinte après transformation en chaleur est plus élevée que pour des dispositifs à capteurs sans concentration. [27]

#### **I.3.2.2. Les centrales à tour**

Une centrale à tour (Figure I.10 – I.11), utilise un certain nombre de grands miroirs plats qui suivent le mouvement du soleil et qui concentrent la lumière sur un grand absorbeur situé au sommet d'une tour. Le système pompe un fluide, soit une huile synthétique à haute

température ou du sel fondu, dans l'absorbeur où il est chauffé jusqu'à (550°C) et ensuite utilisé pour produire de l'électricité.



**Figure I.10** : Centrale à tour.



**Figure I.11** : Première mini Tour solaire à concentration en Algérie, Ghardaïa.

### I.3.2.3. Les éléments de la tour solaire :

#### a) La chaudière

La chaudière est un récepteur solaire qui se situe au sommet de la tour pour une meilleure réception des rayons solaire (figure I.12.) La chaudière peut atteindre une température maximale de 550°C, cette température varie en fonction de métal utilisé pour les tubes. [28]



**Figure I.12 :** Le récepteur d'une centrale solaire à tour. [28]

Le récepteur solaire contient plusieurs tubes chauffés grâce aux rayons réfléchis par le champ d'héliostats. Il réalise la fonction d'un échangeur de chaleur, ces tubes sont parcourus par un fluide caloporteur qui évacue la chaleur de la chaudière vers le cycle thermodynamique.

### b) Les Héliostats

Les héliostats (hélios, mot grec signifiant Soleil, et stat, racine de stationnaire) sont des miroirs positionnés sur les pylônes autour d'une tour dans les centrales solaires à concentration, permettant de réfléchir les rayons du soleil au sommet de la tour, durant la journée tout au long de l'année. L'héliostat se compose de deux éléments essentiels à son fonctionnement, un panneau réflecteur, un dispositif mécanique à deux moteurs qui assure le mouvement de l'héliostat, ce dernier est considéré comme la pièce maîtresse dans un champ solaire. (Figure I.13).



**Figure I.13 :** les Héliostats.

#### I.3.2.4. Réflecteur cylindro-parabolique :

Comme son nom l'indique, ce système utilise une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole (Figure I.14). La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Les températures du récepteur peuvent atteindre (400°C) et peuvent produire de la vapeur afin de fournir de l'électricité. [27]



Figure I.14 : Concentrateur cylindro-parabolique.

#### I.3.2.5. Réflecteur parabolique :

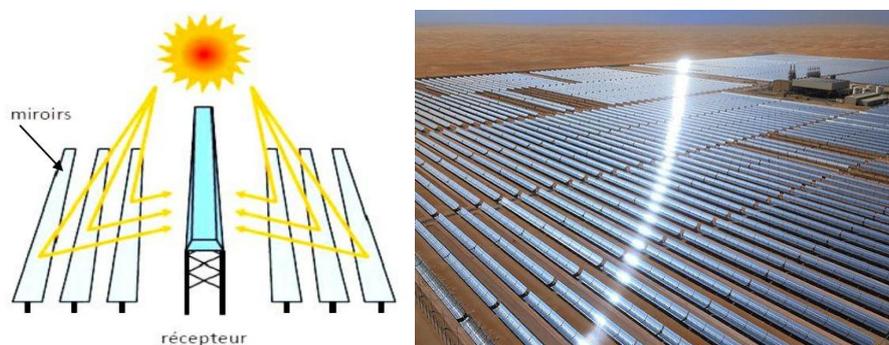
Un système à réflecteur parabolique (Figure I.15), utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur situé au foyer du récepteur. Le récepteur contient un fluide qui, lorsque les rayons du soleil le frappent, atteint une température de 750 à 1000°C. Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité dans un petit moteur fixé au récepteur. [27]



Figure I.15: Concentrateur parabolique.

### I.3.2.6. Miroirs de Fresnel

Sont des miroirs plans, Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes. (Figure I.16.)



**Figure I.16 :** Central solaire à miroirs de Fresnel

## I.4. Etat de l'art des techniques de suivi

Les panneaux photovoltaïques classiques (PV) ne sont généralement pas équipés de suiveur solaire et sont placés dans une inclinaison et une orientation fixes et bien déterminées selon le site d'installation et les conditions d'ensoleillement. Afin d'augmenter le rendement du panneau PV, on l'enrichit avec une structure portante ayant deux degrés de liberté en rotation commandée par un algorithme de poursuite solaire, elle peut se faire sur deux axes : en azimut (d'est en ouest, à mesure de l'avancée de la journée) et en hauteur (selon la saison et, de nouveau, l'avancée de la journée). L'idéal est d'utiliser un traqueur à deux axes, mais il en existe aussi avec un seul (typiquement avec un suivi seulement en azimut, l'angle par rapport au sol étant fixé selon l'optimum local, qui dépend de la latitude)

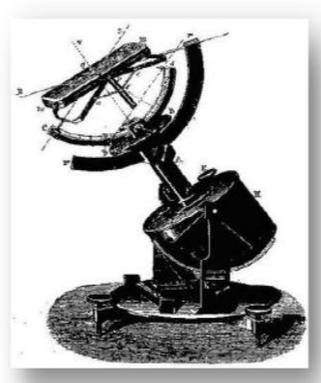
Deux systèmes différents permettent le suivi du soleil:

- Le système actif: Le système actif est muni d'une sonde d'éclairement, il permet une recherche instantanée de la position optimale. En cas de ciel couvert (rayonnement diffus), un tel système se met à l'horizontal, position dans laquelle la production est maximale par ce type de ciel.
- Le système astronomique : La position est alors directement fonction du parcours solaire préprogrammé.

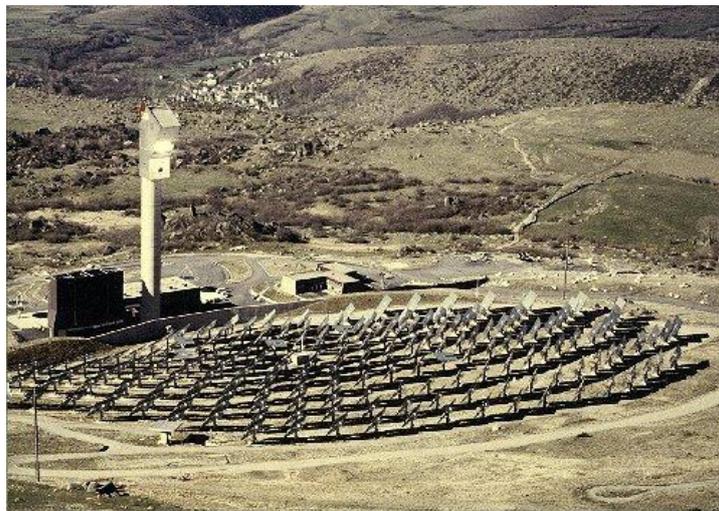
## I.5. Les premières utilisations

Les premières applications des suiveurs solaires remontent vers les années 1750 où le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat. La rotation du miroir de l'héliostat est assurée par un mécanisme d'horlogerie dont la plus ancienne mention du système se trouve dans des

publications datant de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacob 's Gravesande. Un champ d'héliostats repère le mouvement du soleil en convergeant les rayons lumineux vers un même point, concentrant ainsi la lumière incidente en employant des miroirs de réflexion, tout au long de la journée. Ce dernier se rencontre dans diverses installations utilisant l'énergie solaire, notamment les centrales solaires à concentration appelés champs d'héliostats. Un exemple en France de la centrale solaire Thémis qui après avoir fonctionné de 1983 à 1986, fait l'objet d'une nouvelle expérimentation depuis 2007. (Figure I.17.)



**Figure I.17 :** Modèle d'un héliostat dans ses premières applications.



**Figure I.18 :** Centrale thermo-solaire à taille industrielle.

#### I.4. Conclusion

Transformer la lumière en électricité grâce aux solaire PV ou thermique se fait depuis plus de 60 ans. La différence aujourd'hui, c'est que la technologie est assez bonne pour servir à grande échelle, et alimenter ainsi le réseau électrique. L'énergie solaire a de nombreux avantages : gratuite, inépuisable, non-polluante et disponible sans transport ni extraction. La dépendance aux conditions météorologiques et au cycle jour-nuit.

Le chapitre suivant trait en détail les systèmes de poursuite solaire, ce sont des systèmes automatiques dédiés pour augmenter l'efficacité des systèmes solaires que ce soit PV ou thermique.

**CHAPITRE II**

**SYSTEME DE  
POURSUITE  
SOLAIRE DANS  
LES CENTRALES**

### Introduction

Les systèmes de suiveurs solaires tournant sur un axe pour dépister le soleil, faisant face à l'Est le matin et à l'Ouest l'après-midi, ce type de suiveur a besoin d'un ajustement saisonnier d'angle d'inclinaison.

La structure du Système solaire suiveur est exposée, durant son fonctionnement à des chargements cycliques complexes dus à des conditions environnementales sévères

Les simulations sont plus faciles à établir, plus rapides, plus propres, moins chères à employer, de trouver la position optimale des outils dans la cellule et de prévoir les obstacles.

Pour simuler le comportement de systèmes solaire suiveur, on doit lui créer un modèle. Plusieurs niveaux de modélisation existent suivant les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées, à savoir modèle géométrique statique.

L'objectif du présent travail est de modéliser et étudier un système solaire suiveur.

Avant de discuter du système et de la méthode de commande, nous devons tout d'abord connaître la direction du soleil (Système solaire) afin de nous permettre un système de suivi solaire qui suit le mouvement du soleil dans le ciel et tente de maintenir le panneau solaire perpendiculaire aux rayons du soleil, en veillant à ce que la quantité maximale de lumière solaire soit incidente tout au long de la journée. Le système de suivi solaire commence à suivre le soleil dès l'aube, du jour au soir, et recommence à partir de l'aube du lendemain.

Et Nous devons également connaître certaines informations sur le système de suivi solaire afin de pouvoir effectuer un bon contrôle et que la tâche aboutisse.

Dans ce dernier cas, nous aborderons un nouveau système d'exploitation Héliostat pour une mise à l'échelle économique (la commande d'un héliostat sans fil pour réduire les coûts de câblage, simplifiant ainsi le déploiement et l'évolutivité)

Afin d'ouvrir l'entrée du troisième chapitre

## II.2. Les centrales Solaires

### II.2.1. Les centrales photovoltaïques

Une centrale solaire photovoltaïque est constituée d'un ensemble de modules solaires photovoltaïques reliés en série ou en parallèle et branchés sur un ou plusieurs onduleur(s). Les centrales solaires sont de grande puissance et installées sur des zones dédiées, à l'opposé des systèmes solaires photovoltaïques autonomes (alimentation des habitations isolés) ou des systèmes solaires décentralisé raccordé au réseau (installé sur des bâtiments à des puissances généralement inférieure à 1MWc). Ce système produit de l'électricité qui est envoyée sur le réseau. (Figure II.1.)

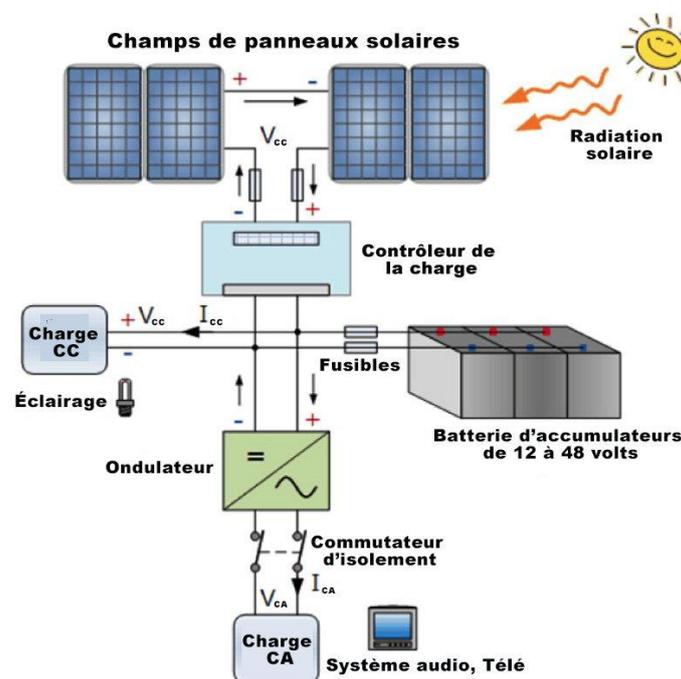


Figure II.1 : Système photovoltaïque.

### II.2.2. Les centrales solaire thermiques

Les centrales solaires thermiques utilisent les rayons lumineux du Soleil afin de les transformer en énergie thermique puis en électricité à l'aide d'une turbine.

Cette transmission suit le principe de Carnot et nécessite donc d'élever au maximum la température afin d'avoir le meilleur rendement possible. (Figure II.2.)

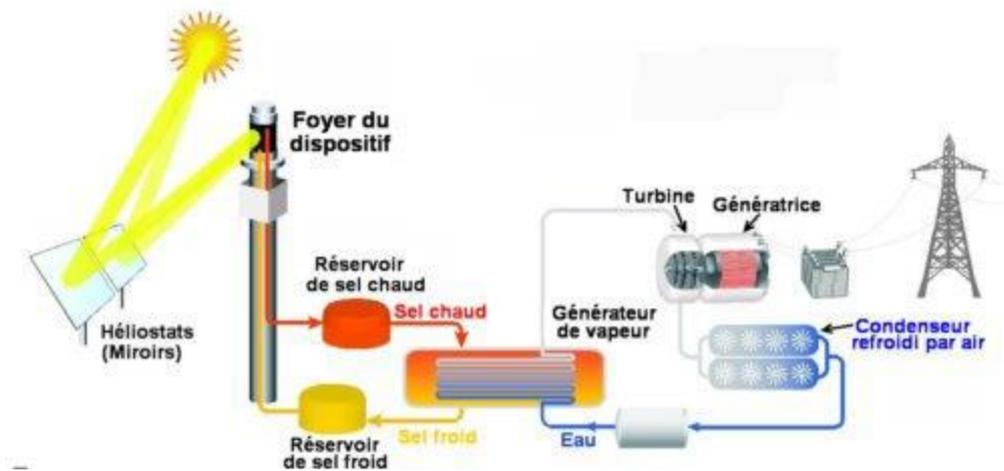


Figure.II.2 : Schéma global d'une centrale solaire thermique.

### II.3. Théorie des systèmes de poursuite solaire

#### II.3.1. Sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme est représenté sur (la figure.II.3.)

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

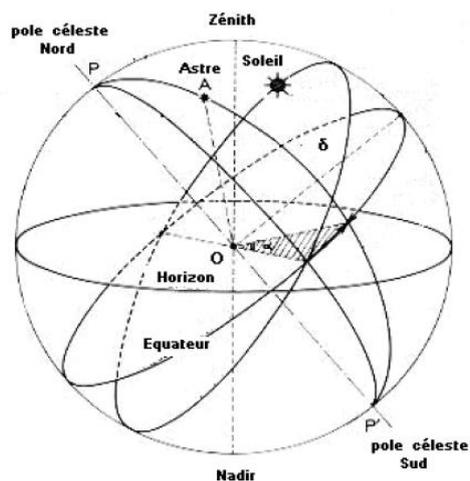


Figure.II.3: La sphère céleste.

### II.3.2. Les coordonnées célestes

#### II.3.2.1. Coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre. (figure.II.2)

##### - **Latitude**

La latitude d'un lieu ( $\phi$ ) correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à  $0^\circ$ , le pôle nord par la latitude  $+90^\circ$  et le pôle sud par la latitude  $-90^\circ$ . Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. [46] [49]

##### - **Longitude**

La longitude d'un lieu correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine  $0^\circ$ ) le plan passant par l'observatoire de *Greenwich*. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'Ouest. [49] [50]

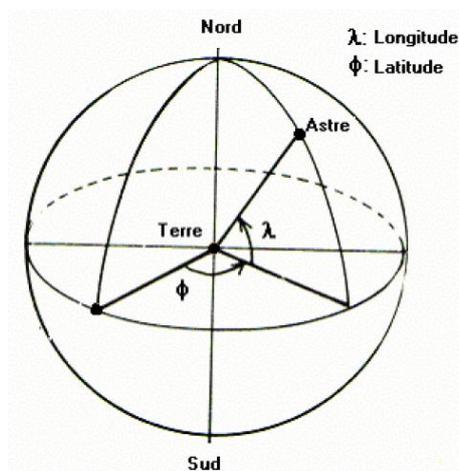


Figure.II.4 : Les coordonnées géographiques.

#### II.3.2.2. Coordonnées horaires

##### - **La déclinaison solaire ( $\delta$ )**

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre (figure.II.5). Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes :  $(-23^\circ 27')$  et  $+23^\circ 27'$  environ) et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule. [49]

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \quad (\text{II.1})$$

$n$  : Numéro du jour dans l'année.

- **Angle horaire ( $\omega$ )**

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de *Greenwich*, l'angle horaire est compris entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi et augmente de  $15^\circ$  par heure. [49] [46]

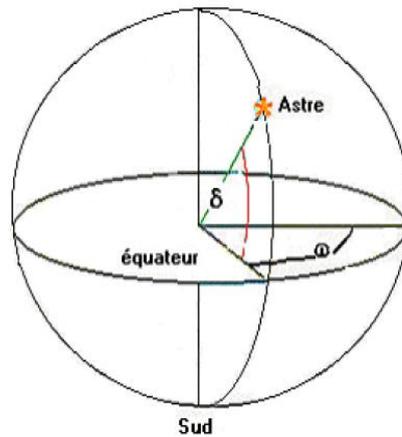


Fig.2.5. Les coordonnées horaires.

**II.3.2.3. Coordonnées horizontales**

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles (figure.II.6):

- **Hauteur angulaire du soleil ( $h_s$ )**

C'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de  $0^\circ$  (soleil à l'horizon) à  $90^\circ$  (soleil au zénith). [49][46]

- **Azimut ( $a_z$ )**

L'azimut du soleil est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut du soleil ( $a_z$ ) est représenté en fonction de la latitude du lieu ( $\varphi$ ), de la déclinaison solaire ( $\delta$ ), de l'angle horaire ( $\omega$ ) et de la hauteur du soleil ( $h_s$ ) de la manière suivante :

$$\cos(a_z) = \frac{\cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cos(\varphi)}{\cos(h_s)} \quad (\text{II.2})$$

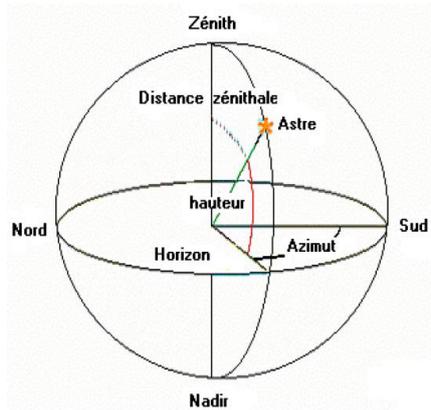


Figure.II.6 : Les coordonnées horizontales.

**II.3.3. Angle d’incidence**

L’angle d’incidence ( $\delta_i$ ) est l’angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré. Il est défini par l’inclinaison du plan ( $\beta_i$ ) et l’azimut de la normale du plan ( $\alpha$ ) (orientation du plan). Capderou [47] utilise la hauteur de la normale du plan ( $\gamma_n$ ) pour calculer le cosinus de l’angle d’incidence  $\cos(\delta_i)$ , et ce sont les angles ( $\alpha$ ) et ( $\gamma_n$ ) qui déterminent la position du plan, avec  $\gamma_n = 90 - \beta_i$ . L’angle d’incidence sur un plan quelconque est donnée par Capderou; en fonction de l’angle horaire ( $\omega$ ), par l’expression suivante: [47]

$$\cos(\delta_i) = a' \sin(\omega) + b' \cos(\omega) + c' \quad (II.3)$$

Avec :

$$\begin{aligned} a' &= \cos(\delta) [\sin(\alpha) \cos(\gamma)] \\ b' &= \cos(\delta) [\cos(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\varphi) + \sin(\gamma) \cos(\varphi)] \\ c' &= \sin(\delta) [-\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\varphi) + \sin(\gamma) \sin(\varphi)] \end{aligned}$$

Sur la figure.II.7 on trace  $\cos(\delta_i)$  en fonction de l’angle horaire pour divers plans orientés Sud, d’inclinaison ( $\beta_i$ ) variable, pour une déclinaison de  $20^\circ$  à Ghardaïa, comme suit:

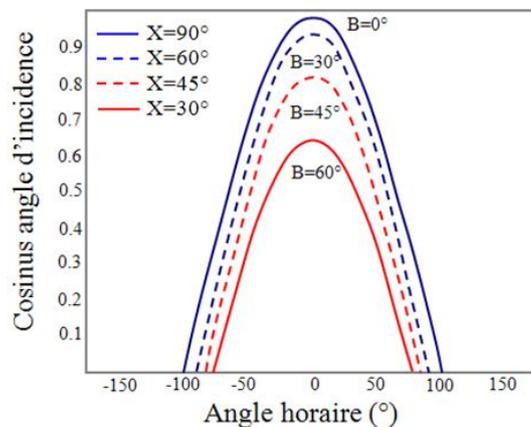


Figure.II.7: Variation de l’angle d’incidence en fonction de l’angle horaire.

**II.3.4. Suivi continu du soleil**

Des systèmes permettent de suivre la course du soleil au cours de la journée, afin de minimiser l'angle d'incidence. Il s'agit de l'angle d'incidence des rayons du soleil sur un plan lié au système, ce plan étant le récepteur lui-même ou le support du récepteur (systèmes à concentration). Ces systèmes sont classés selon le nombre d'axes (un ou deux) et le mode de suivi (continu ou quotidien) [48]. Le principe du suivi par mouvement autour d'un axe, est d'orienter à chaque instant le plan récepteur par rotation autour de l'axe de telle sorte que la normale du plan soit constamment dans le plan formé par l'axe et la direction du soleil. Avec un système à deux degrés de liberté, on peut suivre la direction du soleil pour obtenir une incidence constamment normale.

Dans les applications utilisant des systèmes à concentration qu'ils soient de type parabolique ou cylindro-parabolique, on s'intéresse généralement à un suivi du soleil continu à un seul ou deux axes en considérant les cas suivants :

Suivi continu à axe horizontal, orienté Est-Ouest (poursuite N-S) :

$$\cos(\delta_i) = [1 - (\cos(\delta) \sin(\omega))^2]^{0.5} \quad (\text{II.4})$$

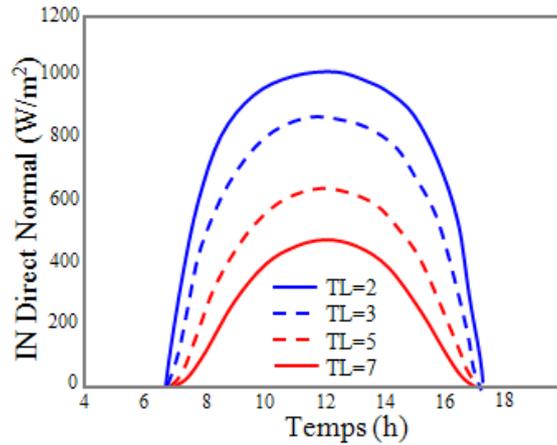
Suivi continu à axe horizontal, orienté Nord-Sud (poursuite E-O) :

$$\cos(\delta_i) = [1 - [\cos(\delta) \sin(\varphi) \cos(\omega) - \sin(\delta) \cos(\varphi)]^2]^{0.5} \quad (\text{II.5})$$

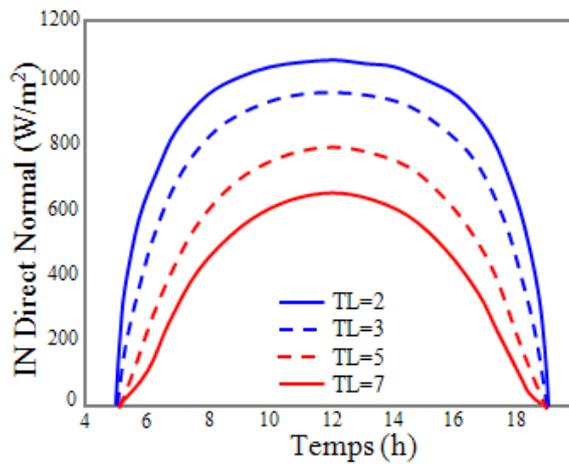
Suivi continu à deux axes (poursuite intégrale) :

$$\cos(\delta_i) = 1 \quad (\text{II.6})$$

Les variations de l'éclairement direct incident sur la surface d'ouverture d'un concentrateur solaire avec poursuite à deux axes sont représentées sur la figure. II.8 et II.9 en fonction du temps pour le site de Ghardaïa. On peut remarquer que l'énergie solaire collectée par un système à concentration augmente avec la durée du jour et elle est inversement proportionnelle aux facteurs de troubles.



**Figure.II.8:** Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de Linke et du temps pour le jour le plus court (21 Décembre) de l'année.



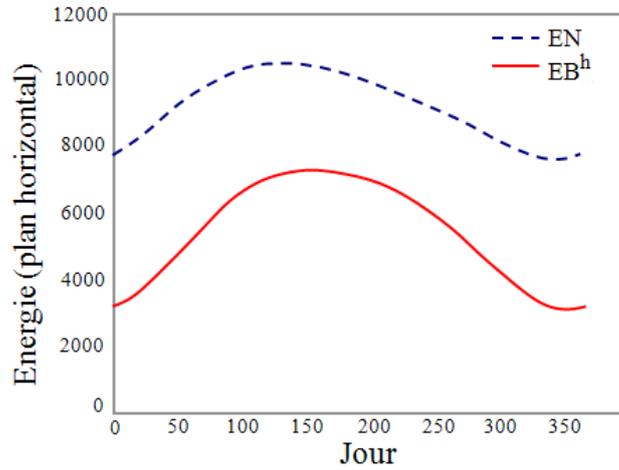
**Figure.II.9:** Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de Linke et du temps pour le jour le plus long (21 Juin) de l'année.

### II.3.5. Energie solaire reçue par un concentrateur avec poursuite solaire

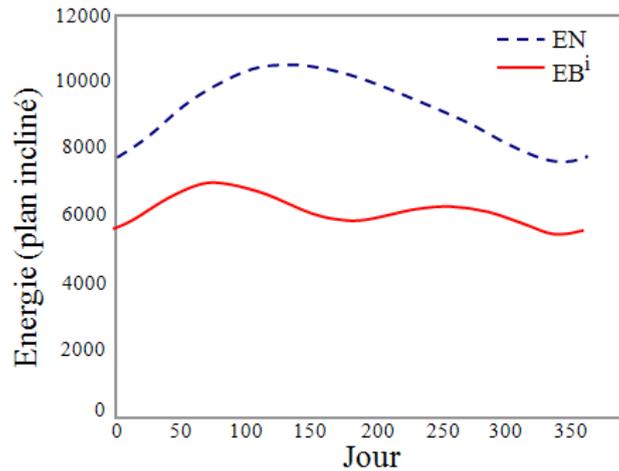
Par intégration numérique des puissances, entre le lever et le coucher effectif du soleil, on peut calculer pour un plan quelconque, les valeurs des énergies reçues : [47]

$$EB^h(\omega_{sr}, \omega_{ss}) = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} IB^h d\omega \quad (II.7)$$

La figure II.10 représente l'énergie directe journalière reçue par la surface d'ouverture horizontale d'un concentrateur solaire  $EB^h(\omega_{sr}, \omega_{ss})$  pour le site de Ghardaïa et la figure II.11 représente l'énergie journalière directe reçue par le concentrateur incliné à la latitude  $EB^i(\omega_{sr}, \omega_{ss})$  en fonction du jour.



**Figure.II.10** : Variation de l'énergie reçue (en  $Wh/m^2$ ) par un concentrateur solaire horizontal en fonction du jour.



**Figure.II.11** : Variation de l'énergie reçue (en  $Wh/m^2$ ) par un concentrateur solaire incliné à la latitude en fonction du jour.

### II.4. Poursuite solaire dans les concentrateurs

Dans les applications à la concentration du rayonnement solaire, le champ minimum est le diamètre apparent du soleil :  $\theta_s = 16'$ . La concentration maximale qu'il est théoriquement possible d'atteindre est donc :

- Pour un système à deux dimensions :

$$C_{idéal\ 2d} = \frac{1}{\sin \theta_s} = 215 \tag{II.8}$$

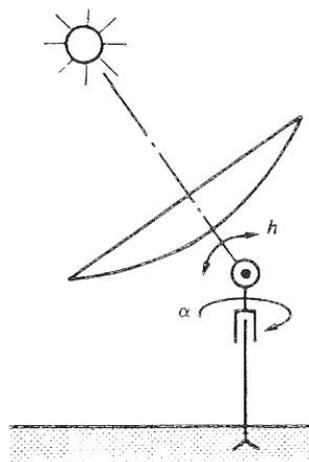
- Pour un système à trois dimensions :

$$C_{idéal\ 3d} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} = 46165 \tag{II.9}$$

Le Concentrateur doit alors toujours être pointé vers le soleil. En pratique, des concentrations de rayonnement aussi élevées ne peuvent être atteintes, même par des systèmes conçus pour avoir la concentration idéale, en raison des erreurs de pointage et des imperfections des éléments optiques.

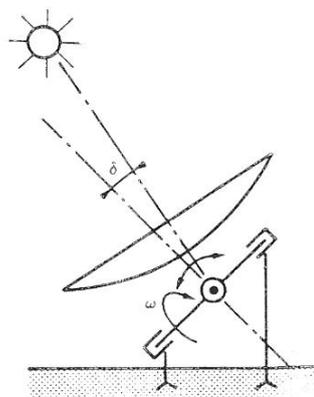
Il existe de nombreux dispositifs de poursuite solaire. Pour les systèmes à trois dimensions, on utilise généralement :

- Soit la monture altazimutale mobile autour de deux axes perpendiculaires, l'un vertical, l'autre horizontal (*figure.2.12*). Cette solution est simple à mettre en œuvre mais les mouvements de suivi du soleil sont compliqués. [46]



**Figure.II.12** : Monture altazimutale des systèmes à 3 dimensions.

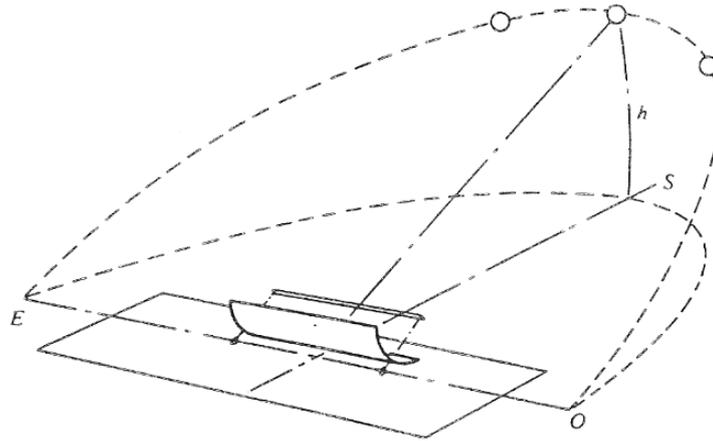
- Soit la monture équatoriale dont l'un des axes de rotation est parallèle à l'axe du monde et l'autre lui est perpendiculaire (*figure.II.13*). Cette solution est peut-être plus délicate sur le plan mécanique mais le mouvement autour de l'axe du monde est pratiquement uniforme au cours de la journée. [46]



**Figure.II.13** : Monture équatoriale des systèmes à 2 dimensions.

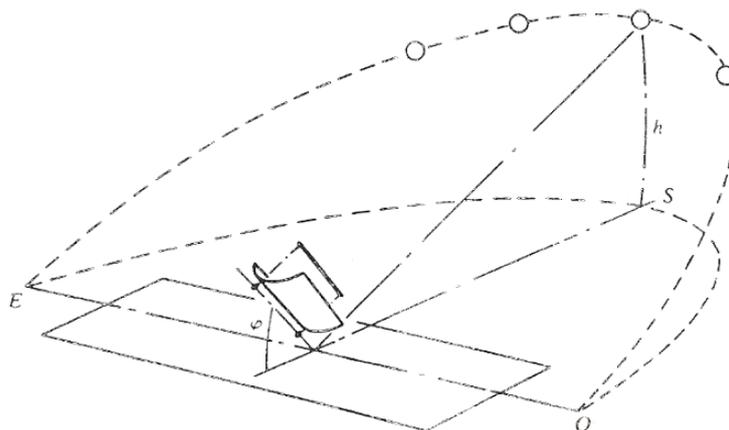
Pour les systèmes à deux dimensions, on se contente de montures plus simples. La ligne ou la bande autour de laquelle se trouve concentré le rayonnement solaire peut être orienté :

- Est-Ouest : La monture permet une orientation autour d'un axe horizontal afin de suivre les variations de la déclinaison du soleil au cours de l'année (figure.II.14). [46]



**Figure.II.14** : Monture des systèmes à 2 dimensions (Est-Ouest).

- Parallèle à l'axe du monde ; la monture permet de suivre le mouvement diurne du soleil (figure.II.15). [46]
- Nord-Sud dans un plan horizontal avec suivi du mouvement diurne comme dans le cas précédent. [46]



**Figure.II.15** : Monture des systèmes à 2 dimensions (Parallèle à l'axe du monde).

## II.5. Les suiveurs solaires

### II.5.1. Définition de suiveur solaire

Système de suiveur solaire : est un dispositif électromécanique, il a un degré de liberté, permettant de suivre le trajet du soleil donc suiveur est un système utilisant le principe de l'héliostat. [24]

### II.5.2. Type des suiveurs solaires

Le rendement des panneaux solaires peut être amélioré en suivant deux logiques. La première consiste à suivre l'azimut (c'est-à-dire la course du soleil), les panneaux doivent donc suivre le soleil d'Est en Ouest. La deuxième consiste à améliorer l'incidence des rayons solaire en ajustant la hauteur des panneaux. L'incidence des rayons solaires dépend des saisons (en hiver le soleil est en moyenne plus bas qu'en été) et de l'heure de la journée. Les différents types de suiveurs (Figure.II.16) rencontrés sur le marché sont les suivants : [25]

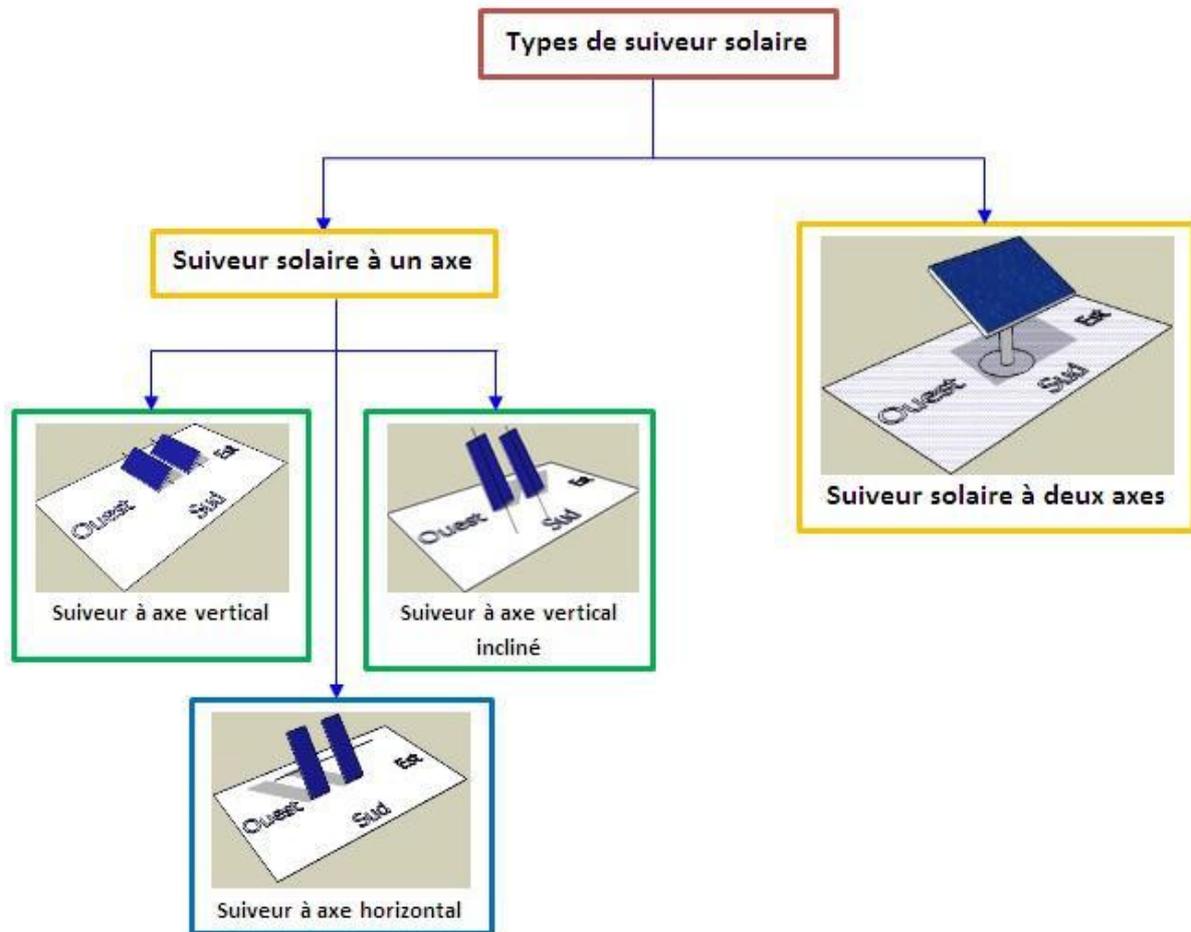
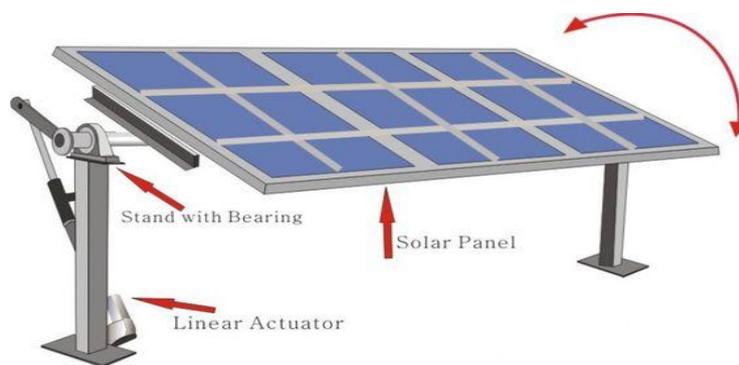


Figure.II.16: Les différents types des suiveurs solaires.

**II.5.2.1. Suiveur à axe horizontal :**

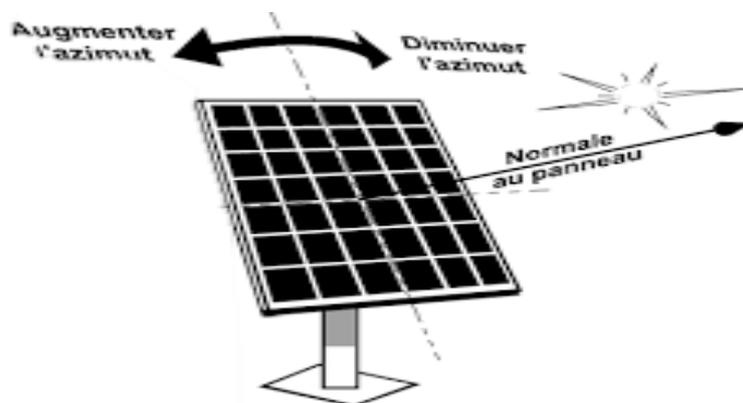
Ce type de suiveur n'apporte que très peu de gain par rapport à un système fixe. Il est plus intéressant d'utiliser des suiveurs à un axe vertical. En revanche, sa conception est la plus simple de l'ensemble des suiveurs et peut ne pas entraîner une diminution trop significative si ce type de suiveur est équipé d'un organe de régulation appelé back tracking, qui empêche d'incliner davantage les modules dès que les ranges se font mutuellement de l'ombre. Sans back tracking, en conservant de 45%, il faudrait un suiveur permettant une plage d'inclinaison allant de 10 à 30° pour obtenir la meilleure solution. Cependant, le gain resterait assez faible : de l'ordre de 2.2% (ce gain ne compense pas le surcoût).



**Figure.II.17:** Suiveur à axe horizontal.

**II.5.2.2. Suiveur à axe vertical incliné :**

Ce type de suiveur permet un gain d'environ 20%. Il est souvent moins imposant que les suiveurs à 2 axes, moins coûteux et permet d'installer plus de puissance sur un terrain donné comparé aux 2 axes. (Figure.II.18.)



**Figure.II.18 :** Suiveur à 1axe vertical incliné.

II.5.2.3. Suiveur à deux axes :

Les suiveurs à deux axes permettent un gain d'environ 30%. Ce type de suiveur est très imposant et visible de loin. (Figure.II.19.)



Figure.II.19: Suiveur à deux axes.

II.6. Les stratégies de commande d'un tracker

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. [33]

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.

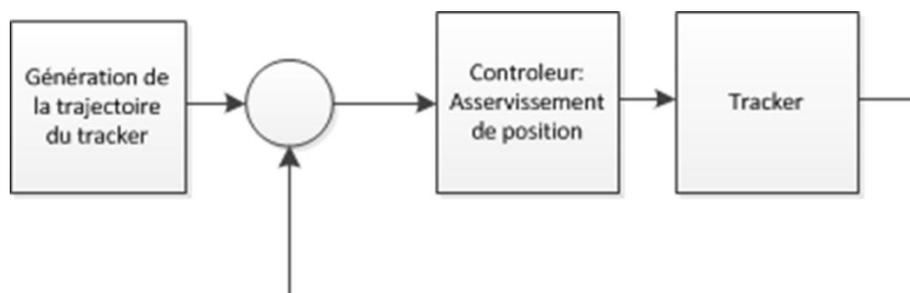
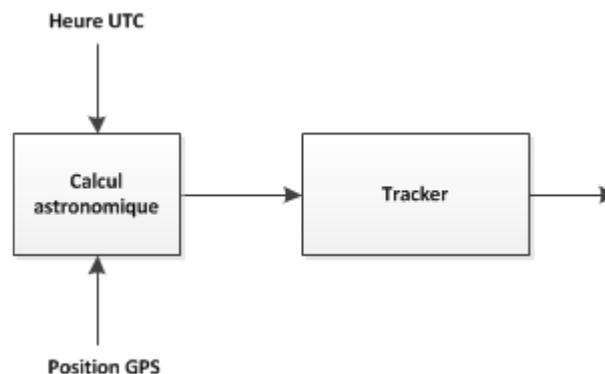


Figure.II.20: Schéma synoptique de commande d'un tracker.

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.

### II.6.1. Commande en boucle ouverte

La commande dite en boucle ouverte est une commande active de poursuite basée uniquement sur des calculs astronomiques de la position du soleil 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 angle d'inclinaison) 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.21:** Commande en boucle ouverte d'un tracker PV

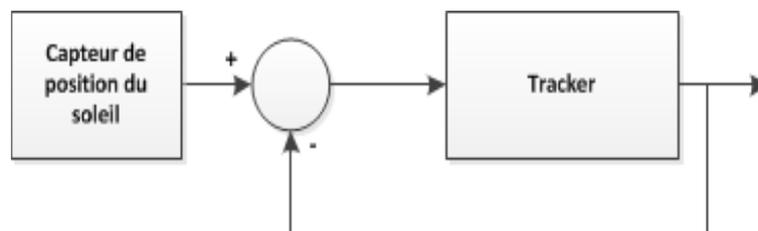
Cette commande est très utilisée dans le cas des trackers PV conventionnels qui ne nécessitent pas une grande précision de suivi. En effet, une erreur du calcul de la position théorique du tracker peut provoquer une perte en précision du suivi et l'erreur peut augmenter au cours du temps car il n'y a pas de retour ni de correction. Ces erreurs peuvent provenir des variations ou d'une erreur d'indication de l'heure fournie par l'horloge par rapport à l'heure solaire réelle ou encore d'un manque de précision des coordonnées géographiques du tracker. Par exemple, un désalignement du tracker provoqué par le vent peut aussi provoquer des erreurs de calcul et dégrader sensiblement la précision de tracking.

### II.6.2. Commande en boucle fermée

La commande dite 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 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.

Dans ce sens, propose une commande en boucle fermée basée sur un retour de la puissance instantanée produite par chaque module. L'approche proposée entre dans une optique de réduction du coût de la commande et du système d'héliostat, compatible avec les

objectifs de ces travaux, en éliminant l'utilisation du capteur solaire. Néanmoins, cette stratégie s'avère plus intéressante sur une configuration d'installation comportant un ensemble de trackers PV classiques contrôlés par une seule commande. En effet, la stratégie proposée consiste à orienter les trackers suivant la position du tracker le mieux orienté, en partant de n'importe quelle position (position aléatoire). Elle est donc moins efficace dans le cas des modules PV qui nécessitent une grande précision de suivi du soleil.



**Figure.II.22:** Commande en boucle fermée d'un tracker.

Malgré les avantages apportés par cette commande, l'utilisation du capteur solaire est contraignante car une panne du capteur (fiabilité du feedback) ou un passage de nuages (erreur de modélisation majeure) peut provoquer l'arrêt du suivi et, une fois le soleil sorti du champ de vision du capteur, l'arrêt de production.

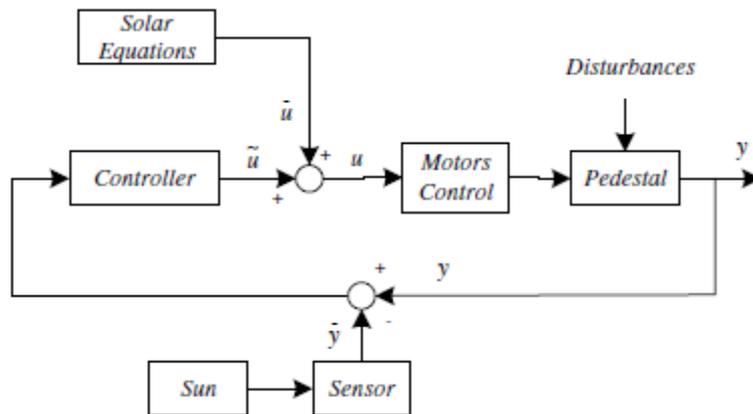
### II.6.3. Commande hybride

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. Cette commande peut être appliquée de manières différentes.

Nous retrouvons la structure classique en Automatique d'un contrôle avec boucle de régulation associée à un modèle de suivi de trajectoire, générateur des consignes de poursuite. Une première approche de commande hybride est basée sur un simple Switch entre la commande en boucle ouverte (calcul astronomique) et la commande en boucle fermée (capteur solaire). Le basculement d'une commande à l'autre est déclenché à partir d'un certain seuil d'erreur de position défini selon la technologie du module HCPV.

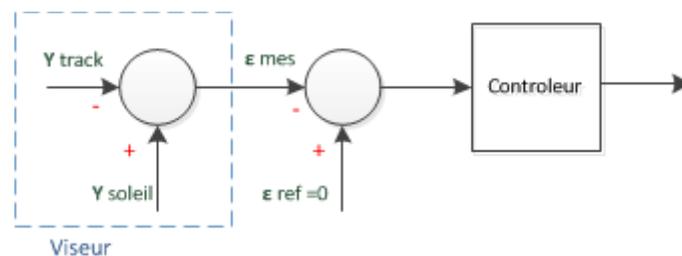
La commande hybride combine une boucle ouverte basée sur un calcul mathématique de la position du soleil et une boucle fermée basée, dans ce cas, sur l'information de puissance du module PV. Cette boucle fermée intervient pour corriger la référence de position théorique (position théorique calculée du soleil) et proposer une meilleure estimation de la position réelle du tracker par rapport au soleil. Le viseur solaire, qui intervient dans cette boucle fermée, est réellement constitué d'un composant de mesure de la position du tracker et un composant de mesure de la position du soleil afin de fournir une mesure de l'erreur, la

référence de la boucle fermée correspond à l'erreur d'alignement avec le soleil et est, dans ce cas, nulle.



**Figure.II.23:**Commande hybride d'un tracker doubles axes

Cette stratégie de commande est très recommandée dans le cas des trackers CPV et plus particulièrement HCPV, car ils nécessitent un positionnement plus précis que les trackers PV. Elle permet d'améliorer la précision en corrigeant les erreurs du calcul astronomique. Elle a l'avantage aussi de permettre un fonctionnement en mode dégradé à l'aide de sa boucle ouverte, en cas de panne du capteur solaire ou lorsque celui-ci ne délivre plus d'information en raison d'une couverture nuageuse trop importante.



**Figure. II.24 :** Analyse de la constitution de la partie viseur et référence de la commande hybride

## II.7. Conclusion

Nous avons pu voir que la trajectoire du Soleil dans le ciel, et les différents angles qu'elle adopte, sont d'une importance cruciale quand on veut faire une étude de conversion de cette source en une autre forme d'énergie utile.

Ensuite, nous avons consacré une section à la technique du suivi solaire. En le définissant, nous avons pu voir ses bases principales, avant de passer au différent type de suivi solaire. Pour finir, afin d'appuyer la nécessité de ce type de système, Le système de poursuite solaire consiste à contrôler le mouvement de rotation de l'héliostat et le commander par un programme informatique chargé dans une carte de commande sans fil.

# **CHAPITRE III**

## **REALISATION D'UN SYSTEME DE COMMANDE ET DE CONTROLE SANS FIL D'UN HELIOSTAT**

### III.1. Introduction :

Dans le précédent chapitre, nous avons vu l'importance de l'utilisation d'un suivi solaire et la commande d'un héliostat sans fil pour réduire les coûts de câblage, simplifiant ainsi le déploiement et l'évolutivité. Dans ce troisième et dernier chapitre, nous intéresser à la conception de notre propre système de gestion de fonctionnement d'héliostats, notre système est un système automatisé où il peut être défini dans ces lignes :

Il est composé de plusieurs parties :

- La partie commande (PC): elle donne les ordres et reçoit les informations de l'extérieur ou de la partie opérative.
- La partie opérative (PO): c'est la partie d'un système automatisé qui effectue le travail. Autrement dit, c'est la machine. C'est la partie qui reçoit les ordres de la partie commande et qui les exécute. Elle comporte les capteurs et les actionneurs.

### III.2. Composants utilisés

#### III.2.1. Carte Arduino UNO R3

Une carte Arduino est une petite carte électronique (5.33× 6.85 cm) équipée d'un microcontrôleur figure III.1. Le microcontrôleur permet à partir d'événements détectés par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs ; la carte Arduino est donc une interface programmable [37].

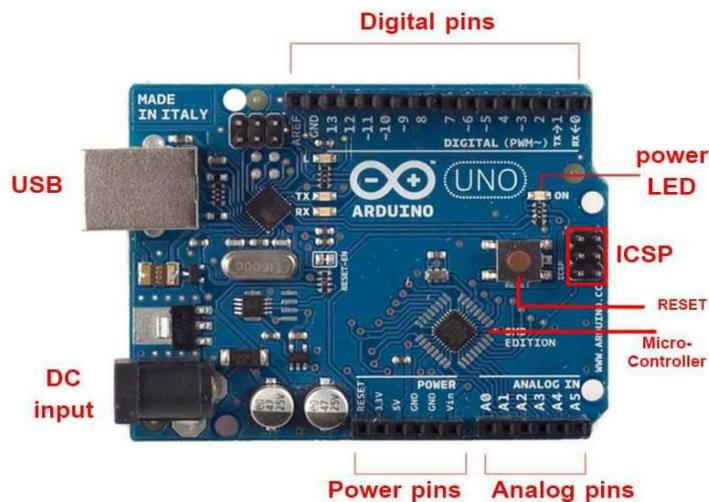


Figure.III.1 : schéma fondamental de l'Arduino.

### III.2.2. Caractéristique de la carte Arduino Uno R3

Microcontrôleur	<u>ATmega328P</u>
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 Ma
DC Current for 3.3V Pin	50 Ma
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by boot loader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25

**Tableaux.III.1.** Les caractéristiques de la carte Arduino Uno R3. [45]

### III.2.3. La carte de connexion Wi-Fi « NODEMCU ESP8255 » :

L'ESP8255 est un circuit intégré avec un microcontrôleur permettant la connexion en Wifi. Les modules intégrant ce circuit sont très utilisés pour contrôler des périphériques par Internet. L'ESP8255 est livré avec un firmware préinstallé vous permettant d'en prendre le contrôle à l'aide de « commandes AT » standards pouvant provenir d'une carte Arduino avec qui il peut communiquer par liaison série. Mais toute la souplesse et la puissance de ce module résident dans le fait que vous pouvez aussi y développer et flasher votre propre code, rendant ainsi le module entièrement autonome. (Figure.III.2) [44]

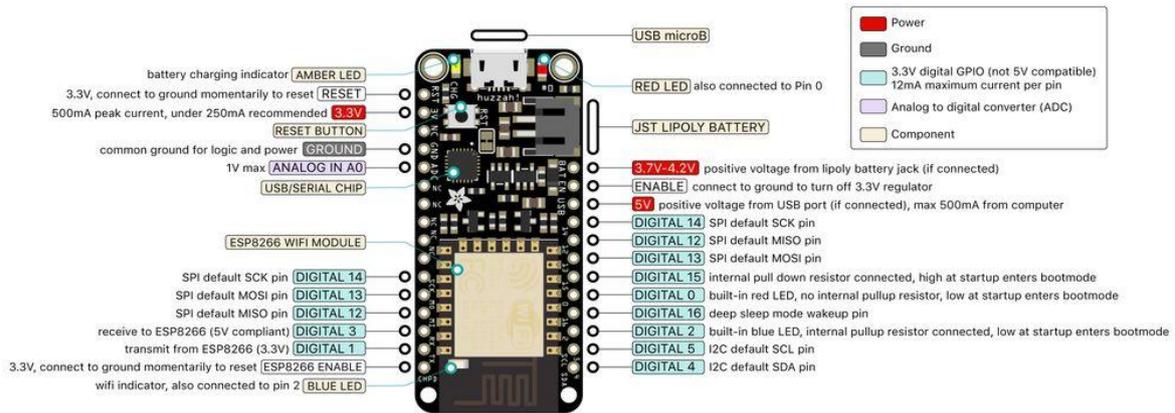


Figure.III.2 : La carte ESP8255

### III.2.4. La carte de pilotage du moteur L298N

L'Arduino ne peut pas fournir assez de courant ou de tension pour entraîner directement l'un de ces moteurs pas à pas. Pour cela, un pilote externe est requis. Ces cartes pilotes L298N piloteront un moteur pas à pas par carte. Quatre sorties numériques Arduino sont nécessaires pour piloter un seul moteur. (Figure.III.3.) [42]

Ce pilote a un circuit intégré de commande de moteur L298N, un régulateur 5V et des diodes de protection. Toutes les connexions à courant élevé sont des bornes à vis.

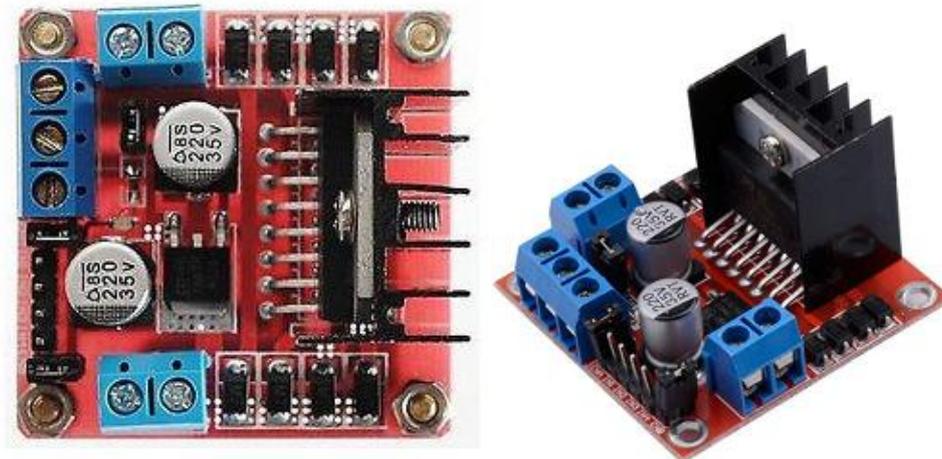
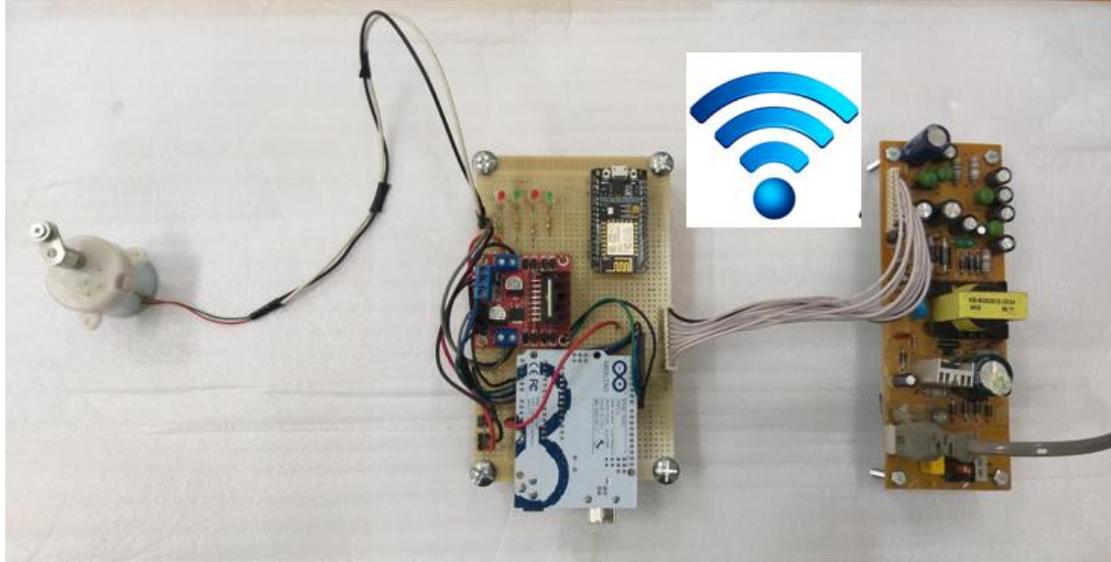


Figure.III.3 : La carte de pilotage L298N.

La carte de pilotage pas à pas peut piloter un stepper bipolaire ou jusqu'à 2 moteurs à balais DC. Il s'agit en fait d'un pilote à double pont en H. Il est conçu pour pouvoir être utilisé jusqu'à 12V ou, avec une alimentation externe de 5V, jusqu'à 46V. Il peut source / évier jusqu'à 3A max. ou 2A continu.

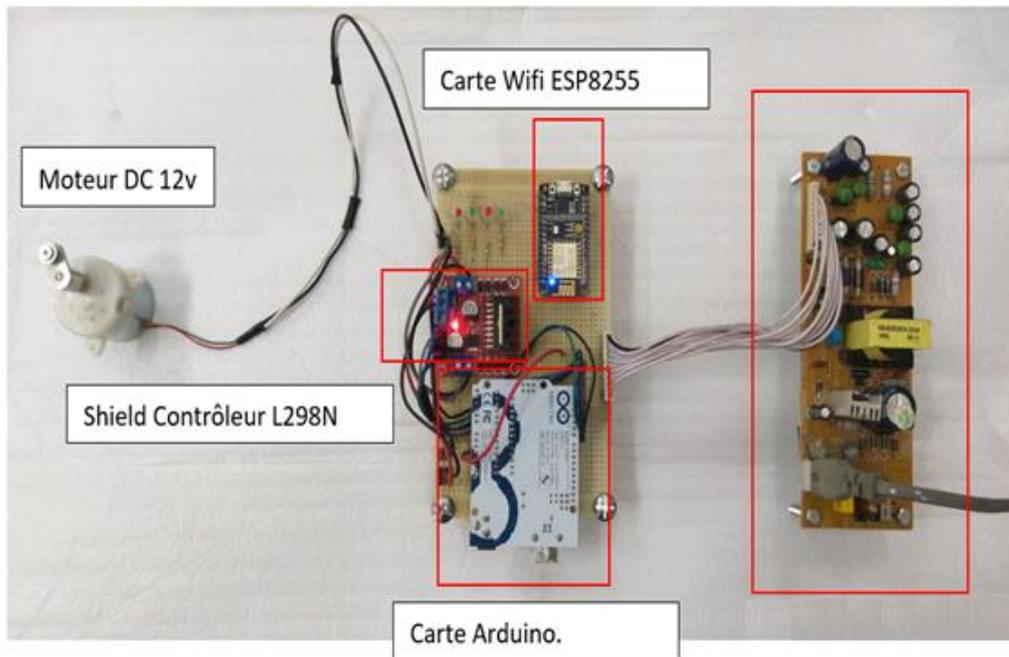
### III.3. La carte de gestion de fonctionnement d'héliostats :

La carte Arduino Uno assure la commande du deux moteurs de l'héliostat, utilisant le driver LN298N. La carte Arduino Uno est connecter à la carte NodeMcu ESP8255, afin d'échanger les informations avec n'importe quel dispositif (PC, smart phone, tablette, ...etc). (Figure.III.4.)

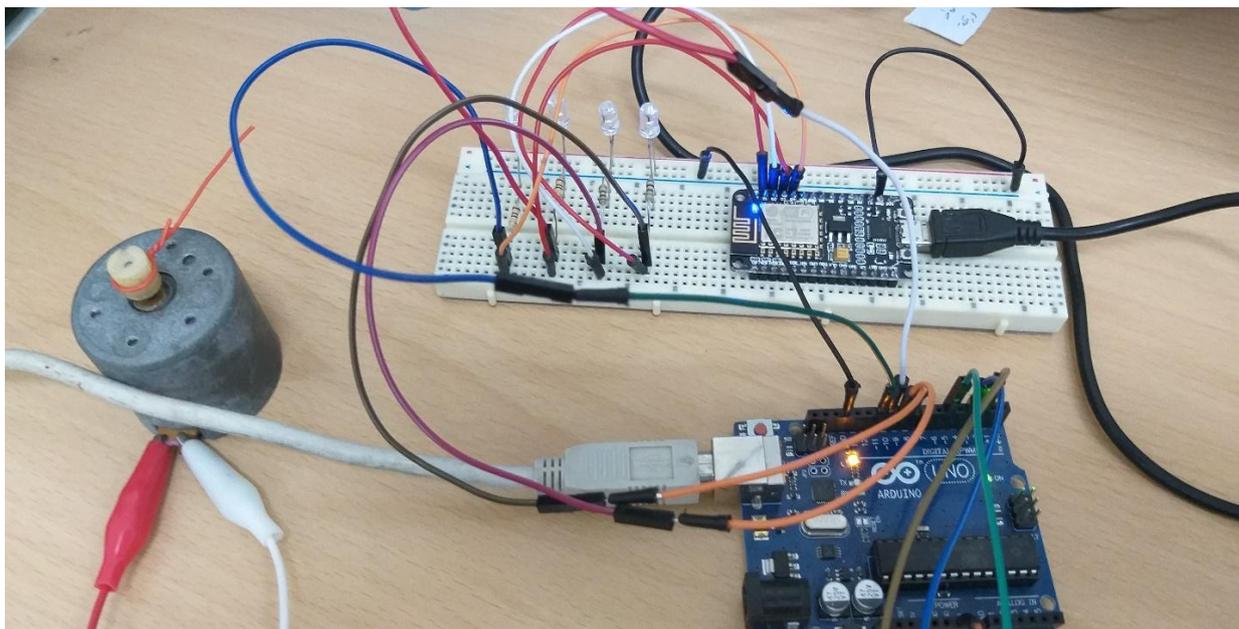


**Figure.III.4 :** Schéma synoptique de la carte réalisée.

Nous avons assemblé toutes les cartes sur un seule carte électronique, nous avons aussi ajouter une carte d'alimentation (3.3v, 5v, 12v et 30v) pour alimenter la carte NODEMCU ESP8255 avec une tension de 3.3volts, alimenter la carte Arduino Uno et la carte LN298N avec une tension de 5volts et les deux moteurs avec une tension de 12volts.( Figure III.5.)



**Figure.III.5 :** Composant de la carte finale de commande d'un système de poursuite solaire à distance WIFI.



**Figure.III.6 :** La carte de commande sur plaque d'essai.

#### III.4. Programme de gestion de la carte électronique

On peut distinguer deux parties dans le programme rédigé avec IDE Arduino, le premier consiste au programme de la carte ESP8255 qui consiste à la préparation du serveur Web et l'assurance de la connexion de tous les clients, une page Web en Html a été

programmée et intégrer dans le programme principal de la carte. Une partie de programme est dédiée à la communication entre la carte ESP8255 et la carte Arduino.

Le deuxième programme est réalisé pour la carte Arduino Uno, pour assurer en première partie la communication avec la carte ESP8255, et en deuxième partie la poursuite solaire avec la commande des deux moteurs.

```
#include <ESP8255WiFi.h>

const char* ssid = "admin_rymo ";
const char* password = "admin1234";

int M1Pin = 13;
int M2Pin = 12;
WiFiServer server (80);

void setup ()
{
  // Initialisation de la communication série
  Serial.begin(115200);
  Delay (100);
  // initialisation de la sortie pour la led
  pinMode (ledPin, OUTPUT);
  digitalWrite (ledPin, LOW);
  // Connexion wifi
  Serial.println ();
  Serial.print ("Connecting to ");
  Serial.println (admin_rymo);
  WiFi.begin(admin_rymo, admin1234);
  // connection en cours ...
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  // Wifi connecter
  Serial.println("WiFi connecter");
  // Démarrage du serveur.
  server.begin();
  Serial.println("Serveur demarrer !");
  // Affichage de l'adresse IP
  Serial.print("Utiliser cette adresse URL pour la connexion :");
  Serial.print("http://");
  Serial.print(WiFi.localIP());
  Serial.println("/");
}
void loop()
{
  WiFiClient client;
```

```

// Vérification si le client est connecter.
client = server.available();
if (!client)
{
  return;
}
// Attendre si le client envoie des données ...
Serial.println("nouveau client");
while(!client.available()){
  delay(1);
}
String request = client.readStringUntil('\r');
Serial.println(request);
client.flush();
int value = LOW;
if (request.indexOf("/COM1=ON") != -1) {
  digitalWrite(M1Pin, HIGH); // allumer la led
  value = HIGH;
}
if (request.indexOf("/COM2=OFF") != -1) {
  digitalWrite(M1Pin, LOW); // éteindre la led
  value = LOW;
}
int value1 = LOW;
if (request.indexOf("/COM3=ON") != -1) {
  digitalWrite(M2Pin, HIGH); // allumer la led
  value1 = HIGH;
}
if (request.indexOf("/COM4=OFF") != -1) {
  digitalWrite(M2Pin, LOW); // éteindre la led
  value1 = LOW;
}
// Réponse
client.println("HTTP/1.1 200 OK");
client.println("Content-Type: text/html");
client.println("");
client.println("<!DOCTYPE HTML>");
client.println("<html>");
client.print("Etat de Moteur 1: ");
if(value == HIGH) {
  client.print("On");
} else {
  client.print("Off");
}
client.print("Etat de Moteur 2: ");
if(value1 == HIGH) {
  client.print("On");
} else {
  client.print("Off");
}

```

```

client.println("<br><br>");
client.println("<a href=\\\"/COM1=ON\\\"><button>Moteur 1 ON </button></a>");
client.println("<a href=\\\"/COM1=OFF\\\"><button>Moteur 1 OFF </button></a><br />");
client.println("<a href=\\\"/COM2=ON\\\"><button> Moteur 2 ON </button></a>");
client.println("<a href=\\\"/COM2=OFF\\\"><button> Moteur 2 OFF </button></a><br />");
client.println("<a href=\\\"/COM3=ON\\\"><button> Moteur 3 ON </button></a>");
client.println("<a href=\\\"/COM3=OFF\\\"><button> Moteur 3 OFF </button></a><br />");
client.println("<a href=\\\"/COM4=ON\\\"><button> Moteur 4 ON </button></a>");
client.println("<a href=\\\"/COM4=OFF\\\"><button> Moteur 4 OFF </button></a><br />");

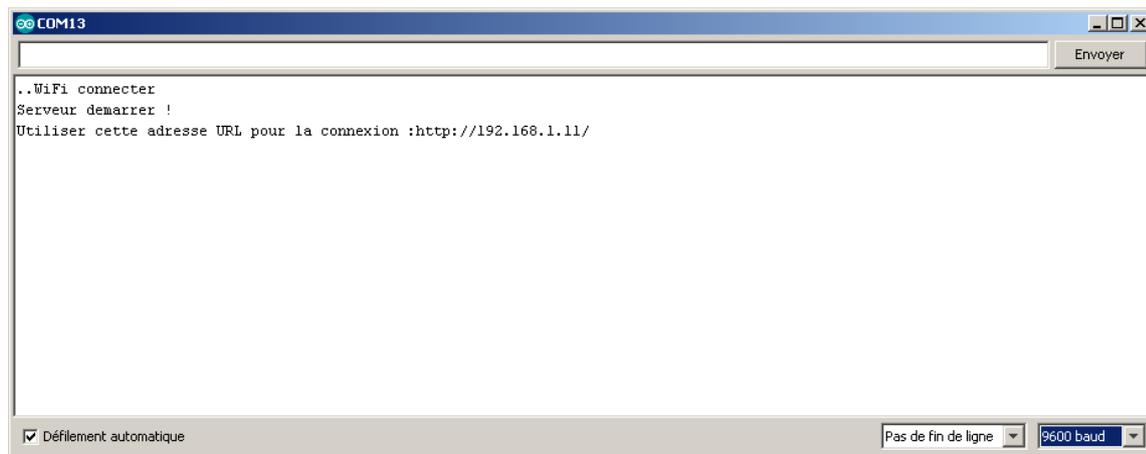
client.println("</html>");

delay(1);
Serial.println("Client deconnecter");
Serial.println("");
}

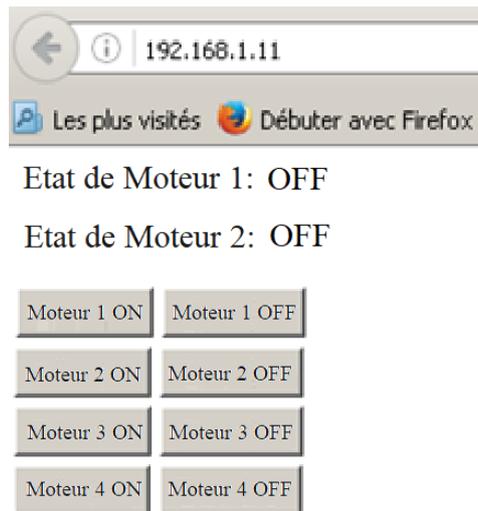
```

#### III.4.1. Test sur le système réalisé :

Pour tester le contrôle des deux moteurs, connectez-vous à l'adresse suivante 192.168.1.11 avec votre navigateur : (Figure.III.7.)



**Figure.III.7** : Contrôle de la connexion.



**Figure.III.8 :** Le système de gestion dans navigateur.

### III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné une description des différents composants de la carte électronique réalisée, la carte Arduino Uno, NodeMCU ESP8266, L298N. Après nous avons détaillée la réalisation de la carte de gestion de fonctionnement de l'héliostat.

L'objectif défini dans cette étude est de mettre en évidence que l'algorithme de programmation d'arduino+esp8255 pour la commande sans fil a les performances suivantes :

- La rapidité : peuvent avoir des temps de réponse plus rapide, L'algorithme recherché doit permettre une convergence vers le fonctionnement du l'héliostat rapide (quelques millisecondes) pour ne pas perturber la stratégie de génération de la trajectoire du suiveur solaire.
- La précision : L'étude a été effectuée sur un héliostat et a visé à la fois la rapidité, la précision et la simplicité de programmation d'arduino+esp8255.
- Minimisation des perturbations et des bruits : rejet par le calcul astronomique pour poursuivre la trajectoire du soleil et corriger l'erreur de poursuite quand elle dépasse un certain seuil.
- La stabilité : ce système est écarté de sa position d'équilibre (trajectoire), donc le système est stable.  
Une faible perturbation des conditions initiales du système engendre une faible perturbation de sa trajectoire.
- Robustesse : le système est robuste parce que le système a rempli les conditions précédentes.

# CONCLUSION GENERALE

## COLCLUSION GENERALE

---

Dans ce document nous présentons les détails d'une étude et réalisation d'une carte de commande d'un héliostat sous réseau (WIFI) dans une centrale solaire a tour.

L'objectif était de proposer et de développer une carte électronique a base Arduino + esp8255 pour la commande d'un héliostat avec une stratégie de commande permettant d'améliorer les performances de la stratégie actuellement utilisée, dite la programmation sans fil, et de réduire les coûts de conception et le coût de câblage. Afin de valider et de tester les performances de cette stratégie de commande, une programmation d'Arduino avec esp8255 a été développé, validé et mis en œuvre.

Dans un premier temps, nous avons présenté et expliqué le contexte énergétique et les systèmes solaires motivant ces travaux de recherche. Un état de l'art traitant les points les plus importants dans le domaine de la commande des héliostats.

La deuxième partie du présent document a été consacrée à l'étude et la réalisation d'un système de poursuite solaire à base d'une carte d'Arduino+esp8255, ce dernier est un microcontrôleur programmable.

Le but de cette réalisation de mettre en œuvre un système de poursuite solaire dans le but d'optimiser le système de poursuite solaire dans un champ d'héliostat.

C'est vrai que les objectifs que nous avons fixés pour ce projet ont été atteints, et que le projet a été testé, mais en perspective on compte appliquer ce système de commande sans fil dans une vraie centrale solaire afin de tester notre système à grande échelle.

# BIBLIOGRAPHIE

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] : <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/photovoltaique/photovoltaique-avantages.html>
- [2] : <dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/468/4/chapitre3.pdf>
- [3] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Automatique>
- [4] : **Lykaestria, Wikimedia Commons, cc by sa 3.0**
- [5] : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-solaire>
- [6]: [http://www.composelec.com/cellule\\_photovoltaique.php](http://www.composelec.com/cellule_photovoltaique.php)
- [7]: <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-deux-formes-du-solaire-le-solaire-photovoltaique-et-le-solaire-thermique>
- [8] : [<http://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/cellules-photovoltaiques.html>] ET [[http://www.composelec.com/cellule\\_photovoltaique.php](http://www.composelec.com/cellule_photovoltaique.php)]
- [9] : [https://www.ecosources.info/dossiers/Types\\_de\\_cellules\\_photovoltaiques](https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques)
- [10] : [<http://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/cellules-photovoltaiques.html>]
- [11] : Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques / Angel Cid Pastor
- [12] : <http://tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaique/historique-de-la-cellule-photovoltaique.html>
- [13] : **M.F.Shraif**« Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique ».
- [14] : **Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque**  
A. Ould Mohamed Yahya ,et A. Ould Mahmoud ((Centre de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables 'CRAER',  
Université de Nouakchott, Mauritanie))  
et I. Youm ((Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire, 'LASES',  
Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta DIOP, Dakar, Sénégal  
Centre d'Etudes et de Recherches sur les Energies Renouvelables 'CERER',  
B.P. 476, Dakar, Sénégal))]]
- [15] : <https://www.infoelectricien.com/2017/01/09/la-qualite-de-lenergie-definition-et-principes/>
- [16] : Mémoire HELALI KAMELIA « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative »
- [17] : <https://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/BOUZIANE-DOKKAR.pdf?idmemoire=49>
- [18] : K.G. Deepa, R. Jayakrishnan, K.P. Vi-Jayakumar, C.S. Kartha, V. Ganesan, Sol. Energy 83, 964-968 (2009).
- [19]: [https://fr.vikidia.org/wiki/Mouvement\\_apparent\\_du\\_Soleil](https://fr.vikidia.org/wiki/Mouvement_apparent_du_Soleil)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [20]: [https://cral.univ-lyon1.fr/labo/fc/cdroms/cdrom2011/reperage.../sphere\\_celeste.pdf](https://cral.univ-lyon1.fr/labo/fc/cdroms/cdrom2011/reperage.../sphere_celeste.pdf)
- [21]: <https://www.mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-solaire/lenergie-solaire-est-une-energie-photovoltaique-votre>
- [22]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale\\_solaire\\_photovolta%C3%AFque](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_photovolta%C3%AFque)
- [23]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale\\_solaire\\_thermodynamique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_thermodynamique)
- [24]: <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Tracker%20solaire/fr-fr/>
- [25]: [https://www.researchgate.net/figure/Les-differents-types-des-suiveurs-solaires-CHO\\_fig4\\_304526369](https://www.researchgate.net/figure/Les-differents-types-des-suiveurs-solaires-CHO_fig4_304526369)
- [26]: <biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/.../BOULAHBAL-AMINA.pdf>
- Mémoire « Etude et simulation du fonctionnement du système suiveur des panneaux solaires » page 11-13
- [27]: [http://ecolo.org/documents/documents\\_in\\_french/solaireThermodynRivoire/solaireThermodynRivoire.html](http://ecolo.org/documents/documents_in_french/solaireThermodynRivoire/solaireThermodynRivoire.html)
- [28]: <https://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/BELHANI-ARBAOUI.pdf?idmemoire=4908>  
page 10-11.
- [29]: <http://www.cnrtl.fr/definition/h%C3%A9liostat>
- [30]: <https://energie-developpement.blogspot.com/2012/01/production-solaire-photovoltaique.html>
- [31]: M. Haddadi « Élaboration d'une Commande pour Héliostat » Laboratoire d'Énergie Solaire Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique El Harrach Alger
- [32]: <https://electronicsforu.com/electronics-projects/solar-tracking-system>
- [33]: <https://asi.insa-rouen.fr/enseignement/siteUV/auto/didacticiel/notions/boucle.htm>
- [34]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_automatis%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_automatis%C3%A9)
- [35]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur\\_solaire\\_photovolta%C3%AFque](https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_solaire_photovolta%C3%AFque)
- [36]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_pas\\_%C3%A0\\_pas](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_pas_%C3%A0_pas)
- [37]: [www.techmania.fr/arduino/Decouverte\\_arduino.pdf](http://www.techmania.fr/arduino/Decouverte_arduino.pdf)
- [38]: <https://definition-simple.com/cable-usb/>
- [39]: <https://www.robot-maker.com/forum/tutorials/article/39-utiliser-une-plaque-dessai-ou-breadboard/>
- [40]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fil\\_%C3%A9lectrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fil_%C3%A9lectrique)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [41] : [asi.insa-rouen.fr/enseignants/enseignement/siteUV/auto/cours/cours4.pdf](http://asi.insa-rouen.fr/enseignants/enseignement/siteUV/auto/cours/cours4.pdf)
- [42] : <https://arduino-board.com/arduino/stepper-motor?>
- [43] : <http://makerspace56.org/testeur-de-moteur-pas-a-pas/>
- [44] : <https://f-leb.developpez.com/tutoriels/arduino/esp8266/debuter/#LI>
- [45] : Site Internet : <http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/solaire.htm> Consulté, 20/06/2019
- [46] : K. Ogilvie, L'abc des technologies de l'énergie renouvelable, Pollution Probe, Canada, septembre 2003.
- [47] : S. Balac, Débuter avec matlab, INSA de Lyon, France, 2001.
- [48] : A. Labouret, Energie solaire photovoltaïque, DUNOD, France, 302 pages, 2003.
- [49] : Site Internet : <http://www.futura-sciences.com/>, 2007.
- [50] : S. Balac, Débuter avec matlab, INSA de Lyon, France, 2001.