

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche  
scientifique



Université Saad Dahlab de Blida

Faculté de la Technologie

Département des Énergies Renouvelables

Spécialité : Énergies Renouvelables

Option : Conversion Photovoltaïque

## *Projet de fin d'étude de Master*

### *Thème*

---

**Étude et réalisation d'un système de Fresnel équipé d'un  
suiveur solaire alimenté par un panneau photovoltaïque**

---

Présenté par : Chikhar Mohamed Wassim

Douida Samy

Soutenu le 12 juillet 2022

Présidente : Mme Halima Mazzouz

Examinateur : M. Doumaz Toufik

Examinateur : Mme Amerouche Badia

Promoteur : Pr B. Chekane

Co-promoteur : M.Said Noureddine

Maitre de conférences à l'université Saad Dahleb Blida.

Maitre-assistant à l'université Saad Dahleb Blida.

Maitre de conférences à l'université Saad Dahleb Blida.

Professeur à l'université Saad Dahlab Blida.

Chercheur au centre de recherche CDER.

## Dédicace

*Avant tout, nos sincères remerciements reviennent à Allah le tout-puissant pour tous ses dons.*

*Je dédie ce travail aux êtres qui me sont les plus chers au monde.*

*A mes très chers parents en témoignage de ma reconnaissance pour leur patience, leur tendresse, leur sacrifice et leur soutien tous au long de mes études, aucun mot ne pourra exprimer ma gratitude et mon estime pour vous. Que Dieu vous garde pour moi.*

*A ma grande Mère*

*A mes frères ADEL, HANI et ANIS pour leur appui, leur encouragement.*

*A mes professeurs et les enseignants du département des énergies renouvelables.*

**Wassim**

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers :

A Mes chères parents que j'adore et qui se sont sacrifiés toujours pour me voir réussir.

A mes très chères sœurs que j'aime bien.

A mes chers amis qui ont été toujours à mes côtés, surtout Ben Zerrouk Madani et le Doctorant Mahiou Abdelmadjid.

Je remercie tous les gens qui m'ont assuré le transport, le matériel pour mon mémoire.

Et à tous ceux qui m'ont encouragé et m'ont aidé à achever mon mémoire.

SAMY

## **Remerciements :**

Nous tenons à remercier tout particulièrement Mme H.Mazzouz Maitre de conférences à l'université Saad Dahleb Blida pour avoir accepté de présider le jury de notre mémoire .

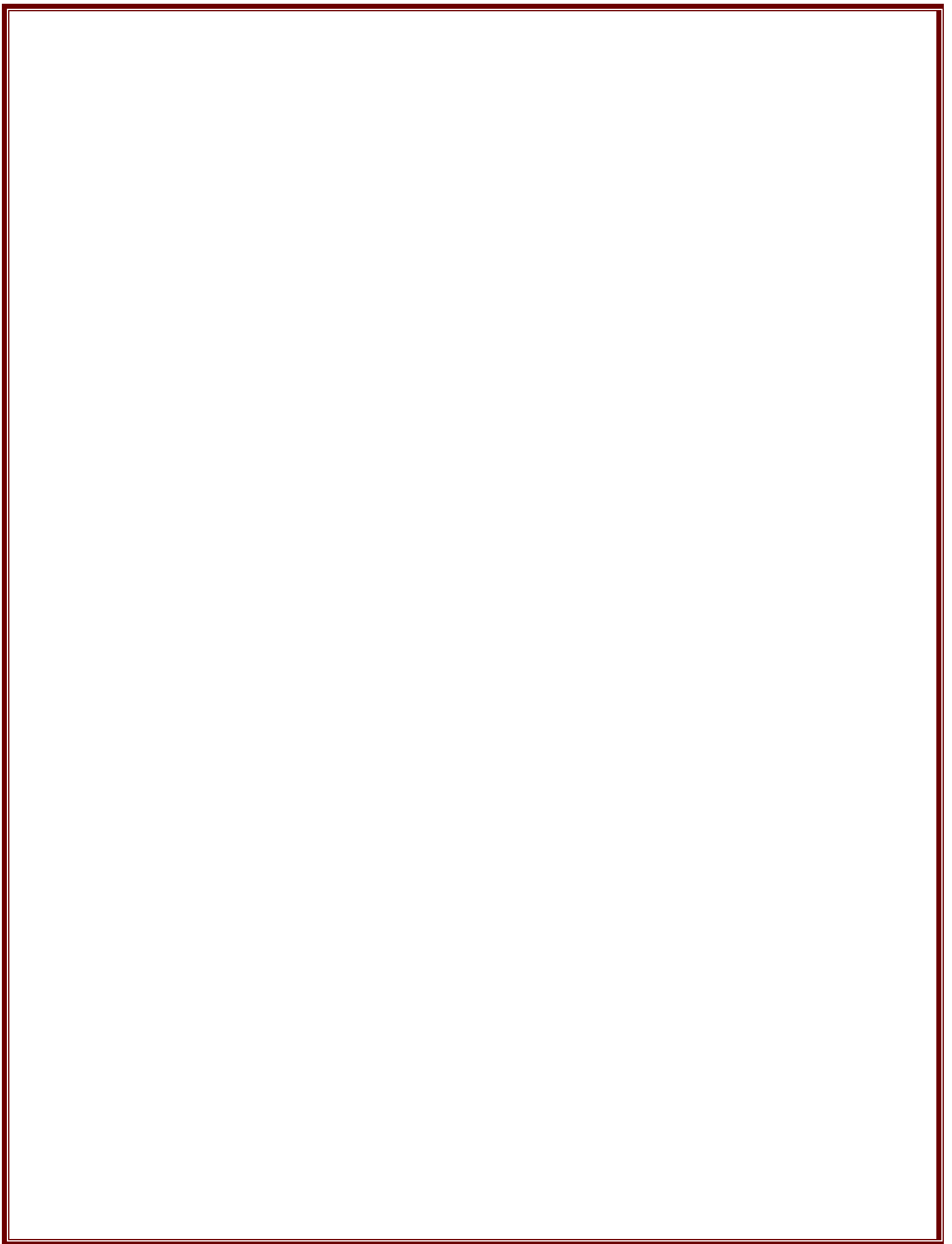
Nous tenons également à remercier Mr T.Doumaz Maitre-assistant à l'université Saad Dahleb Blida d'avoir accepté d'examiner notre travail et pour son aide le plus précieux , pour la partie expérimentale à travers ces judicieuses analyses et conseils .

Nous tenons également à présenter nos plus vifs remerciements à Mme B.Amerouche Maitre de conférences à l'université Saad Dahleb Blida pour avoir accepté d'examiner notre travail , pour ces questions et ces encouragements

Nos remerciements les plus distingués à notre encadreur Mr B. Cheknane Vice-recteur de l'Université Saad Dahlab de Blida, d'avoir proposé un sujet de recherche très intéressant, pour sa patience, son soutien, ses remarques, ses encouragements et sa disponibilité permanente.

Nous remercions également notre Co-promoteur Mr Saïd Noureddine Chercheur au Centre de développement et recherches des énergies renouvelables pour ses suivis et ses précieuses orientations dans notre travail.

Nous exprimons nos reconnaissances à toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail nos enseignants, nos collègues de promotion Conversion Photovoltaïque 2022.



## ملخص

تعمد معالجة مياه الصرف على استخدام مواد ماصة متجددة. في هذا السياق ، أنشأنا نظام Fresnel مجهزًا بمتعقب شمسي يعمل بواسطة لوحة كهروضوئية مستقلة. تجاوز النظام المنتج 1000 درجة مئوية وقام جهاز تعقب الطاقة الشمسية بتحسين كسب الطاقة. لقد سمحت لنا الألواح الشمسية بالحصول على نظام بيئي ومستقل تمامًا.

## *Résumé*

L'épuration des eaux usées consista en utilisant des adsorbants régénérés. C'est dans ce cadre qu'on a réalisé un système de Fresnel équipé d'un suiveur solaire alimenté par un panneau photovoltaïque autonome. Le système réalisé a dépassé les 1000°C et le suiveur solaire a permis d'améliorer le gain énergétique. Le panneau solaire nous a permis d'avoir un système totalement autonome et écologique.

**Mots Clé :** Régénération des adsorbants – Système de Fresnel – Suiveurs solaires – eaux usées – panneau photovoltaïque.

## *Abstract*

Wastewater treatment consisted of using regenerated adsorbents. It is in this context that a Fresnel system has been created equipped with a solar tracker powered by an autonomous photovoltaic panel. The system produced exceeded 1000°C and the solar tracker improved the energy gain. The solar panel has allowed us to have a totally autonomous and ecological system.

## **Key words:**

Adsorbent regeneration - Fresnel system - Solar trackers - wastewater - photovoltaic panel

# Table des matières

1	CHAPITRE 1 L'ÉNERGIE SOLAIRE.....	20
1.1	Introduction .....	20
1.2	Le soleil : .....	20
1.3	Mouvement de la terre autour du soleil : .....	20
1.4	Avantages et inconvénients l'énergie solaire : .....	21
1.5	Potentiel énergétique solaire en Algérie : .....	21
1.6	Coordonnées solaires : .....	22
1.6.1	Coordonnées horaires : .....	22
1.6.2	Coordonnées horizontales du soleil : .....	25
1.7	Cordonnées terrestres : .....	26
1.7.1	La longitude ( $\lambda$ ) : .....	26
1.7.2	L'altitude : .....	26
1.7.3	Latitude : .....	27
1.8	Composition du rayonnement solaire:.....	27
1.8.1	Le rayonnement Solaire : .....	27
1.8.2	Répartition spectrale du rayonnement solaire: .....	27
1.8.3	Composants du rayonnement solaire : .....	28
1.8.4	Les différents Instruments de mesures du rayonnement solaire : .....	29
1.9	Les Capteurs solaires : .....	30
1.9.1	Capteur plan : .....	30
1.9.2	Capteur solaire a tube sous vide : .....	32
1.9.3	Capteur solaire à concentration : .....	34
1.9.4	Les capteurs solaires hybrides photovoltaïques thermiques : .....	37
	Conclusion.....	38
2	CHAPITRE 2 ÉTUDE THÉORIQUE DES LENTILLES DE FRESNEL LES PANNEAUX PV ET LES SUIVEURS SOLAIRE	
	40	
2.1	Introduction : .....	40
2.2	La lentille de Fresnel .....	40
2.2.1	Description .....	40
2.2.2	Considération Géométrique et optique : .....	41

2.3	Modules Photovoltaïques : .....	45
2.3.1	Généralités : .....	45
2.3.2	Cellules solaires : .....	46
2.3.3	Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :.....	48
2.3.4	Courant de court-circuit : .....	50
2.4.1	Tension circuit-ouvert (Voc): .....	50
2.4.2	Caractéristique I-V : .....	51
2.4.3	Puissance débitée : .....	52
2.4.4	Calcul du Facteur de forme : .....	52
2.4.5	Calcul du Rendement : .....	52
2.5	Analyse paramétrique : .....	53
2.5.1	Influence de l'éclairement : .....	53
2.5.2	Influence de la température : .....	53
2.5.3	Influence des résistances série et shunt : .....	54
2.6	Systèmes de poursuite solaire .....	55
2.6.1	Généralités : .....	55
2.6.2	Types de poursuite solaire : .....	56
2.4	Conclusion : .....	58
<b>3</b>	<b>CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET RÉLISATION</b> .....	<b>60</b>
3.1	Introduction : .....	60
3.2	Caractéristiques des composants utilisées : .....	60
3.2.1	Caractéristiques de la Lentille de Fresnel : .....	60
3.2.2	Caractéristiques des composants du suiveurs Solaire : .....	61
3.3	Étapes de la réalisation : .....	67
3.3.1	Réalisation du prototype du Système de Fresnel : .....	67
3.3.2	Raccordement du système de Fresnel avec le Panneau Pv : .....	67
3.3.3	Réalisation du suiveur solaire : .....	68
3.2.4	Le système solaire que nous avons réalisé : .....	69
<b>4</b>	<b>CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS</b> : .....	<b>72</b>
4.1	Introduction : .....	72
4.2	Mesure de la température : .....	72
4.3	La Mesure de la température entre la lentille de Fresnel et le foyer : .....	74



4.4	Température maximale atteinte :.....	75
4.5	La mesure des tensions, intensités du courants et la puissance produite par le panneau solaire :.....	76
4.6	La régénération des adsorbants :.....	79
4.7	La régénération thermique : .....	79
4.8	L'effet de la chaleur produite par le système de Fresnel sur les adsorbants :....	80
4.9	Conclusion :.....	81
	Bibliographie : .....	85
	Annexes.....	90

## **Nomenclature :**

- $\alpha$  : l'angle d'altitude du soleil.
- A: Ampères.
- Ac: Courant Alternative.
- AM: masse d'air.
- $\theta$  : angle d'ouverture.
- $\beta$  : angle d'inclinaison .
- $C^{\circ}$  : degré Celsius.
- $C_t$  : la correction de la distance terre soleil.
- cm: centimètre.
- D : Diamètre.
- DC: Courant continues.
- $E_g$ : Energie de Gap.
- f : distance focale.
- #f : Le nombre d'ouverture.
- FF : Facteur de Forme.
- g : gramme.
- Gw : Gigawatt.
- h : hauteur du soleil.
- HSAT : Suiveurs horizontaux à seul axe.
- $H_{opt}$  : Le rendement optique.
- hz: hertz.
- I : courant.
- $I_{cc}$ : courant de court-circuit.
- $I_d$ : Courant de Diode.
- $I_0$ : courant de saturation de la diode.
- $I_{mp}$ : courant maximale.
- $I_{ph}$ : Photo-courant.
- J : jour.
- k : la constante de Boltzmann.
- KB: Kilo bites.

- K : Kelvin.
- Km<sup>2</sup>: Kilomètre carré.
- kwc: kilo Watts crête.
- kwh : Kilo watts heures.
- LDR: Photo resistance.
- LFR : collecteur de Fresnel linéaire.
- m: La masse.
- mAh : milli ampères heures.
- Mhz: Megahertz.
- ms: milliseconde.
- m<sup>2</sup> : mètre au carré.
- mm: millimètre.
- η : rendement .
- MO: Matière Organique.
- Ω : ohms.
- φ<sub>ref</sub>: Flux lumineux de référence 1000 [W/m<sup>2</sup>].
- P : Puissance.
- Pi Π : 3.14.
- PV : Photovoltaïque.
- Pm : Puissance maximale.
- PMMA : polyméthacrylate de méthyle.
- PSAT : suiveurs à un seul axe et à alignement polaire.
- PWM : Pulse Width modulation .
- ρ : la masse volumique.
- q : charge de l'électron C.
- R<sub>s</sub> : Résistance série.
- R<sub>sh</sub> : Résistance shunt.
- s : seconde.
- STC: Standard Test Conditions.
- δ : La déclinaison .
- T : Température (K).

- $T_c$  : Température de la cellule [K].
- $T_h$  : Thermique.
- $T_w$  : TéraWatts.
- TWh: TéraWatts heures.
- $\mu m$ : micro meter.
- $\mu_{Icc}$  : Coefficient de température de court-circuit de la cellule [A/K] .
- $V$  : volts.
- $v$ : tension.
- $V_{co}$ : Tension circuit-ouvert.
- $V_{mp}$  : tension maximale.
- $w$ : watt.
- $W_c$ : Watt Crete.
- $\omega$  : l'angle horaire .
- $X$  : Le taux de concentration.
- $X_{th}$  : Le taux de concentration théorique.
- $\lambda$ : Longitude .
- $z$  : angle d'azimut solaire.
- $Z_s$  : Angle d'azimut de la surface.

# Liste Des Figures :

## Chapitre 1 :

Figure 1-1 : L'orbite de la terre autour du soleil et la position de l'axe de la terre pendant une année. ....	23
Figure 1-2 : Représentation de l'angle d'altitude du soleil avec l'horizon .....	24
Figure 1-3 : Plan montrant l'angle d'azimute solaire .....	24
Figure 1-4 : Définition de la latitude, de l'angle horaire et de la déclinaison solaire. ....	25
Figure 1-5 : Angle incidence. ....	26
Figure 1-6 : Analyse spectrale du rayonnement global solaire . ....	28
Figure 1-7 : Composants du rayonnement solaire . ....	29
Figure 1-8 : Schéma d'un collecteur solaire plan . ....	31
Figure 1-9: Capteur solaire plan. ....	32
Figure 1-11 : Schéma d'un capteur solaire a tube sous vide .....	33
Figure 1-10 : Un capteur solaire à tube sous vide.....	33
Figure 1-12 : Collecteur linéaire de Fresnel .....	35
Figure 1-13 : Composants d'un collecteur de Fresnel linéaire .....	35
Figure 1-14 : Diagramme d'un collecteur parabolique .....	36
Figure 1-15: Schéma d'un capteur solaire parabolique .....	36
Figure 1-16 : Schéma d'un collecteur photovoltaïque thermique (PVT) plat et couvert. ....	38

## Chapitre 2 :

Figure 2-1 : Lentille de Fresnel .....	41
Figure 2-2 : Distance entre de la lentille de Fresnel et l'objet .....	42
Figure 2-3 : (a) : Passage d'un rayon à travers une lentille de Fresnel (b) : Déviation des rayons par un prisme.....	42
Figure 2-4 : Découpage d'une lentille plan convexe .....	44
Figure 2-5: Composants d'un panneau solaire.....	46
Figure 2-6: Cellule en silicium monocristallin. ....	47
Figure 2-7 : Cellule amorphe .....	47

Figure 2-8 : Cellule en silicium ploy-cristallin. ....	48
Figure 2-9 : Schéma de la cellule idéale. ....	
Figure 2-10 SCHÉMA ÉLÉCTRIQUE DUNE CELLULE IDÉALE .....	49
Figure 2-11 : La représentation de la courbe du courant de court-circuit.....	50
Figure 2-12 : Caractéristiques (I-V) d'une cellule PV. ....	51
Figure 2-13: Influence de l'éclairement sur la cellule PV .....	53
Figure 2-14 : Influence de la température sur la cellule PV .....	54
Figure 2-15 : Système de suivi du soleil à deux axes avec changement de l'angle d'azimut $\alpha_w$ et de l'angle d'inclinaison $\beta$ . ....	56
Figure 2-16 : Suiveur solaire a un seul axe .....	57

## Chapitre 3:

Figure 3-1 : Lentille de Fresnel rectangulaire PMMA de dimensions 15*15 Cm.....	61
Figure 3-2 : Image du servo-moteur (MG996R) utilisé.....	61
Figure 3-3 : Carte d'Arduino (Uno) utilisée. ....	62
Figure 3-4 : Schéma du capteur photorésistance utilisé (LDR). ....	63
Figure 3-5 : Photographie du panneau solaire utilisée.....	63
Figure 3-6: Image des batteries en Li-ion utilisé (L'Ultrafine 7800 mAh 18650). ....	64
Figure 3-7: Image du capteur utilisé INA219 utilisé. ....	65
Figure 3-8 : illustration du régulateur que nous avons utilisé.....	66
Figure 3-9 Écran d'affichage utilisé pour notre réalisation SSD1306. ....	67

## Chapitre 4 :

Figure 4-1 : Graphe représentant la variation de la température au cours de la journée du 29 Juin 2022.....	73
Figure 4-2 : Graphe représentant la variation de température en fonction de de la distance entre le foyer et la lentille de Fresnel.....	75
Figure 4-3 : Schéma représentant la distance entre le foyer et la lentille de Fresnel.....	75
Figure 4-4 Image montrant la température maximale atteinte.....	76

Figure 4-5 : La courbe qui représente la variation de la tension au cours de la journée...	78
Figure 4-6 : La courbe qui représente l'intensité du courant en fonction des heures choisie. ....	78
Figure 4-7 : Le graphe représentatif des puissances résultantes en fonction des heures choisies.....	78
Figure 4-8 techniques développées pour la régénération des adsorbants. ....	79
Figure 4-9 : Photographie des adsorbants utilisés avant la régénération .....	80
Figure 4-10 : Adsorbant après régénération.....	80

## Liste des tableaux :

### Chapitre 1 :

Tableau : 1-1 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire .....	21
Tableau 1-2 : Potentiel Énergétique solaire en Algérie .....	22
Tableau 1-3 : Répartition spectrale du rayonnement solaire .....	27
Tableau 1-4 : Les Différents instruments de mesures du rayonnement solaire .....	29

### Chapitre 4 :

Tableau 4-1 : Température générée par le système de Fresnel.....	72
Tableau 4-2 : Mesure de la température entre lentille de Fresnel et le foyer.....	74
Tableau 4-3 : Tableau représentant la variation du courant, la tension et la puissance produite par le panneau photovoltaïque pour la journée du 29 juin 2022. ....	76

# **Introduction Générale**



## **Introduction générale :**

L'énergie est une nécessité dans tous les aspects des activités humaines et le développement de chaque nation dans ce monde.

Avec l'assèchement croissant des combustibles fossiles et leurs conséquences néfastes sur l'atmosphère qui ont mis les économies nationales dans le défi de rechercher des ressources renouvelables. Plusieurs sources d'énergie peuvent être envisagées pour prendre le relais. Parmi les possibilités, on peut citer le solaire, l'éolien, la géothermie, l'hydroélectrique, la biomasse hydroélectrique, biomasse etc... Dans la mesure où ces énergies sont exploitées dans le respect de l'environnement et de la société. [1]

L'énergie solaire est la plus importante source d'énergie renouvelable. Elle présente de nombreux avantages car elle est inépuisable voir l'énergie la plus abondante sur terre.

L'énergie solaire est à présent exploitée selon deux techniques : la conversion du rayonnement solaire en électricité par des panneaux photovoltaïques et sa transformation en chaleur par des capteurs thermiques [2], ces systèmes permettent de générer de l'énergie solaire à l'aide de miroirs ou de lentilles pour une grande quantité de rayonnement sur une petite surface afin d'exploiter l'intensité du flux thermique par la suite dans plusieurs applications telles que la production d'électricité, le chauffage, le dessalement et la purification de l'eau, les systèmes de refroidissement et de climatisation.

Ce travail de mémoire consiste à trouver une solution et réaliser un système de Fresnel équipé d'un suiveur solaire alimenté par un panneau photovoltaïque.

Ce système sera utilisé pour produire une énergie thermique de haute température à partir de l'énergie solaire pour régénérer les adsorbants qui seront par la suite utilisés pour la purification des eaux usées.

Le but du premier chapitre consiste à présenter un rappel et une description sur l'énergie et le gisement solaire et ses paramètres. On le termine ensuite par une présentation générale des capteurs solaire.

Le chapitre 2 : Tout d'abord, nous avons présenté une description des lentilles de Fresnel et des modèles mathématiques géométriques et optiques associés aux lentilles de Fresnel. Ensuite, nous avons présenté une description des caractéristiques électriques des systèmes Photovoltaïque (circuit électrique équivalent, les différents paramètres photovoltaïques, l'influence de la température et de l'éclairement sur le rendement en fonction de la caractéristique I (V)). Et enfin, nous avons finalisé avec une description des suiveurs solaires (leurs types ainsi que leurs principes de fonctionnement).

Le chapitre 3 a été consacré à la conception de notre système où nous avons présenté les caractéristiques de tous les composants utilisés ainsi que les étapes de la réalisation.

Le dernier chapitre est dédié à une étude expérimentale des différentes mesures de température courant, tension et puissance produite et à la discussion des résultats obtenus sur l'effet température sur la régénération des adsorbants.

Ce mémoire est ainsi finalisé par une conclusion générale, où les différents travaux réalisés sont mis en valeur tout en illustrant les perspectives de notre travail.

# **Chapitre 1 : L'Énergie solaire**

# 1 L'Énergie Solaire

---

## 1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la production de l'énergie électrique, énergie thermique et des notions fondamentales sur l'élément clé de cette production : l'énergie solaire et l'énergie renouvelable.

## 1.2 Le soleil :

Le soleil est une étoile qui émet une énorme quantité d'énergie, appelée énergie solaire ou rayonnement solaire. Seule une partie de cette énergie atteint la terre et son atmosphère mais, c'est tout de même une quantité considérable. Les experts ont calculé qu'à tout moment, la terre intercepte environ 180 106 GW. [3] Cette énergie est principalement utilisée pour la production d'électricité par les systèmes photovoltaïques (PV) et pour la production de la chaleur à travers les systèmes solaires thermiques à concentration. [4]

Le soleil émet des radiations électromagnétiques comme un corps noir ayant une température de surface d'environ 6000 K. Ceci est dû à la réaction nucléaire qui se déroule en son sein, où le soleil transforme l'hydrogène en hélium. [5]

## 1.3 Mouvement de la terre autour du soleil :

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse. La distance moyenne terre-soleil varie de : 144 (le 21 décembre) à : 154 millions de km (le 21 juin). La correction de la distance terre-soleil (sans dimension) peut être calculée comme suit : [6]

$$Ct = 1 + 0.034 \cos(j - 2) \quad (1.1)$$

Où (j) est le numéro du jour de l'année, allant de 1 du 1er janvier au 365 le 31 décembre.  
[6]

## 1.4 Avantages et inconvénients l'énergie solaire :

Les avantages et inconvénients de l'énergie solaire sont présentés au tableau (1.1)

*1-1 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire*

<u>Avantages</u>	<u>Inconvénients</u>
<ul style="list-style-type: none"><li>• L'énergie solaire est une énergie propre non-polluante et renouvelables.</li><li>• Réduction de la dépendance à l'égard du pétrole et des combustibles fossiles.</li><li>• Les systèmes d'énergie solaire nécessitent très peu d'entretiens dont la majeure partie consiste à nettoyer la saleté et les débris qui peuvent s'y trouver.</li><li>• Les systèmes solaires ne font absolument aucun bruit. En revanche, les machines géantes utilisées pour pomper le pétrole sont extrêmement bruyantes et donc très peu pratiques.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• La production dépend de la température et la météo du jour.</li><li>• Faible rendement des systèmes solaires.</li><li>• Coût élevé des matériaux des systèmes solaires et leurs installations.</li><li>• Pas de production durant la nuit.</li><li>• Dépendance de la localisation géographique.</li></ul>

## 1.5 Potentiel énergétique solaire en Algérie :

L'Algérie dispose d'un potentiel énorme en énergie solaire, en raison de l'immensité de son territoire d'une part, et de sa situation géographique d'autre part. C'est l'un des plus riches champs solaires au monde, si l'on considère que la quantité d'énergie reçue par

## Chapitre 1 : L'énergie solaire

---

mètre carré est de 5 kWh, sur la plupart des parties du territoire national, et parfois jusqu'à 7 kWh. [7] L'Algérie reçoit une moyenne de 3000 heures/an de rayonnement solaire annuellement. Elle possède le plus important potentiel solaire du bassin méditerranéen (169440 TWh/an). La moyenne de la quantité d'énergie solaire reçue dans les régions côtières est de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an, tandis qu'elle est de 1900 kWh/m<sup>2</sup>/an sur les hauts plateaux et de 2650 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le Sahara. [8]

Tableau 1-2 : Potentiel Énergétique solaire en Algérie [9]

Zones	Zone côtière	Hauts plateaux	Sahara
Surface (%)	4	10	86
Zone (Km <sup>2</sup> )	95.27	238.174	2.048.297
Durée moyenne d'ensoleillement quotidien (h)	7.26	8.22	9.59
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650
Densité de l'énergie solaire journalière (kWh/m <sup>2</sup> )	4.66	5.21	7.26

### 1.6 Coordonnées solaires :

#### 1.6.1 Coordonnées horaires :

Nous pouvons définir les coordonnées horaires à partir de la déclinaison  $\delta$  et de l'angle horaire  $\omega$  :

##### 1.6.1.1 L'angle horaire $\omega$ :

L'angle horaire est l'angle de rotation de la terre à partir du midi solaire. Comme la terre tourne à 360°/24 heures = 15°/h. L'angle horaire est positif le soir et négatif le matin. [10]

$$\omega = (\text{heure local} - 12)15^\circ$$

(1.2)

### 1.6.1.2 La déclinaison $\delta$ :

La déclinaison est l'angle entre la trajectoire du Soleil et le plan équatorial (est le plan d'orbite de la terre autour du soleil). [10]

Les déclinaisons au nord de l'équateur (été dans l'hémisphère nord) sont positives, et celles au sud sont négatives.

La déclinaison varie de 0 à partir de l'équinoxe de printemps à + 23,45 au solstice d'été, 0 à l'équinoxe d'automne et -23,45 au solstice d'hiver.

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left[\frac{360}{365}(j + 284)\right] \quad (1.3)$$

Où(J) le nombre du jour (j=1 le 1 janvier).

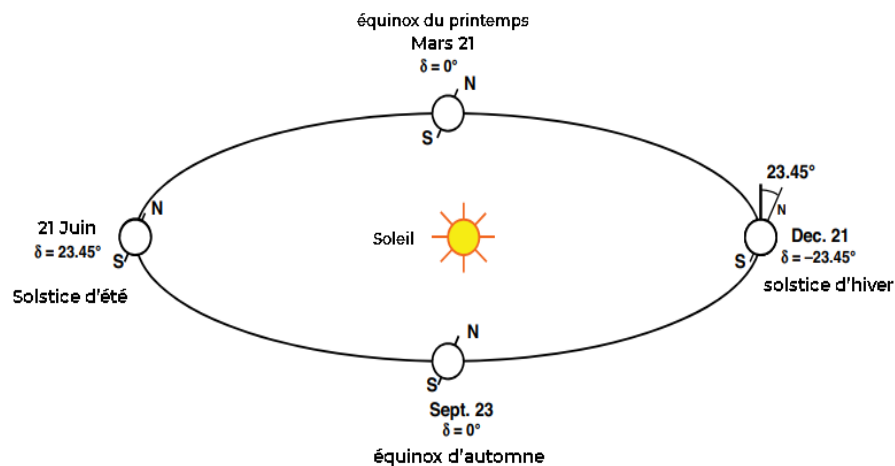


Figure 1-1 : L'orbite de la terre autour du soleil et la position de l'axe de la terre pendant une année. [11]

### 1.6.1.3 Angle D'altitude du soleil :

L'angle d'altitude solaire est l'angle entre le soleil dans le ciel et l'horizon de la terre. Il augmente avec le temps de la journée et atteint son minimum le matin, puis sa valeur maximale à midi, après cela il diminue pour atteindre sa valeur minimale le soir. [12]

$$\sin(\alpha) = \cos(\varphi) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\omega)\cos(\varphi)\cos(\delta) \quad (1.4)$$

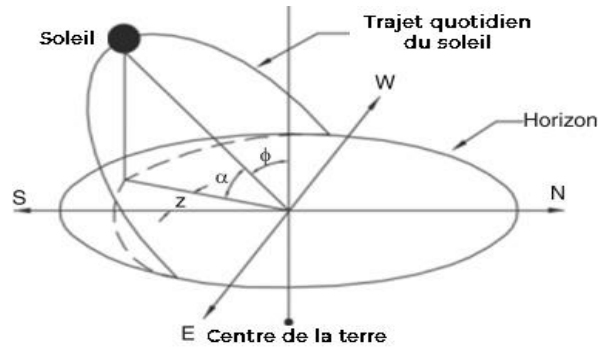


Figure 1-2 : Représentation de l'angle d'altitude du soleil avec l'horizon [12].

#### 1.6.1.4 Angle d'azimut solaire (z) :

L'angle d'azimut solaire (Z) est l'angle des rayons du soleil mesuré dans le plan horizontal à partir du plein sud pour l'hémisphère nord ou du plein nord pour l'hémisphère sud. [13]

(Z) est égal à 0° pour une surface orientée plein sud, 180° plein nord, 0° à 180° pour une surface orientée vers l'ouest et de 0° à - 180° vers l'est. [12]

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta)\sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (1.5)$$

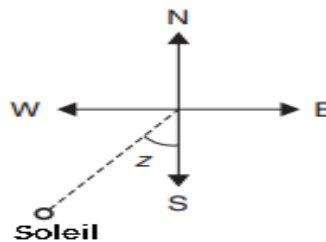


Figure 1-3 : Plan montrant l'angle d'azimute solaire



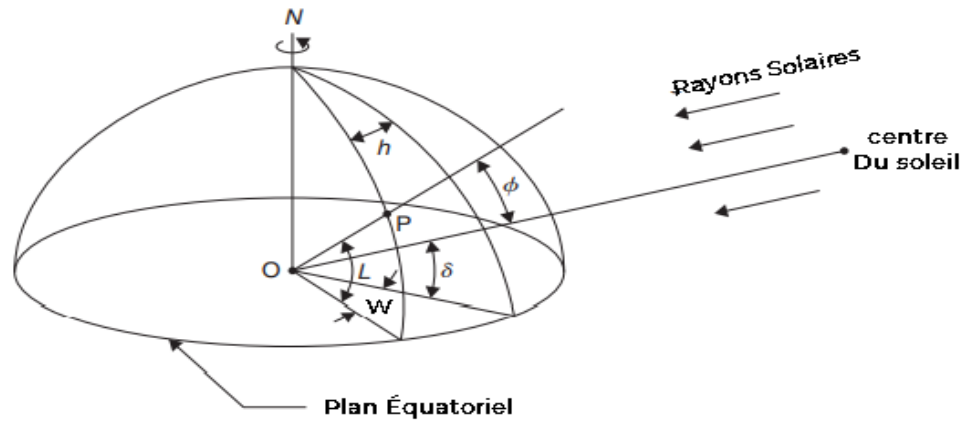


Figure 1-4 : Définition de la latitude, de l'angle horaire et de la déclinaison solaire. [13]

## 1.6.2 Coordonnées horizontales du soleil :

### 1.6.2.1 Angle d'inclinaison $\beta$ :

L'angle ( $\beta$ ) est l'angle entre la surface plane et l'horizontale (avec  $0 < \beta < 90$  pour une surface orientée vers l'équateur ;  $90 < \beta < -90$  pour une surface orientée à l'opposé de l'équateur).

### 1.6.2.2 Angle d'azimut de la surface $Z_s$ :

L'angle d'azimut de la surface est l'angle entre la perpendiculaire de la surface et le méridien de la longitude locale. Pour une surface horizontale, ( $Z_s$ ) est toujours  $0^\circ$ .

### 1.6.2.3 Angle d'incidence :

L'angle d'incidence solaire est défini comme l'angle entre le rayon du soleil et la ligne perpendiculaire à une surface. [12]

$$\cos(\theta) = \sin(\theta + \beta) \sin(\delta) + \cos(\varphi + \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (1.6)$$

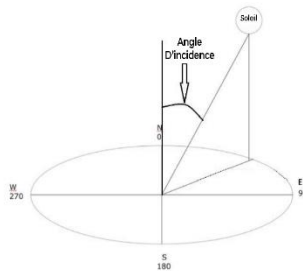


Figure 1-5 : Angle incidence. [12]

### 1.7 Cordonnées terrestres :

Tout point sur la surface terrestre peut être repéré par ses coordonnées géographiques qui sont : la longitude, la latitude, ainsi que par son altitude.

#### 1.7.1 La longitude ( $\lambda$ ) :

La longitude est définie comme une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, ou elle exprime le positionnement Est ou Ouest par rapport au méridien d'origine de Greenwich avec une portée de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ , ou respectivement de  $180^\circ$  ouest à  $180^\circ$  est. [14]

#### 1.7.2 L'altitude :

L'altitude est une quantité qui traduit la différence entre un point donné et un niveau de référence ; par convention, sur Terre, ce niveau est généralement le niveau de la mer.

[15]

### 1.7.3 Latitude :

La latitude est une mesure angulaire, avec une valeur qui varie de 0° à l'équateur à 90° aux pôles. [16]

## 1.8 Composition du rayonnement solaire:

### 1.8.1 Le rayonnement Solaire :

Le rayonnement solaire c'est une sorte d'ondes électromagnétiques émis par le soleil. [3]

L'énergie du rayonnement électromagnétique transmise sur la terre provient essentiellement de l'émission d'ondes lumineuses qui se situent dans le visible (entre 0,4 et 0,7  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde environ) et le proche infrarouge (entre 0,7 et 4  $\mu\text{m}$  environ), cette énergie, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairage de quelque  $340 \text{ W.m}^{-2}$ . Mais sur cette quantité d'éclairage qu'apporte le soleil au système terre-atmosphère, environ  $100 \text{ W.m}^{-2}$  sont réfléchis vers l'espace : le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface terrestre. [17]

L'absorption et à la diffusion de la lumière par les différents constituants de l'air (molécules, aérosols, nuages etc.). Provoque des changements dans le spectre et dans la direction des rayonnements solaire vers le sol. [18]

### 1.8.2 Répartition spectrale du rayonnement solaire:

Le spectre du rayonnement solaire couvre une longueur d'onde d'environ 250 nm à environ 2500 nm, Par ailleurs, la lumière visible des êtres humains s'étend de 400 à 700 nm, [19]

*Tableau 1-3 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [20]*

Région spectrale	Longueurs d'onde (nm)	Éclairage énergétique ( $\text{W.m}^{-3}$ )	Pourcentage (%)
Infrarouge	> 700	695	50,8

## Chapitre 1 : L'énergie solaire

Visible	400 à 700	559	40,9
UV-A	320 à 400	86	6,3
UV-B	280 à 320	21	1,5
UV-C	< 280	6	0,4

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique.

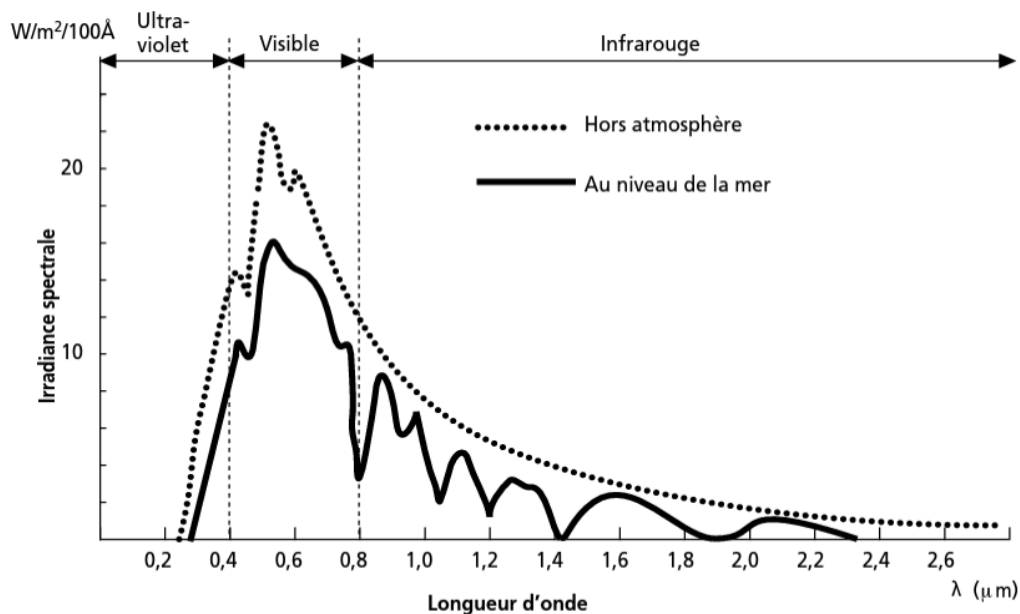
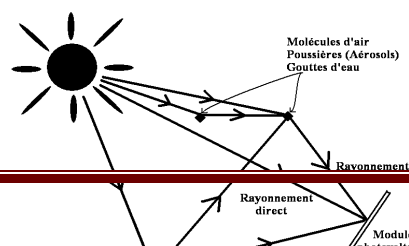


Figure 1-6 : Analyse spectrale du rayonnement global solaire . [21]

### 1.8.3 Composants du rayonnement solaire :



*Figure 1-7 : Composants du rayonnement solaire . [22]*

### *1.8.3.1 Le Rayonnement direct :*

Le rayonnement direct est défini comme le rayonnement reçu directement du Soleil et qui n'a pas subi de diffusion dans l'atmosphère, de sorte que sa direction est fixe. [23]

### *1.8.3.2 Rayonnement diffus :*


Le rayonnement diffus est celui reçu du soleil après que sa direction ait été modifiée par la dispersion de l'atmosphère. [24]




### *1.8.3.3 Rayonnement réfléchi (L'albédo) :*

L'albédo est la fraction du rayonnement solaire réfléchi par une surface ou un objet. [25] Il représente environ 30 % du rayonnement solaire entrant total. Les autres 70 % du rayonnement sont absorbés. Le rayonnement réfléchi rebondit simplement sur l'atmosphère terrestre et est réémis dans l'espace. [26]

## 1.8.4 Les différents Instruments de mesures du rayonnement solaire :

*Tableau 1-4 : Les Différents instruments de mesures du rayonnement solaire [20]*

Pyrhéliomètre	Cet instrument mesure le Rayonnement direct	
---------------	--	---

Spectroradiomètre	Cet instrument mesure le spectre du rayonnement solaire dans le domaine 250 nm - 800 nm	 A black, rectangular spectroradiometer with a lens on the front and a handle on top.
Pyranomètre	Pyranomètre équipé d'un pare-soleil et destiné à la mesure du rayonnement solaire diffus, Le domaine spectral couvert s'étend de 0,3 à 3 $\mu\text{m}$	 A white, dome-shaped pyranometer with a yellow cable extending from the side.
Héliographe	Cet instrument destiné à mesurer la durée d'insolation	 A heliograph consisting of a circular glass lens mounted on a metal frame with a base.

### 1.9 Les Capteurs solaires :

#### 1.9.1 Capteur plan :

Le capteur solaire plan est le capteur solaire le plus populaire du marché pour les applications domestiques et industrielles. Ils servent à produire de la chaleur à relativement basse température, soit entre 30 °c et 200 °C. La plupart d'entre eux fonctionnent sous le principe d'effet de serre pour chauffer un liquide caloporteur ou de l'air. Un capteur plan classique consiste en une boîte métallique isolée avec un revêtement en verre ou en plastique (appelé vitrage) simple ou double vitrage qui limite les pertes

thermiques convectives avec l'air ambiant ainsi que les pertes radiatives grâce aux propriétés du verre pratiquement opaque dans le domaine de l'infra-rouge. Le système de capteur solaire est composé d'un ensemble de tubes parallèles en cuivre en forme de "Z" qui sont fixés à une plaque plate en cuivre (absorbeur) au moyen d'une soudure étain-argent (6%). Cet ensemble est recouvert d'une peinture noire mate, fonctionnant comme une surface sélective, permettant ainsi une grande captation du rayonnement. Le boîtier est constitué d'un profilé en aluminium peint en blanc. Deux cadres de ce type sont superposés. L'un d'eux contient le verre blanc, tandis que l'autre contient l'unité tubes-plaques. L'isolateur est composé de deux fines plaques d'aluminium séparées par une couche de polystyrène étendu. Il intègre des thermomètres et des manomètres d'entrée et de sortie d'eau, ainsi qu'un thermomètre à bulbe placé sur la plaque absorbante. Des soupapes de sécurité sont fixées à cet équipement. [26]

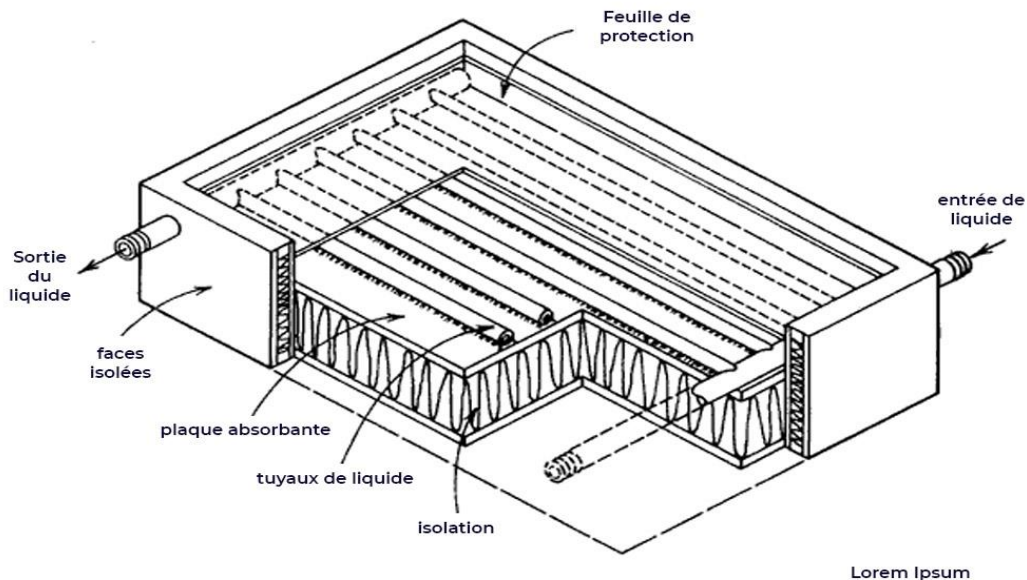
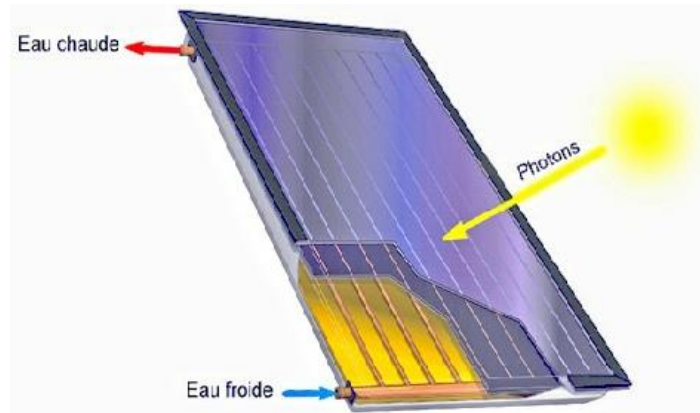


Figure 1-8 : Schéma d'un collecteur solaire plan . [27]

Le rendement maximum du capteur plan eau  $\eta_{cal}$  (rapport de l'énergie extraite par le fluide caloporteur sur l'énergie solaire globale incidente) se situe entre 60 et 80%, et décroît quasiment linéairement lorsque la température de fluide croît. [28]



*Figure 1-9: Capteur solaire plan.*

### 1.9.2 Capteur solaire a tube sous vide :

Les capteurs à tubes sous vide, sont un moyen de réduire les pertes thermiques dans l'environnement, inhérentes aux capteurs plats. Comme la perte de chaleur due à la convection ne peut pas traverser un vide, elle constitue un mécanisme d'isolation efficace pour maintenir la chaleur à l'intérieur des tubes collecteurs. Comme deux feuilles de verre plates ne sont normalement pas assez solides pour supporter un vide, le vide est plutôt créé entre deux tubes concentriques. En général, la tuyauterie d'eau d'un capteur solaire a tube sous vide est donc entourée de deux tubes concentriques en verre, avec un vide entre les deux qui laisse passer la chaleur du soleil (pour chauffer la tuyauterie) mais qui limite les pertes de chaleur dans l'environnement. Le tube intérieur est recouvert d'un absorbant thermique. La durée de vie du vide varie d'un capteur à l'autre, entre 5 et 15 ans. Les capteurs plans sont généralement plus efficaces que les CTE dans des conditions de plein soleil. Toutefois, le rendement énergétique des capteurs plats est légèrement plus réduit que celui des capteurs à tubes sous vide dans des conditions nuageuses ou de froid extrême. Les capteurs sous vide fabriqués en verre trempé, qui a une teinte verte, sont



## Chapitre 1 : L'énergie solaire

plus résistants et moins susceptibles de perdre leur vide, mais leur efficacité est légèrement réduite en raison d'une moindre transparence. [29]

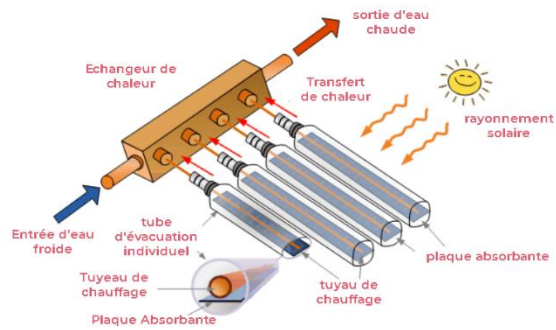


Figure 1-11 : Schéma d'un capteur solaire à tube sous vide [30]



Figure 1-10 : Un capteur solaire à tube sous vide.

### 1.9.3 Capteur solaire à concentration :

Les capteurs solaires thermiques à concentration sont des dispositifs qui utilisent un concentrateur afin de concentrer le rayonnement direct incident dans la zone d'absorption. Il est donc possible d'atteindre des niveaux de température pouvant être atteints car les valeurs du flux thermique sont élevées et les pertes thermiques sont limitées en raison de la petite surface. Les technologies de concentration solaire sont divisées en deux catégories : les technologies linéaires, les technologies à concentration ponctuelle.

#### *1.9.3.1 Collecteur Linéaire de Fresnel :*

Un système de Fresnel linéaire utilise une série de miroirs longs, étroits et à faible courbure (ou même plats) pour concentrer la lumière sur un ou plusieurs absorbeurs linéaires placés au-dessus des miroirs. [31]

Le capteur LFR est situé à une distance d'environ 3-5 m au-dessus du sol, et il n'est pas mobile. Pour augmenter la quantité de rayonnement solaire qui s'approche de l'absorbeur, un réflecteur secondaire est également présenté dans de nombreux cas. L'absorbeur tubulaire et un réflecteur secondaire de forme trapézoïdale ou parabolique peuvent être utilisés. Cependant, une structure plate ou courbée, spécialement pour augmenter l'efficacité optique, peut être choisie pour le réflecteur primaire. En outre, la conception du LFR varie en termes d'assemblage du récepteur (c'est-à-dire horizontal, vertical ou triangulaire) et de disposition des miroirs. Cette technologie LFR est également peu coûteuse et ne présente pas d'énormes problèmes mécaniques, elle permet d'atteindre des taux de concentration élevés. [32]

Chaque ligne de LFR est équipée d'un système de suivi solaire et est individuellement optimisée pour garantir que la lumière du soleil est toujours concentrée sur le récepteur fixe. Le récepteur est constitué d'un long tube absorbeur doté d'un revêtement sélectif. L'énergie solaire concentrée est transférée au récepteur en tenant un fluide caloporteur capable de maintenir l'état liquide à haute température. Le fluide thermique chauffe ensuite l'eau à travers un échangeur de chaleur pour la génération de vapeur. [33]



Figure 1-12 : Collecteur linéaire de Fresnel

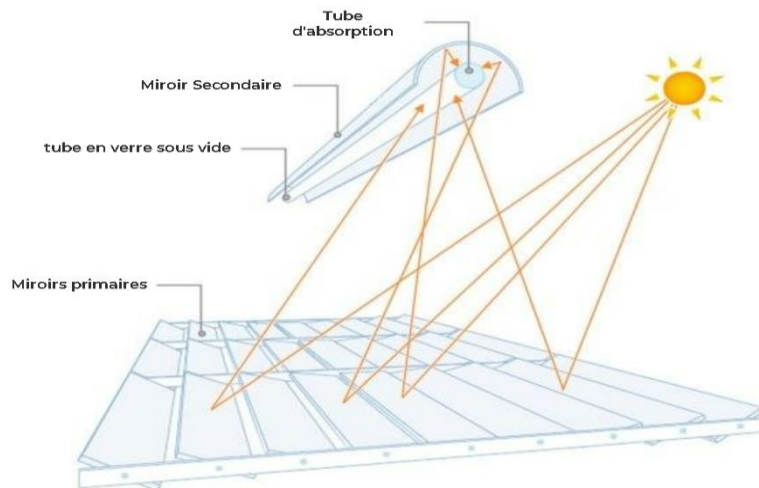


Figure 1-13 : Composants d'un collecteur de Fresnel linéaire [33]

### 1.9.3.2 Concentrateurs solaires paraboliques:

Les concentrateurs solaires paraboliques sont des systèmes de poursuite solaire à deux axes qui concentrent les radiations solaires vers le récepteur thermique situé au point focal du collecteur parabolique, comme le montre la figure ci-dessous.

Ces collecteurs sont constitués d'un ensemble de miroirs paraboliques en forme de cuvette. La température de fonctionnement de ces systèmes est supérieure à 1800K, tandis que le taux de concentration se situe généralement entre 1000 et 5000K. Les systèmes de concentration solaire à miroirs paraboliques sont les plus appropriés pour les applications photovoltaïques concentrées en raison de leur taux de concentration élevé et de leur

température de fonctionnement. Ces systèmes sont des dispositifs très volumineux et très coûteux. [34]

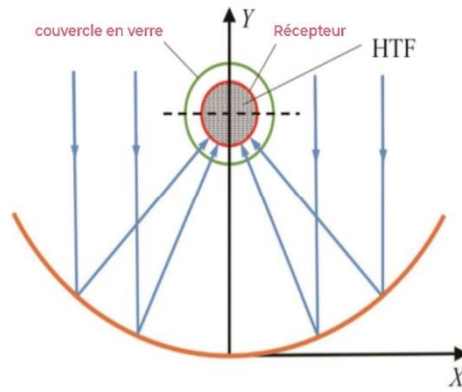


Figure 1-14 : Diagramme d'un collecteur parabolique [35]

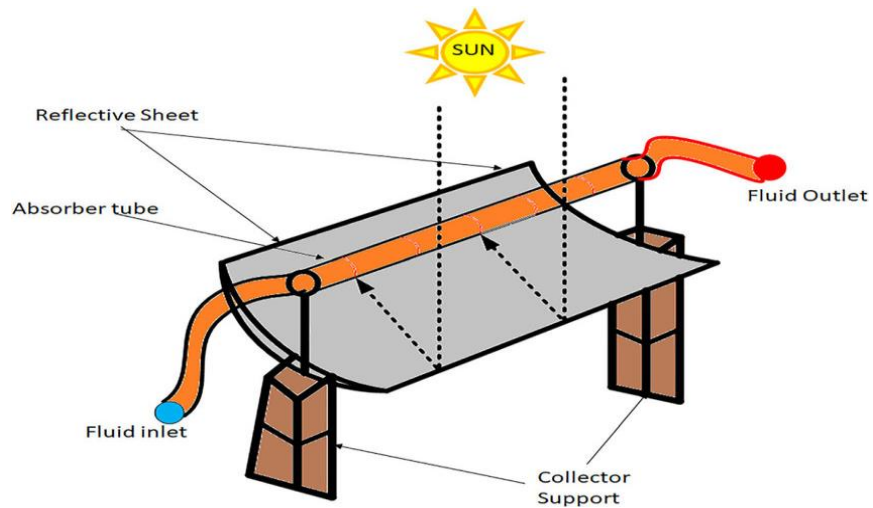


Figure 1-15: Schéma d'un capteur solaire parabolique [36]

### 1.9.4 Les capteurs solaires hybrides photovoltaïques thermiques :

Les capteurs solaires hybrides photovoltaïques thermiques, parfois appelés systèmes hybrides PV/T ou PVT, sont des systèmes qui convertissent le rayonnement solaire en énergie thermique et électrique. Ces systèmes combinent une cellule photovoltaïque, qui convertit le rayonnement électromagnétique (photons) en électricité, avec un capteur solaire thermique, qui capte l'énergie restante et élimine la chaleur résiduelle du module PV. Les cellules photovoltaïques (PV) souffrent d'une baisse d'efficacité avec l'augmentation de la température en raison d'une résistance accrue. Ces systèmes peuvent être conçus pour évacuer la chaleur des cellules photovoltaïques, ce qui permet de refroidir les cellules et d'améliorer leur efficacité en réduisant la résistance. [29]

De nombreuses recherches ont été menées pour intégrer la lentille de Fresnel au photovoltaïque, afin de former un concentrateur PV/T de Fresnel. Le dispositif expérimental d'un concentrateur PV/T est composé de la lentille de Fresnel qui est montée dans le cadre et sous laquelle se trouvent les cellules PV monocristallines, sous ces cellules se trouve le collecteur thermique, ce collecteur est fait d'une couverture en cuivre et a un canal de refroidissement attaché. Par conséquent, pour assurer un refroidissement efficace des cellules, le système photovoltaïque est intégré avec un canal de refroidissement. Les classifications des systèmes PV/T sont :

#### *1.9.4.1 Modules PV/T plat :*

Les modules PV/T plats combinent généralement un module PV plat à l'avant, qui convertit la lumière du soleil en électricité, et un absorbeur solaire thermique à l'arrière, qui capte l'énergie restante et élimine la chaleur excessive du module PV. Ces modules peuvent être conçus pour évacuer la chaleur des cellules photovoltaïques, ce qui permet de refroidir les cellules et donc d'améliorer leur efficacité en réduisant la résistance. La capture à la fois de l'électricité et de la chaleur permet à ces dispositifs d'avoir une exergie plus élevée et donc un meilleur rendement énergétique global que le solaire PV ou le solaire thermique seule. [37]

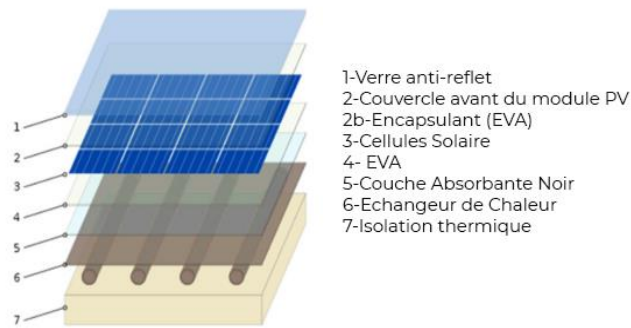


Figure 1-16 : Schéma d'un collecteur photovoltaïque thermique (PVT) plat et couvert. [38]

### 1.9.4.2 Capteur Solaire Hybride PV/T avec Liquide :

Ces capteurs PV/T avec liquide sont utilisés afin d'optimiser de gain énergétique du module PV car ils utilisent de l'eau qui circule dans des tubes serpents ou des séries de canalisation parallèles pour l'élimination de la chaleur du collecteur. [39]

### 1.9.4.3 Capteur Solaire Hybride PV/T a Air :

Les capteurs PV/T de type air se distinguent également selon le modèle d'écoulement de l'air Le collecteur d'air PV/T possède des canaux ou L'air circule et agit comme un fluide de fonctionnement dans le système PV/T. Il est utilisé pour maintenir la température du module PV à des niveaux optimaux, ce qui permet d'obtenir une production d'énergie élevée. En outre, il est utilisé pour le séchage, le chauffage des locaux et la ventilation. [40]

## Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet en général, concernant la production d'énergie électrique et thermique à partir de l'énergie solaire. Nous avons donné une explication sur les différents capteurs solaires et leur caractéristique. Enfin nous avons vu que l'utilisation de l'énergie solaire n'a cessé de croître au cours des deux dernières décennies, et de plus en plus de personnes se rendent compte de l'énorme valeur de l'utilisation des capteurs solaires.

# **Chapitre 2 : Étude théorique des lentilles de Fresnel, les panneaux PV et les suiveurs solaires**

## **2 CHAPITRE 2 : ÉTUDE THÉORIQUE DES LENTILLES DE FRESNEL LES PANNEAUX PV ET LES SUIVEURS SOLAIRE**

---

### 2.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous avons débuté par une étude sur les lentilles de Fresnel prometteuse pour la conversion de l'énergie solaire. Car les lentilles de Fresnel peuvent facilement générer des températures qui dépassent les 500°C et le rendement de conversion est généralement élevé.

Ensuite on continue notre étude en élaborant les différentes caractéristiques des panneaux photovoltaïques et leurs cellules solaires.

Nous avons achevé ce chapitre avec une étude sur les suiveurs solaires, ces derniers assurent une production d'énergie plus importante car ils permettent au concentrateur solaire de rester toujours orienté vers le soleil.

### 2.2 La lentille de Fresnel

#### 2.2.1 Description :

Les lentilles de Fresnel sont des dispositifs optiques qui permettent de concentrer des rayons lumineux parallèles sur un seul point, c'est pour cette raison qu'elle est utilisée pour chauffer ou même brûler un matériau. [41]



Dans le domaine des applications de l'énergie solaire concentrée, les lentilles de Fresnel ont été récemment l'un des meilleurs choix en raison de leurs avantages tels que le petit volume, la légèreté, la production de masse à faible coût ainsi que l'augmentation efficace de la concentration d'énergie. [42]

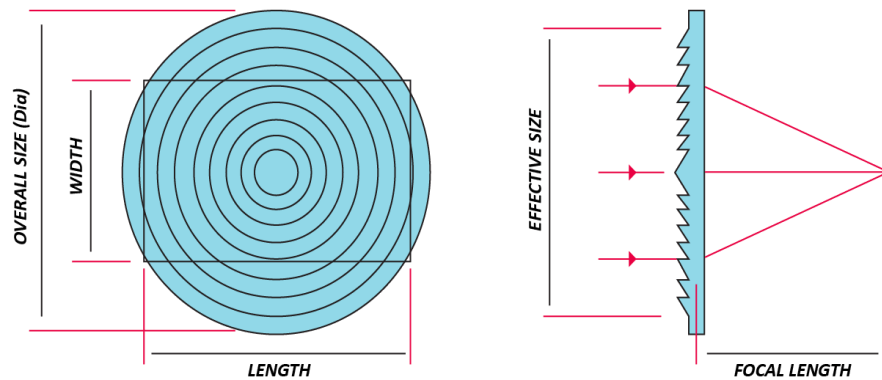


Figure 2-1 : Lentille de Fresnel [43]

### 2.2.2 Considération Géométrique et optique :

Lentille de Fresnel est caractérisée par sa distance focale ( $f$ ) son diamètre ( $D$ ) et par son angle d'ouverture ( $\theta$ ) son nombre d'ouverture ( $\#f$ ) et son poids ( $m$ ) . [44]

Distance Focale ( $f$ ) :

$$\#f = \frac{f}{D} \quad (2.1)$$

Et

$$\tan(\theta) = \frac{D}{2f}$$

Une lentille de Fresnel n'est rien d'autre qu'une chaîne de prismes. Chaque prisme représente la pente de la surface de la lentille, Chaque prisme réfracte la lumière entrante au même point pour concentrer la diffusion de la lumière d'un point situé à la distance de l'objet avant la lentille, à un point situé à la distance de l'image après la lentille. L'angle de sommet du prisme  $\alpha$  peut se calculer à l'aide de la loi de la réfraction de Snell. En traversant le prisme, le rayon est réfracté par la première surface, puis par la deuxième surface. [44]

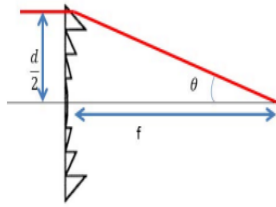


Figure 2-2 : Distance entre de la lentille de Fresnel et l'objet [44]

$$\sin(i_1) = n \sin(i_2) \quad (2.2)$$

On a:

$$i_2 + i_3 = \alpha \quad (2.3)$$

Et :

$$i_1 = \theta_1 + i_2 + i_3 \quad (2.4)$$

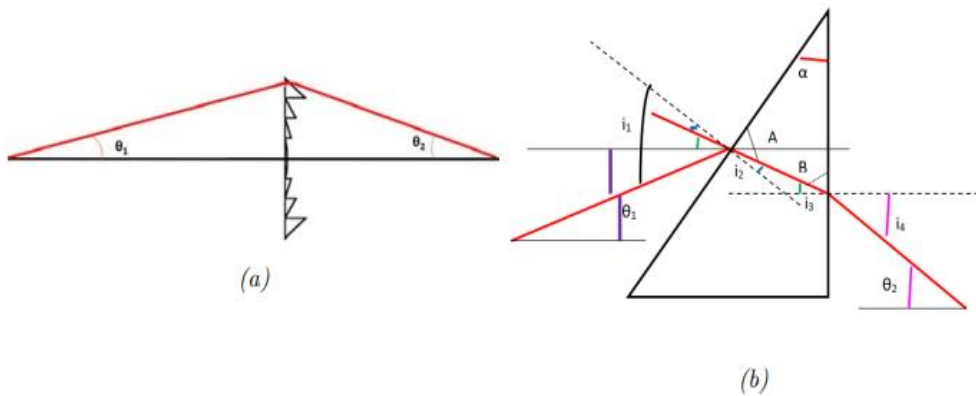


Figure 2-3 : (a) : Passage d'un rayon à travers une lentille de Fresnel (b) : Déviation des rayons par un prisme.[44]

## Chapitre 2 : Étude théorique des lentilles de Fresnel, les panneaux PV et les suiveurs solaires.

---

En remplaçant dans (2.4) on a :

$$\sin(\theta_1 + \alpha) = n \sin(\alpha - i_3) \quad (2.5)$$

$$\sin(\theta_1)\cos(\alpha) + \cos(\theta_1)\sin(\alpha) = n \sin(\alpha)\cos(i_3) - n \cos(\alpha)\sin(i_3) \quad (2.6)$$

Et en utilisant la loi de Snell à la 2 -ème surface du prisme on a :

$$n \sin(i_3) = \sin(i_4) \quad (2.7)$$

Et on a

$$i_4 = \theta_2 \quad (2.8)$$

En remplaçant dans l'équation (2.6) on obtient :

$$\sin(\theta_1)\cos(\alpha) + \cos(\theta_1)\sin(\alpha) = n \sin(\alpha)\cos(i_3) - n \cos(\alpha) \frac{\sin(\theta_2)}{n} \quad (2.9)$$

On a aussi

$$\cos(i_3^2) + \sin(i_3^2) = 1 \quad (2.10)$$

$$\cos(i_3) = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_2}}{n} \quad (2.11)$$

La reformulation de l'équation (2.9) :

$$\sin\theta_1 \cos\alpha + \cos\theta_1 \sin\alpha = n \sin\alpha \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_2}}{n} - n \cos\alpha \sin i_3 \quad (2.12)$$

$$\sin\theta_1 \cos\alpha + \cos\theta_1 \sin\alpha = \sin\alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_2} - n \cos\alpha \sin i_3 \quad (2.13)$$

Finalement on obtient : (2.14)

$$\tan\alpha = \frac{\sin\theta_1 + \sin\theta_2}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_2} - \cos\theta_1}$$

## Chapitre 2 : Étude théorique des lentilles de Fresnel, les panneaux PV et les suiveurs solaires.

C'est avec cette équation qu'on peut calculer l'angle au sommet de chaque prisme, ainsi la création de la lentille de Fresnel. [44]

### 2.2.2.1 Calcul du poids de la lentille :

A) Calcul du poids de la lentille plan convexe :

La lentille a une forme d'une calotte sphérique, [41]

On commence par calculer son volume :

$$V1 = \frac{\pi h^2}{3}(3r - h) \quad (2.15)$$

$$\text{Nous considérons une demi-sphère de rayon } R = h = \frac{d}{2} \quad (2.16)$$

On obtient :

$$V1 = \frac{2}{3}\pi r^3 \quad (2.17)$$

$$\text{On calcul la masse : } m1 = V1 \times \rho \quad (2.18)$$

B) Calcul de poids de la lentille de Fresnel :

La lentille de Fresnel est présentée comme une superposition de cylindres donc pour calculer son volume on fait la somme des volumes de tous les cylindres :

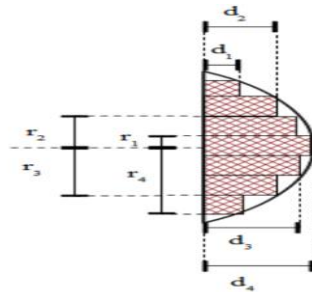


Figure 2-4 : Découpage d'une lentille plan convexe [41]

$$\Delta V = \pi r_4^2 \times d_1 + \pi r_3^2(d_2 - d_1) + \pi r_2^2(d_3 - d_2) + \pi r_1^2(d_4 - d_3) \quad (2.18)$$

Pour obtenir le volume V2 (Volume de la lentille de Fresnel), on met :

$$V_2 = V_1 - \Delta V = \frac{\pi h^2}{3}(3R - h) - \pi r_3^2 (d_2 - d_1) - \pi r_2^2 (d_3 - d_2) - \pi r_1^2 (d_4 - d_3) \quad (2.19)$$

Donc la masse de la lentille de Fresnel est obtenu par :

$$m_2 = V_2 \times \rho \quad (2.20)$$

#### 2.2.2.2 Calcul de concentration :

Nous avons défini le taux de concentration théorique comme étant le rapport de la surface d'ouverture du concentrateur sur la surface de l'absorbant. [45]

$$X_{th} = \frac{\text{aire de l'ouverture}}{\text{aire de l'absorbant}} \quad (2.21)$$

Le rendement optique est calculé par :

$$\eta_{opt} = \frac{\text{Radiation incident sur l'absorbant}}{\text{Radiation incidente sur l'ouverture}} \quad (2.22)$$

Le taux de concentration est :

$$X = X_{th} \times \eta_{opt} \quad [45] \quad (2.23)$$

## 2.3 Modules Photovoltaïques :

### 2.3.1 Généralités :

Le panneau photovoltaïque convertit la lumière du soleil en électricité sans qu'aucun moteur thermique n'intervienne son plus grand avantage est sa construction en tant que système autonome pour donner des puissances allant du microwatt au mégawatts.

Il se compose de multiples éléments tels que des cellules, des connexions, des montages mécaniques et électriques, ainsi que des moyens de régulation et/ou de modification de la puissance électrique. Ces systèmes sont évalués en kilowatts crête (KWc), c'est-à-dire la

quantité d'énergie électrique qu'un système est censé fournir lorsque le soleil est directement au-dessus de lui en une journée claire.

Ils sont utilisés pour des sources d'énergie, le pompage de l'eau, les bâtiments isolés, les systèmes solaires domestiques, les communications, les satellites et les véhicules spatiaux, les installations d'osmose inverse et même les centrales électriques de l'ordre du mégawatt.

Les dispositifs photovoltaïques sont robustes et simples dans leur conception et nécessitent très peu d'entretien. [46]

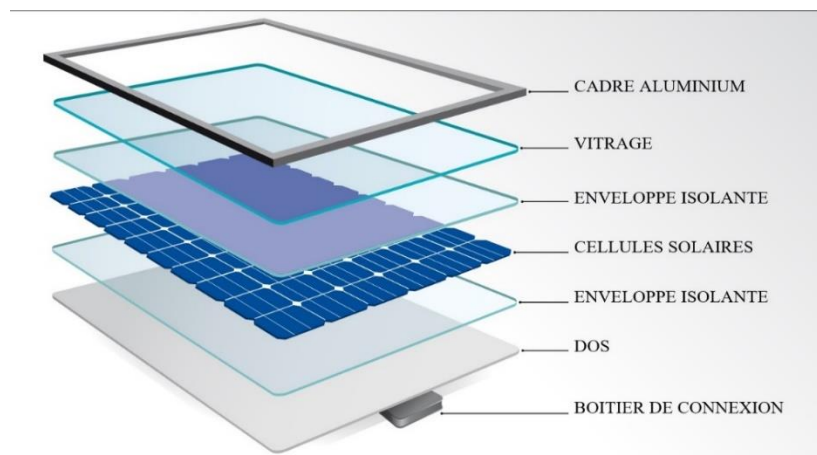


Figure 2-5: Composants d'un panneau solaire.

## 2.3.2 Cellules solaires :

### 2.3.2.1 Principe de fonctionnement :

Quand la cellule solaire est exposée à la lumière du soleil, les photons dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur sont absorbés et créent un nombre de paires électron-trou correspondant à l'irradiation incidente. Ces porteurs sont séparés et créent un photo-courant, sous l'influence des champs électriques internes de la jonction p-n. [47]

### 2.3.2.2 Types des Cellules solaires :

#### a) Cellules en silicium monocristallins :

Les Cellules en silicium monocristallins sont fabriquées avec du silicium Monocristallin qui est obtenu par tirage d'un lingot Cylindrique à partir d'un monocristal (souche) selon le procédé Czochralski (CZ). Leurs Rendement varie entre 15 et 22 %. [48]

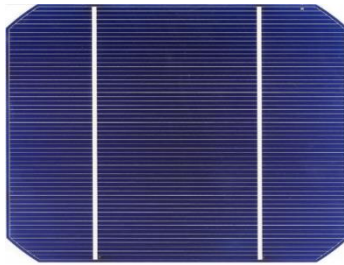


Figure 2-6: Cellule en silicium monocristallin. [49]

#### b) 2.3.2.2 Cellules en silicium amorphe :

Les cellules en silicium amorphe sont des cellules généralement utilisées pour des applications de petite puissance car leurs rendements varient de 5 à 10 %. Elles sont composées avec du silicium hydrogéné (état non-cristallin) déposé sur un substrat de verre. [48]



Figure 2-7 : Cellule amorphe [49]

#### c) Cellule en silicium poly cristallins :

Les cellules polycristallins sont fabriquées avec deux ou plusieurs cristaux leurs rendement varie de 10 à 13 % [50]

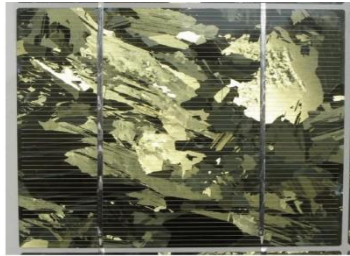


Figure 2-8 : Cellule en silicium poly-cristallin. [49]

### 2.3.3 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

Pour une cellule idéale l'équation de courant est : [49]

$$I_{ph}(V_{out}) = I_{ph}(\varphi) - I_d(V) \quad (2.24)$$

Où :  $I_{ph}$ : Courant fournie par la cellule (A)

$V_{out}$ : Tension aux bornes des la jonction (V)

$I_{ph}(\varphi)$ : Courant produit par la photopile, ce courant est proportionnel au flux lumineux ( $\varphi$ ) (A).

$$\text{Avec : } I_d = I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{AKT}\right) - 1 \right) \quad (2.25)$$

Où :

$I_s$ : Courant de saturation de la diode( $\mu A$ ).

A : Facteur de qualité de la diode



## Chapitre 2 : Étude théorique des lentilles de Fresnel, les panneaux PV et les suiveurs solaires.

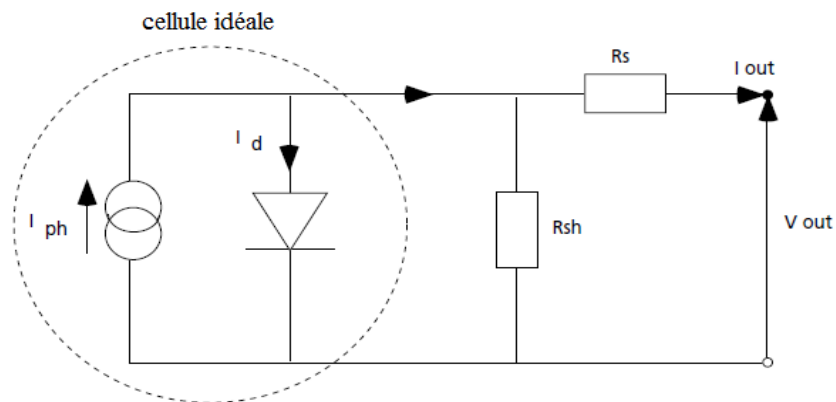


Figure 2-9 : schéma électrique d'une cellule idéale

$$I_{ph}(\phi) = I_{sc} \frac{\phi}{\phi_{ref}} \left( \mu I_{cc} \left( (T_c - T_{ref}) + 1 \right) \right) \quad (2.26)$$

Où :

$I_{sc}$  : Courant de court – circuit mesuré en condition  $Stc$

$\phi_{ref}$  : Flux lumineux de référence  $1000 \left( \frac{W}{m^2} \right)$

$T_{ref}$  = Température de référence 298.15 (K)

$T_c$  : Température de la cellule (K)

$\mu I_{cc}$  : coefficient de température de cour – circuit de la cellule  $\left( \frac{A}{K} \right)$

On calcul la température de la cellule suivant l'équation :

$$T_c = T_a + \phi \left( \frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (2.27)$$

Avec :

$\phi$  : Flux lumineux ( $W/m^2$ )

$N_{oct}$  : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule donné par le constructeur (K)

$T_a$  : Température ambiante (K)

### 2.3.4 Courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit est le courant qui traverse la cellule solaire lorsque la tension aux bornes de la cellule solaire est nulle (c'est-à-dire lorsque la cellule solaire est court-circuitée). [52]

$I_{SC}$  est représenté sur la figure ci-dessous:

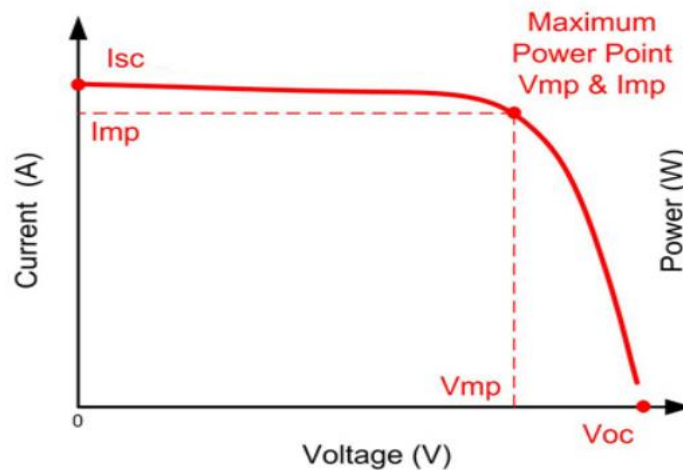


Figure 2-10 : La représentation de la courbe du courant de court-circuit

### 2.4.1 Tension circuit-ouvert (Voc):

Il s'agit de la tension maximale qu'une cellule solaire peut délivrer. Voc correspond à la tension de polarisation directe, à laquelle la densité de courant d'obscurité compense la densité de photo-courant. Voc dépend de la densité de courant photo-généré et peut être calculé à partir de l'équation (2.28) en supposant que le courant net est nul :

$$Voc = \frac{K_B T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.28)$$

Avec :  $I_{ph}$  = Photo courant

### 2.4.2 Caractéristique I-V :

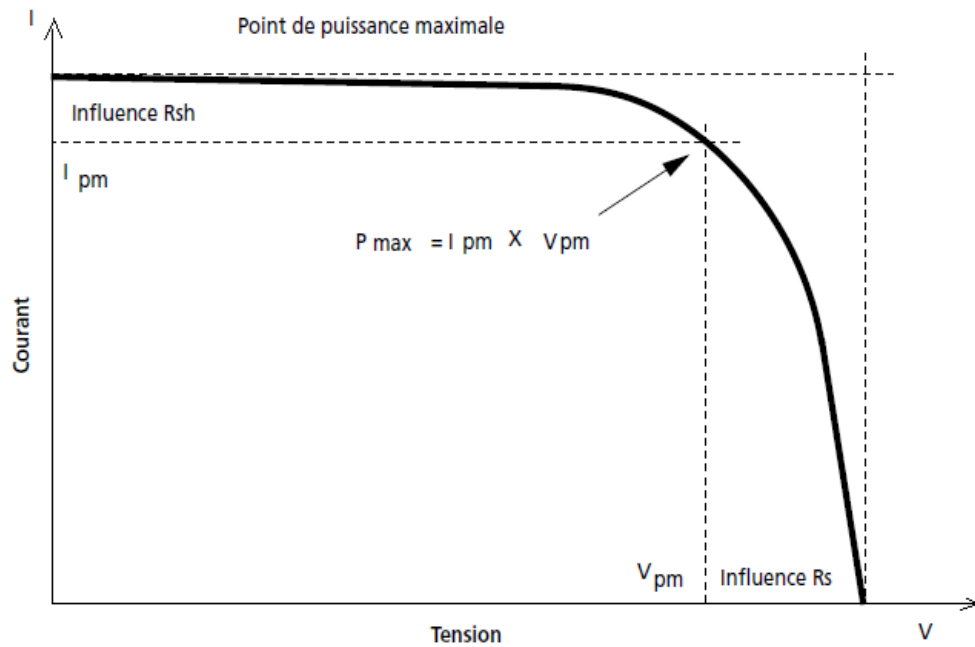


Figure 2-11 : Caractéristiques (I-V) d'une cellule PV. [53]

La caractéristique I-V est décrite par l'équation (2.29), qui montre le courant net ( $I$ ) de la cellule en fonction de la tension externe ( $v$ ), ( $n$ ) est le facteur d'idéalité bien connu de la jonction et sa valeur est comprise entre 1 et 2.

$$I = I_L - I_0 \left\{ e^{\frac{q(V+R_s I)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right\} - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad [54] \quad (2.29)$$

$R_s$  : résistance série

$R_{sh}$  : résistance shunt

$k$  : la constante de Boltzmann ( $k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{Kg} \cdot \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ ).

$q$  : charge de l'électron ( $1.9 \times 10^{-19} \text{ C}$ )

$I_L$ : photo-courant.

$I_0$ : courant de saturation de la diode

### 2.4.3 Puissance débitée :

La puissance est donnée par la multiplication de (V×I) :

$$P = V \times I = V \left( I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{qV}{KT} \right) - 1 \right) \right) \quad (2.30)$$

La puissance est maximale au point  $P_m$  :

$$P_m = V_m \times I_m = FF \times V_{co} \times I_{cc} \quad (2.31)$$

### 2.4.4 Calcul du Facteur de forme :

Le facteur de Forme est le rapport entre la puissance maximale ( $P_{max} = J_{mpp} \cdot V_{mpp}$ ) générée par une cellule solaire et le produit de  $V_{oc}$  par  $I_{sc}$ .

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.32)$$

### 2.4.5 Calcul du Rendement :

Le rendement de conversion de l'énergie solaire est un paramètre décisif pour les coûts et la durabilité de la production d'énergie photovoltaïque. Plus la valeur de  $\eta$  est élevée, plus la quantité de matériel et la surface nécessaires pour une installation PV sont réduites.

Le rendement d'une cellule solaire est défini par le rapport entre la puissance extraite au point de puissance maximum de la cellule solaire la puissance de rayonnement solaire avec lequel la cellule est éclairée ( $P_{sol}$ ) [55]

$$\eta = FF \frac{I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{sol}} \quad (2.33)$$

## 2.5 Analyse paramétrique :

### 2.5.1 Influence de l'éclairement :

L'éclairement et le principal influenceur sur l'énergie produite par la cellule. D'après la figure (2-13) on remarque que L'éclairement influe directement sur le courant contrairement à la tension qui varie peu. [56]

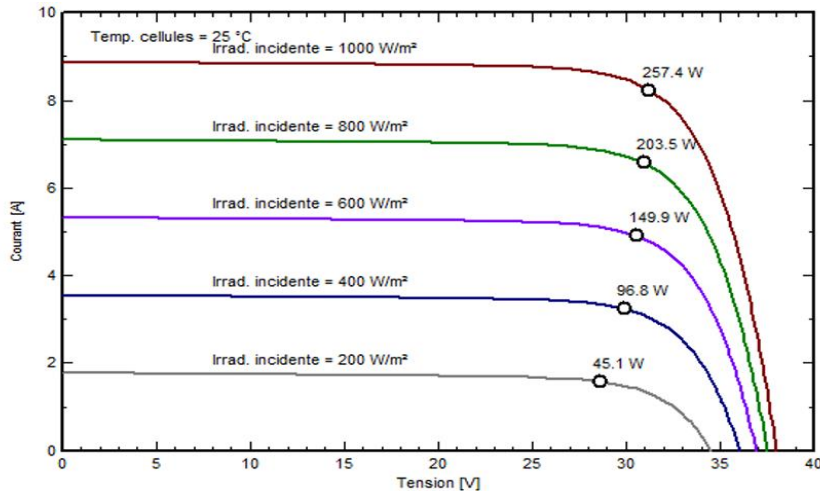


Figure 2-12: Influence de l'éclairement sur la cellule PV [57]

### 2.5.2 Influence de la température :

La température est un paramètre essentiel pour le calcul de la puissance de la cellule car on remarque d'après la fig (2.13) que la température a un impact négatif sur la tension de court-circuit ( $V_{oc}$ ) car quand la température augmente  $V_{oc}$  diminue, d'autre part elle suscite une augmentation du courant court-circuit malgré ça la puissance de la cellule subit une diminution. [58]

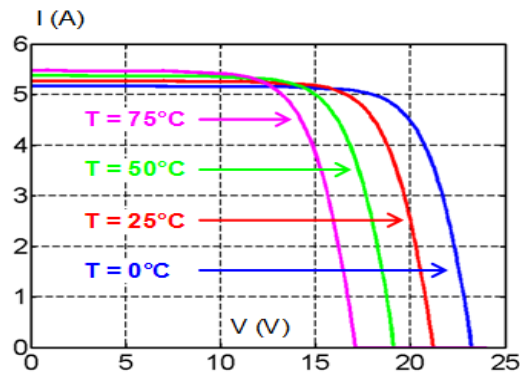


Figure 2-13 : Influence de la température sur la cellule PV [59]

### 2.5.3 Influence des résistances série et shunt :

$R_s$  est la somme de la résistance de contact sur les surfaces avant et arrière, et des résistances ohmiques des couches n+ (et p+) sur les côtés avant (et arrière). [60]

$$R_s = \frac{V_{co}-V}{I} \quad [61] \quad (2.34)$$

Avec :

I : Le courant fournit par la cellule photovoltaïque (A)

V : La tension appliquée sur les bornes de la cellule photovoltaïque (V)

Des pertes de puissance importantes sont causées par la présence d'une résistance shunt ( $R_{sh}$ ) sont généralement dues à des défauts de fabrication, plutôt à une mauvaise conception des cellules solaires. Une faible résistance de shunt entraîne des pertes de puissance dans les cellules solaires en fournissant un chemin de courant alternatif pour le courant généré par le rayonnement solaire. Une telle déviation réduit la quantité de courant traversant la jonction de la cellule solaire et réduit la tension de la cellule solaire. L'effet d'une résistance Shunt est particulièrement grave lorsque la luminosité est faible, car le courant généré par le rayonnement est moins important. [62]

Elle est donnée par :

$$R_{sh} = \frac{V}{I_{sc}-I} \quad [61] \quad (2.35)$$

## 2.6 Systèmes de poursuite solaire

### 2.6.1 Généralités :

#### 2.6.1.1 Définition :

Un suiveur solaire est un terme générique utilisé pour décrire des dispositifs qui orientent diverses sortes de charges vers le soleil. Les charges utiles peuvent être des panneaux photovoltaïques, des réflecteurs, des lentilles ou d'autres dispositifs optiques. [29]

#### **Avantages et inconvénients :**

##### **Avantages :**

- Les suiveurs génèrent plus d'électricité que leurs homologues stationnaires en raison de l'exposition directe aux rayons solaires. Cette augmentation peut atteindre 10 à 25 % selon l'emplacement géographique du système de suivi.
- Les progrès technologiques et la fiabilité de l'électronique et de la mécanique ont considérablement réduit les problèmes de maintenance à long terme des systèmes de suivi.
- Il existe de nombreux types de suiveurs solaires, tels que les suiveurs à un seul axe ou à deux axes, qui peuvent tous être parfaitement adaptés à un site unique. La taille de l'installation, le climat local, le degré de latitude et les exigences électriques sont autant de considérations importantes qui peuvent influencer le type de suiveur solaire le mieux adapté à une installation solaire spécifique. [63]

##### **Inconvénients :**

- Les suiveurs solaires sont légèrement plus chers que leurs homologues stationnaires, en raison de la technologie plus complexe et des pièces mobiles

nécessaires à leur fonctionnement ce qui signifie aussi une maintenance encore plus complexe. [63]

#### 2.6.1.2 Types de poursuite solaire :

##### 2.6.1.3 Poursuite à deux axes :

Un système de suivi solaire à deux axes est une technique qui suit le soleil sur deux axes différents en utilisant deux points de pivot pour la rotation. Les systèmes de suivi solaire de ce type ont généralement des axes horizontaux et verticaux. L'une des applications les plus importantes du système de poursuite à deux axes est le solaire thermique, en particulier les systèmes paraboliques et les systèmes de tours solaires, où la longue distance entre les réflecteurs de l'héliostat et la concentration du point de réception entraîne des erreurs d'angle dans les résultats. Dans les systèmes actifs utilisant le suivi à deux axes, nous utilisons généralement quatre LDR, deux moteurs et un contrôleur. [64]

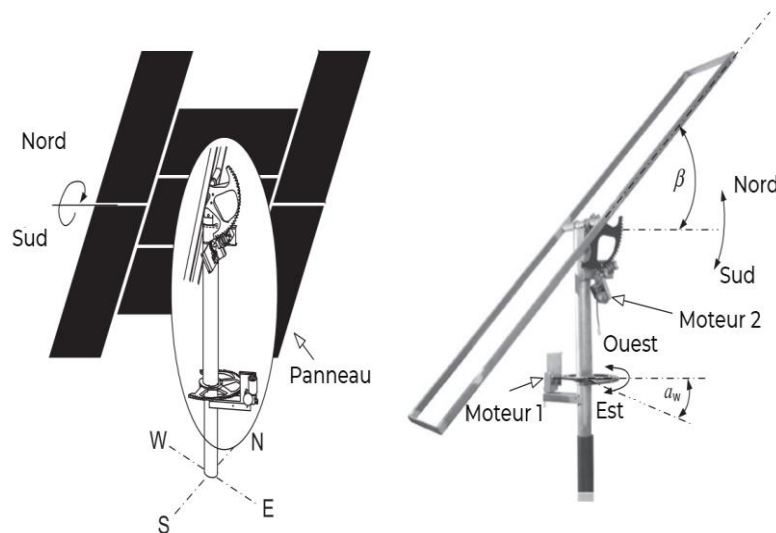


Figure 2-14 : Système de suivi du soleil à deux axes avec changement de l'angle d'azimut  $\alpha_w$  et de l'angle d'inclinaison  $\beta$ . [65]



#### 2.6.1.4 Poursuite à un seul axe :

Un système de suivi solaire à un seul axe est une technique permettant de suivre le soleil d'un côté à l'autre en utilisant un seul point de pivot pour la rotation. [64]

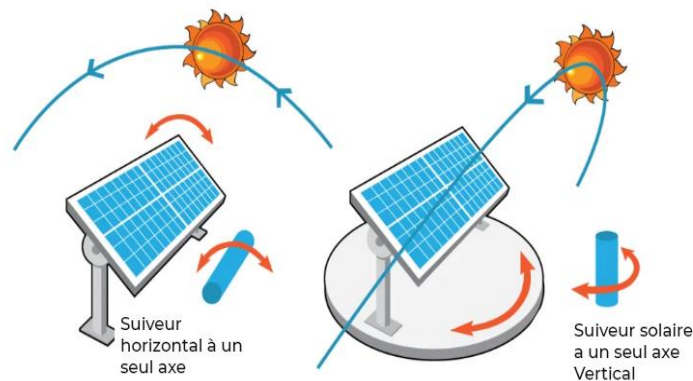


Figure 2-15 : Suiveur solaire a un seul axe [66]

Les premiers suiveurs solaires étaient des suiveurs à un seul axe d'où un coup d'œil sur leur efficacité révèle qu'ils produisent 20 à 25% d'électricité en plus par rapport aux panneaux solaires montés sans suiveur. Il existe une multitude de suiveurs à un seul axe qui sont disponibles pour le suivi en fonction du site et des besoins :

- Les suiveurs horizontaux à un seul axe, HSAT (dont l'axe de rotation est orienté sur l'axe horizontal)
- Suiveur horizontal à un seul axe avec modules inclinés, HTSAT (avec axe de rotation horizontal et un panneau PV incliné).
- Les suiveurs à un seul axe et à alignement polaire, PSAT [67]
- Le principal inconvénient du système de suivi à un seul axe est qu'il ne peut suivre le soleil que pendant un mouvement journalier et non un mouvement annuel et pendant les jours nuageux, l'efficacité du système de suivi est réduite en raison de la rotation autour d'un seul axe. [64]

## 2.4 Conclusion :

Les lentilles de Fresnel et les panneaux photovoltaïques sont les meilleurs dispositifs de conversion d'énergie solaire disponible sur le marché.

Nous avons conclu que la combinaison des lentilles de Fresnel et les panneaux photovoltaïques avec les suiveurs solaires nous permettra de concevoir un système autonome capable de produire de l'énergie thermique et électrique en même temps et ainsi suivre les rayonnements solaires pour optimiser au maximum le gain énergétique.

# **Chapitre 3 : Conception et réalisation**

## 3 Conception et Réalisation

---

### 3.1 Introduction :

Notre système expérimental est composé d'une lentille de Fresnel et un panneau photovoltaïque de 10 w pour alimenter le suiveur solaire a deux axes.

Le suiveur solaire est conçu pour faire un guidage du système verticalement et horizontalement.

### 3.2 Caractéristiques des composants utilisées :

#### 3.2.1 Caractéristiques de la Lentille de Fresnel :

Dans cette partie de notre étude, nous avons choisi de travailler avec une lentille de Fresnel fabriqué avec polyméthacrylate de méthyle (PMMA) en raison de sa grande transparence et de sa résistance souple. Les caractéristiques de cette dernière sont données ci-dessous

- Model : Lentille de Fresnel rectangulaire bricolage
- Dimension : 15x15cm.
- Longueur focale : 2000 mm.
- Épaisseur : 2mm.
- Technologie : zoom planaire concentré
- Poids : 300 g.
- Matière : PMMA

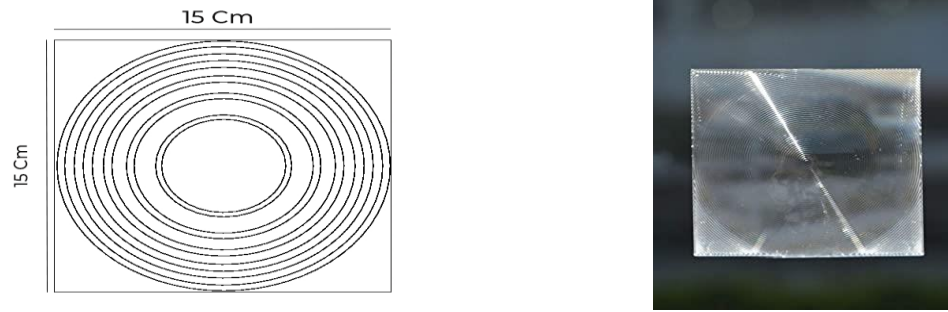


Figure 3-1 : Lentille de Fresnel rectangulaire PMMA de dimensions 15\*15 Cm.

### 3.2.2 Caractéristiques des composants du suiveurs Solaire :

#### 3.2.2.1 Servo Moteur :

Nous avons utilisé un Servo moteur de type (MG996R) à cause de sa solidité et la simplicité de son fonctionnement.

Ce servo moteur (Le MG996R) est doté d'engrenages et de roulements en métal. Il a un couple de 15Kg/cm et est largement répandu dans les domaines de la robotique, du modélisme, de la domotique et du prototypage [68].

Pour les caractéristiques du servo moteur voir **annexe 2**.



Figure 3-2 : Image du servo-moteur (MG996R) utilisé.

### 3.2.2.2 La Carte Arduino :

Dans cette partie, nous avons utilisé une carte Arduino qui est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega328. Elle comprend 14 broches d'entrée/sortie numériques (dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 6 entrées analogiques, un résonateur céramique de 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, un connecteur ICSP et un bouton de réinitialisation.

Sa configuration comprend des fonctions d'assistance qui soutiennent le microcontrôleur de toutes les manières possibles. Pour l'utiliser, il suffit de le connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB ou de l'alimenter à l'aide d'un adaptateur AC/DC ou d'une batterie. [69] .

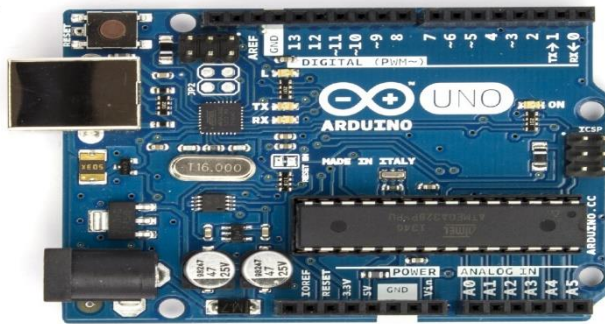


Figure 3-3 : Carte d'Arduino (Uno) utilisée. [70]

Les caractéristiques de la carte Arduino sont présentées dans **l'annexe 3**.

### 3.2.2.3 Capteur de lumière LDR :

Dans notre réalisation on a utilisé 4 LDR du model 5516. Ces sont également appelées photoconducteurs ou photorésistances et la photoconductivité est le principe de leur fonctionnement. La résistance des LDR augmente lorsque l'intensité lumineuse diminue et vice versa [71].

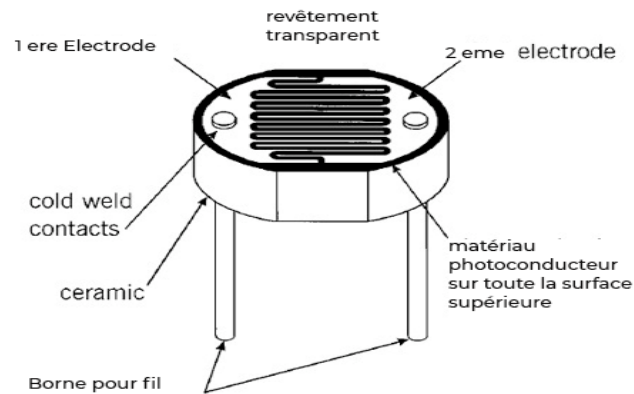


Figure 3-4 : Schéma du capteur photorésistance utilisé (LDR). [72]

Pour Les caractéristiques des capteurs de lumières utilisés voir **Annexe 4**.

### 3.2.2.4 Le Panneau solaire utilisé :

Afin d'alimenter le suiveur solaire, on a pris un panneau photovoltaïque de 10 Wc ou ces caractéristiques sont les suivantes :



Figure 3-5 : Photographie du panneau solaire utilisée.

Tableau 3-1 : Caractéristiques du panneau photovoltaïque

Dimensions	35×29.5×1.75
Pmax	10 w
Poids	0.94 Kg

Tolérance	3
Vmp	17.6 V
Imp	0.56 A
Voc	21.1 V

### 3.2.2.5 Les Batteries :

Pour alimenter le suiveur solaire nous avons utilisées des batteries de type ultrafire 7800 mAh 18650 qui sont des accumulateurs li-ion haute puissance, parfaites pour les appareils électroniques exigeants. Ces batteries sont dotées d'une puissance de 3,7 volts et d'une capacité de 7800 mAh, ce qui permet de faire fonctionner les appareils électroniques à forte consommation plus longtemps que les sources d'alimentation traditionnelles. [74] leurs caractéristiques sont mentionnées dans le tableau (3-4)



Figure 3-6: Image des batteries en Li-ion utilisé (L'Ultrafire 7800 mAh 18650). [73]



Pour les Caractéristiques des batteries (Ultrafine 7800m Ah) voir **Annexe 5**.

### 3.2.2.6 Capteur de courant :

Nous avons utilisé un capteur de courant de type INA 219 afin de mesurer la puissance du panneau solaire délivrée aux batteries qui l'INA 219 est équipée d'une interface compatible SMBUS OU I<sup>2</sup>C. Le dispositif surveille à la fois la chute de tension du shunt et la tension d'alimentation du bus, avec des temps de conversion et un filtrage programmable. Une valeur de calibrage programmable, combinée à un multiplicateur interne, permet de lire directement le courant en ampères. Un registre multiplicateur supplémentaire calcule la puissance en watts [75]. Les caractéristiques des capteurs du courant se trouve ci-dessous tableau (3.5)

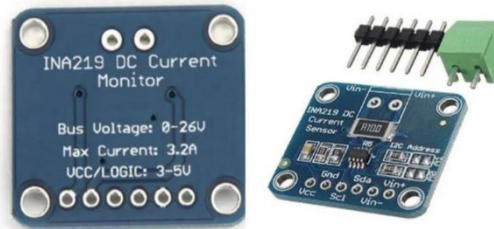


Figure 3-7: Image du capteur utilisé INA219 utilisé.

Pour Caractéristiques du capteur du courant INA219 voir **annexe 6**.

### 3.2.2.7 Régulateur de charge :

Nous avons utilisé un régulateur de charge de type (Steca Solsum 10.10 F). Les régulateurs de charge sont essentiels dans les systèmes PV pour empêcher les batteries d'être endommagées par une surcharge ou une décharge excessive en contrôlant le flux de courant depuis et vers les batteries. Ils peuvent également protéger les appareils qui sont connectés aux batteries dans les systèmes PV. La plupart des batteries peuvent difficilement se rétablir après une surcharge ou une décharge excessive. L'utilisation de régulateurs dans les systèmes PV peut donc prolonger la durée de vie des batteries. [78] les caractéristiques du régulateur voir **Annexe 7**.



Figure 3-8 : illustration du regulateur que nous avons utilisé.

### 3.2.2.8 L'écran affichage :

Dans notre réalisation nous avons utilisé un écran d'affichage de type SSD1306 est un pilote CMOS OLED/PLED mono-puce avec contrôleur pour système d'affichage graphique matriciel à diodes électroluminescentes organiques/polymères. Il est composé de 128 segments et de 64 cathodes communes. Le SSD1306 intègre un contrôle de contraste, une RAM d'affichage et un oscillateur, ce qui réduit le nombre de composants externes et la consommation d'énergie. Il dispose d'un contrôle de la luminosité à 256 niveaux. Il convient à de nombreuses applications portables compactes, telles que la montre intelligente, l'affichage en temps réel de l'image de la caméra sur la voiture intelligente,

Le dispositif de gestion de la batterie, etc. [81]. Les caractéristiques d'écran d'affichage que nous avons utilisé se trouve dans **l'annexe 7**



Figure 3-9 Écran d'affichage utilisé pour notre réalisation SSD1306.

### 3.3 Étapes de la réalisation :

#### 3.3.1 Réalisation du prototype du Système de Fresnel :

Dans cette partie, nous avons commencé tout d'abord par la réalisation d'un prototype manuel afin de tester la distance optimale entre le foyer et la lentille de Fresnel.



Figure 3-10: Photographie de notre prototype manuel du système de Fresnel.

#### 3.3.2 Raccordement du système de Fresnel avec le Panneau Pv :

Après avoir réalisé notre système de Fresnel nous avons raccordé ce dernier au panneau photovoltaïque comme le montre la fig. (3.13) afin de suivre les rayonnements Solaire

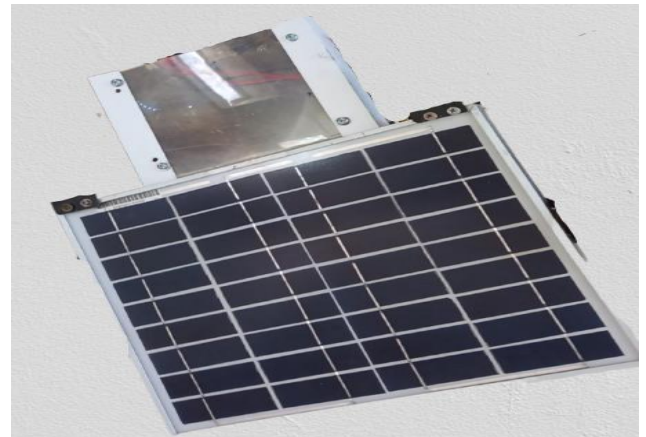
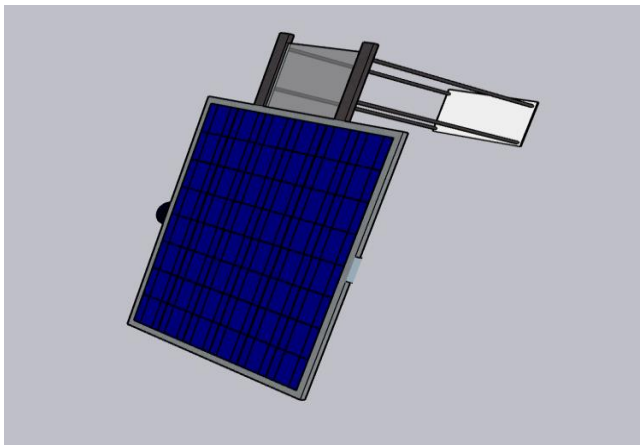


Figure 3-11: Raccordement de notre système de Fresnel au panneaux solaire.

### 3.3.3 Réalisation du suiveur solaire :

En premier nous avons raccordé le régulateur avec le panneau et les batteries rechargeable puis nous avons implémenté le programme Arduino voir **Annexe 1**.

Nous avons mis en place les photorésistance (LDR) en les raccordant avec l'Arduino à l'aide d'une plaque d'essai comme voir la fig. (3-12).

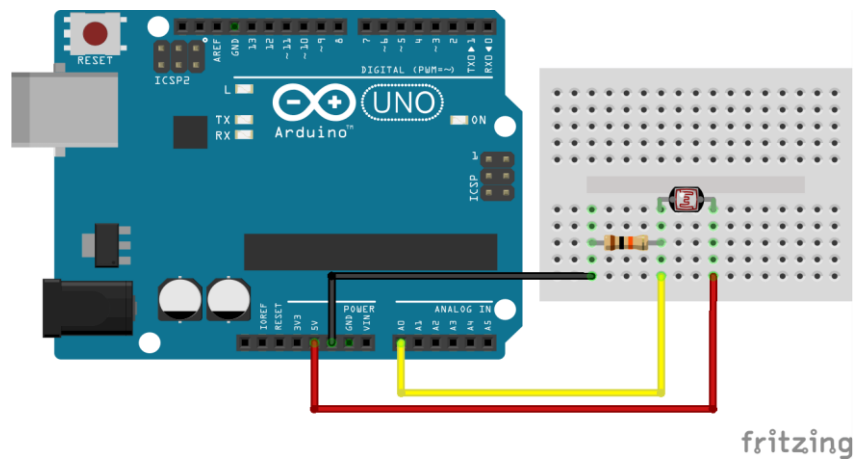
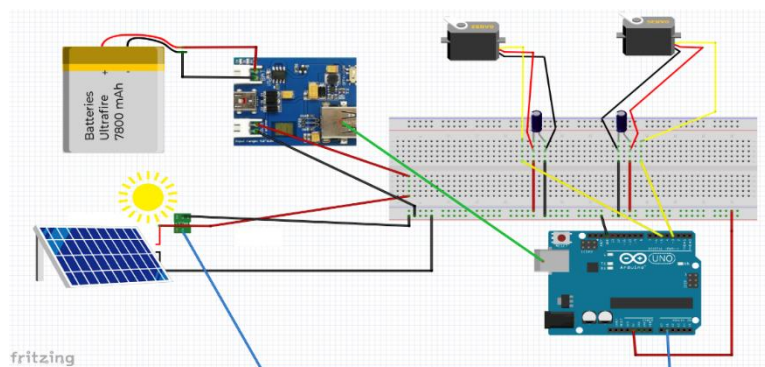


Figure 3-12 : Raccordement des photorésistances (LDR) avec l'Arduino.

Par la suite on raccorde le capteur ina219 ainsi le panneau et l'écran OLED avec l'Arduino comme montre la voir Figure (3-13).



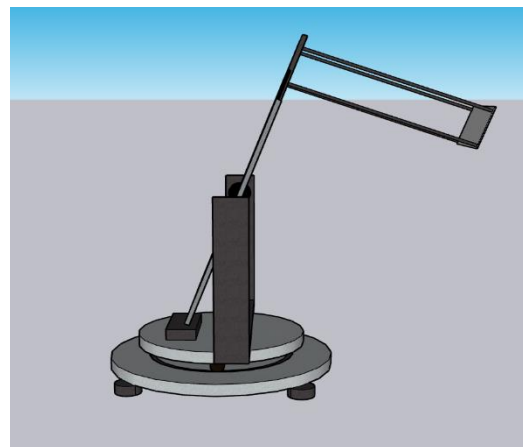
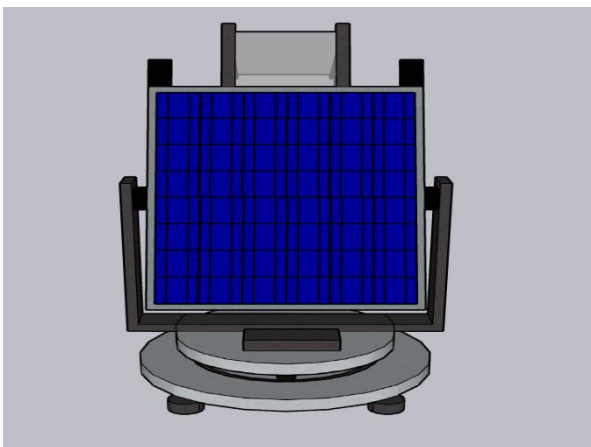
*Figure 3-13 : Raccordement du capteur ina219 ainsi le panneau et l'écran OLED avec l'Arduino*

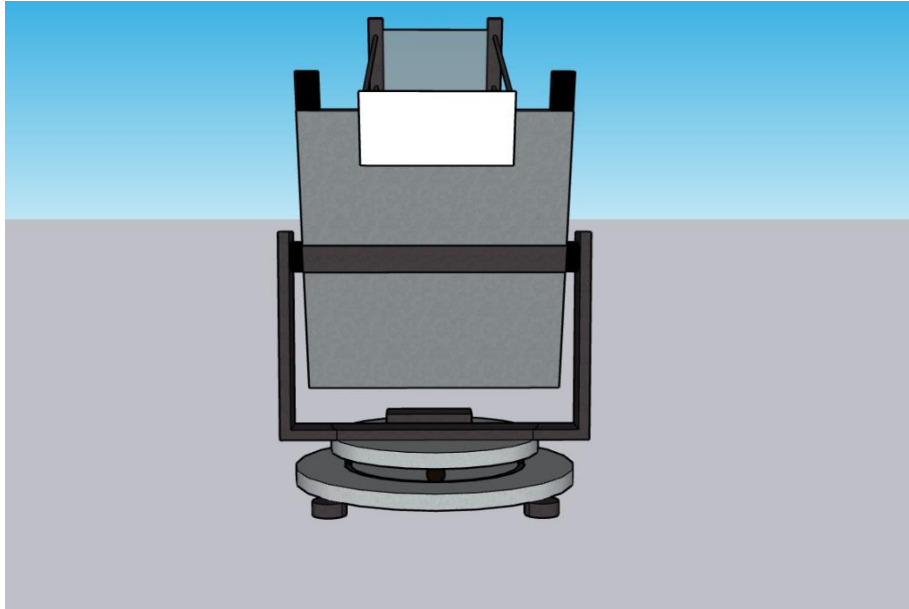
3.2.4 : Le système solaire que nous avons réalisé :



*Figure 3-14 : le système De Fresnel et le traquer solaire alimentée par un panneau photovoltaïque.*

Nous avons finalisé notre réalisation ou on a conçu le système de Fresnel qui est équipée par un suiveur solaire fonctionne suivant deux axes qui alimenté directement par un panneau solaire ou bien par des batteries qui se recharge par l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques.





*Figure 3-15 : Illustration 3D représentant notre réalisation.*

# **Chapitre 4 :**

# **Résultats et Discussion**

## 4 Résultats et discussions :

---

### 4.1 Introduction :

Cette partie de travail expérimental a pour but d'étudier l'influence de la température mesurée sur les adsorbants. Les résultats obtenus sont présentés dans des tableaux et des graphes afin de ressortir l'information pour nous permettre de vérifier l'atteinte des objectifs de la recherche.

Nous avons aussi présenté des mesures de courants et tensions afin de bien confirmer l'efficacité de notre réalisation.

### 4.2 Mesure de la température :

Lors de notre expérience nous avons mesurer les différentes températures produites par notre système de Fresnel au cours de la journée et plus particulièrement la journée du 29 juin 2022. Le tableau (4.1) présente les différentes températures mesurer.

*Tableau 4-1 : Température généré par le système de Fresnel.*

Heure (h)	Température (° C)
10 :30	650
11 :00	452
11 :30	360
12 :00	842
12 :30	763
13 :00	516



## Chapitre 4 : Résultats et Discussions

13 :30	480
14 :00	560
14 :30	518
15 :00	660
15 :30	575
16 :00	512

À partir des résultats présentés dans le tableau 4-1 et la figure (4-1) nous observons que la valeur maximale de la température atteinte dans notre étude est de  $T = 842^{\circ}\text{C}$  à midi (12 :00) car l'éclairement était optimal à cette heure, par contre à 11 :30 la température était minimale  $T = 360^{\circ}\text{C}$  car à cette heure le ciel était nuageux.

Ces résultats nous permettent facilement de conclure que l'éclairement solaire influence directement sur la température.

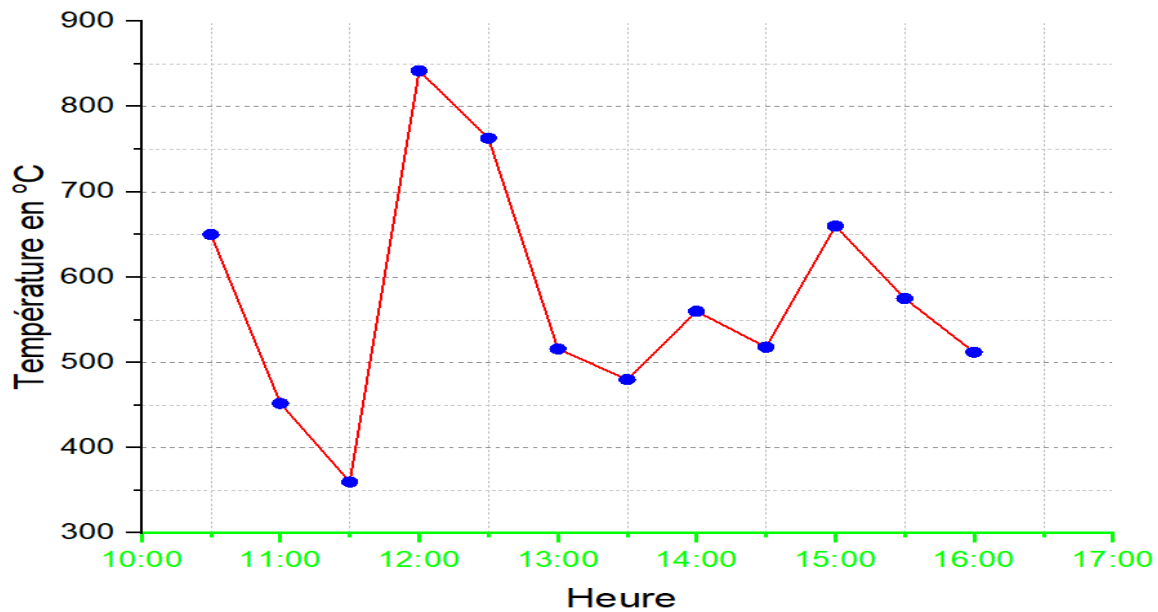


Figure 4-1 : Graphe représentant la variation de la température au cours de la journée du 29 Juin 2022.

### 4.3 La Mesure de la température entre la lentille de Fresnel et le foyer :

Dans notre étude nous avons mesurer la température en changeant la distance entre la lentille de Fresnel et le foyer. Les mesures résultantes ce trouve dans le tableau (4-2).

Distance entre la lentille et le foyer (Cm)	Température (° C)
22	660
19	370
16	195
13	115
10	102
7	97
4	70

Tableau 4-2 : Mesure de la température entre lentille de Fresnel et le foyer.

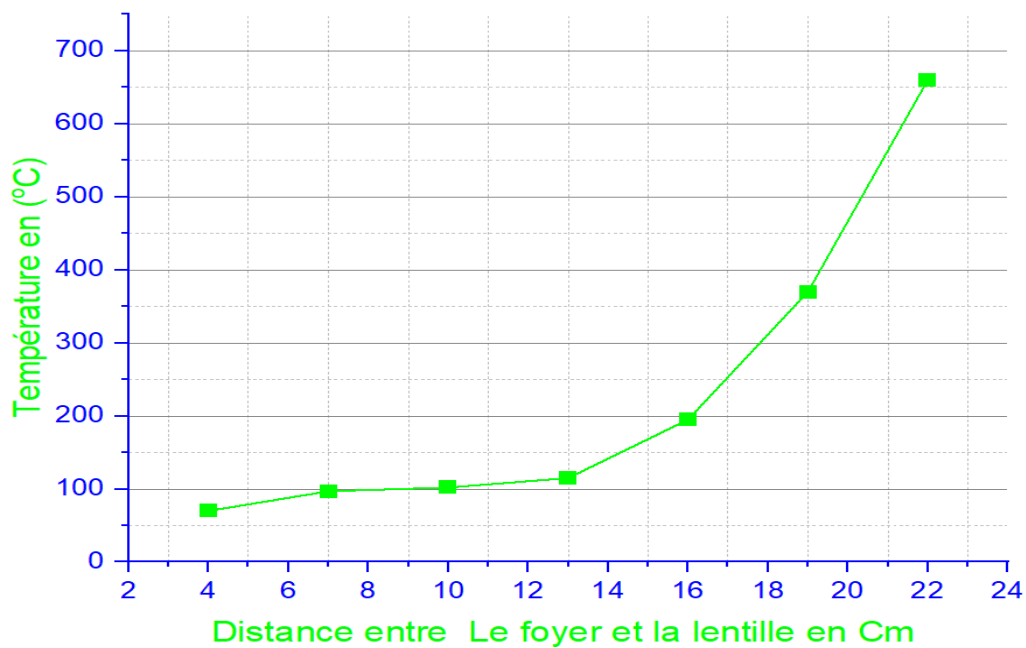


Figure 4-2 : Graphe représentant la variation de température en fonction de de la distance entre le foyer et la lentille de Fresnel.

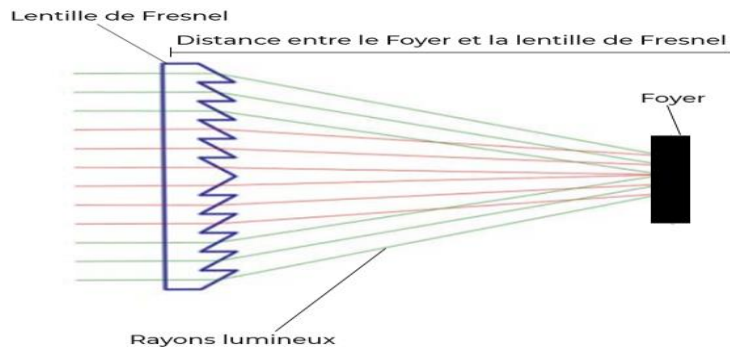


Figure 4-3 : Schéma représentant la distance entre le foyer et la lentille de Fresnel

La figure (4-3) montre bien l'effet de la distance entre la lentille de Fresnel et le foyer sur la température.

La température atteint sa valeur maximale  $T = 660^{\circ}\text{C}$  à une distance de 22 cm.

La température atteint sa valeur minimale  $T = 70^{\circ}\text{C}$  à une distance de 4 cm.

Nous pouvons conclure que la température diminue à chaque rapprochement de distance entre la lentille de Fresnel et le foyer et vice versa.

### 4.4 Température maximale atteinte :



*Figure 4-4 Image montrant la température maximale atteinte*

Au cours de nos expériences pratiques nous avons atteint une température maximale de 1098,2 C ce qui traduit l'efficacité considérable de notre système.

### 4.5 La mesure des tensions, intensités du courants et la puissance produite par le panneau solaire :

Nous avons obtenu les différentes tensions, intensités de courant et les puissances produite au cours de la journée du 29 juin 2022. Les mesures obtenues se trouve au tableau (4-3)

*Tableau 4-3 : Tableau représentant la variation du courant, la tension et la puissance produite par le panneau photovoltaïque pour la journée du 29 juin 2022.*

## Chapitre 4 : Résultats et Discussions

Heure	Tension V	Courant mA	Puissance mW
10 :30	19.90	131.10	2606
11 :00	12.61	83.10	1056
11 :30	12.37	81.50	1102
12 :00	20.71	135.6	2796
12 :30	20.87	136.8	2844
13 :00	20.36	133.6	2715
13 :30	20.50	135.3	2752
14 :00	20.55	135.6	2772
14 :30	20.70	136.4	2808
15 :00	20.70	137.7	2836.4
15 :30	20.20	133.7	2706
16 :00	20.7	136	2834

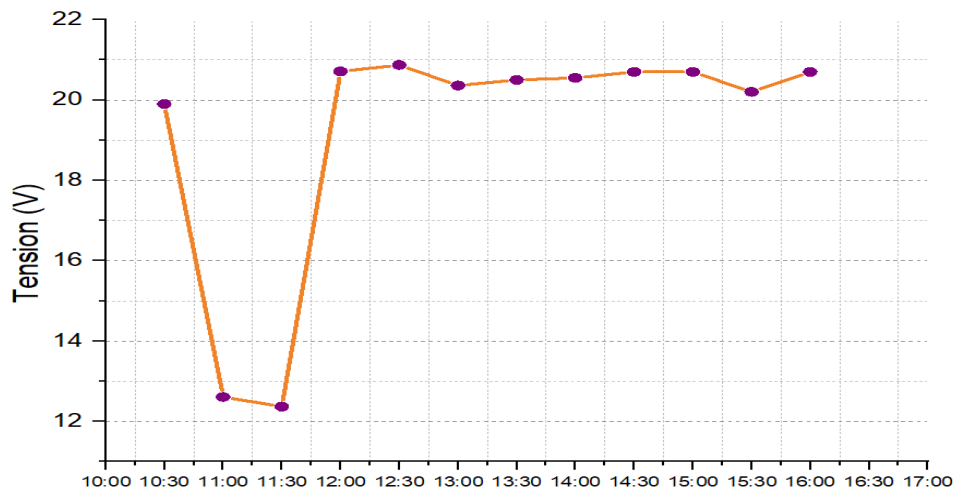


Figure 4-5 : La courbe qui représente la variation de la tension au cours de la journée.

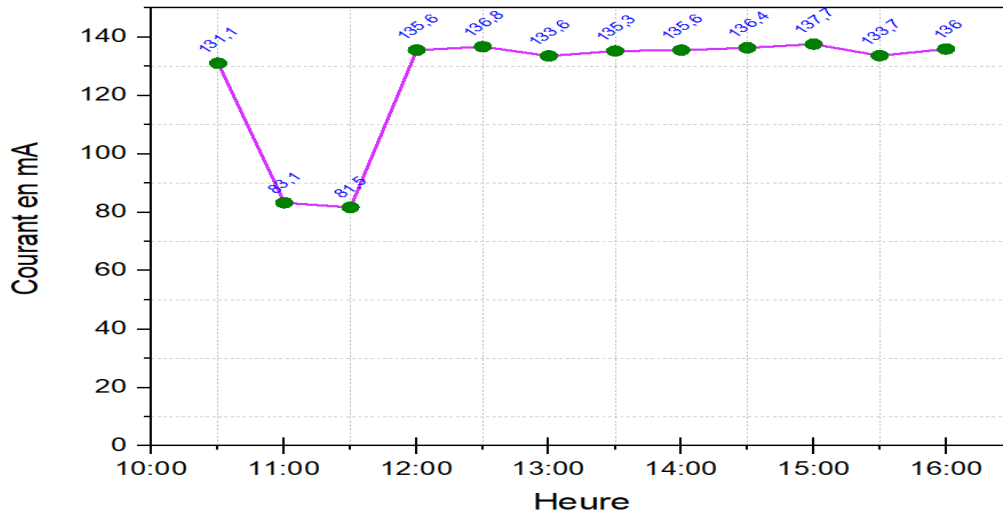


Figure 4-6 : La courbe qui représente l'intensité du courant en fonction des heures choisie.

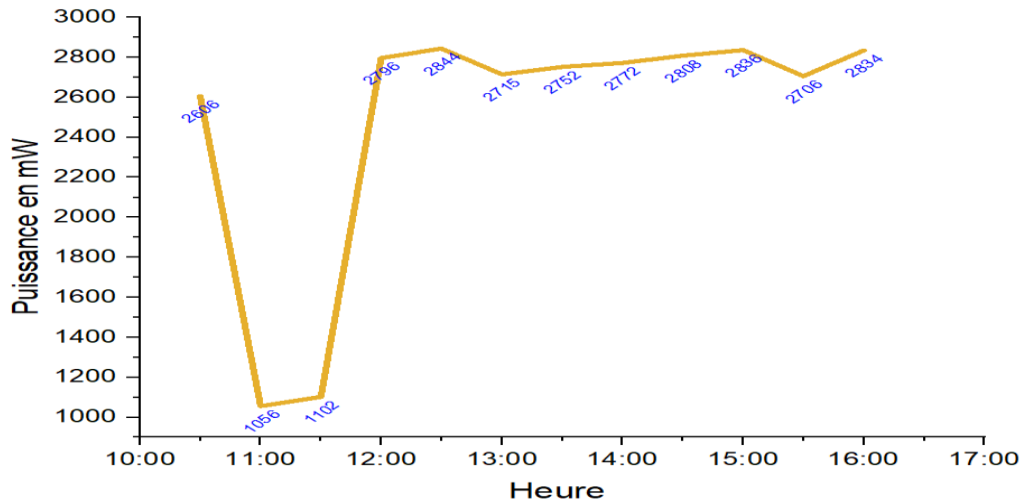


Figure 4-7 : Le graphe représentatif des puissances résultantes en fonction des heures choisies.

D'après les figures (4-4), (4-5) et (4-6) nous avons constaté que la variation du courant, la tension et la puissance du panneau a été constante en tout le long de la journée à part a

11 :00 et à 11:30 ou les valeurs de tension et de courant ont atteints leurs valeurs minimales

$U = 12.37 \text{ V}$ ,  $I = 81.5 \text{ mA}$  et la puissance :  $P = 1102 \text{ mW}$  on justifie ces valeurs par la faible densité d'éclairement à cause du passage des nuages

Nous avons conclu que l'énergie électrique produite par le panneau photovoltaïque dépend de l'éclairement du soleil. Et nous avons constaté que le suiveur solaire permet au panneau PV d'atteindre un gain maximal de puissance.

### 4.6 La régénération des adsorbants :

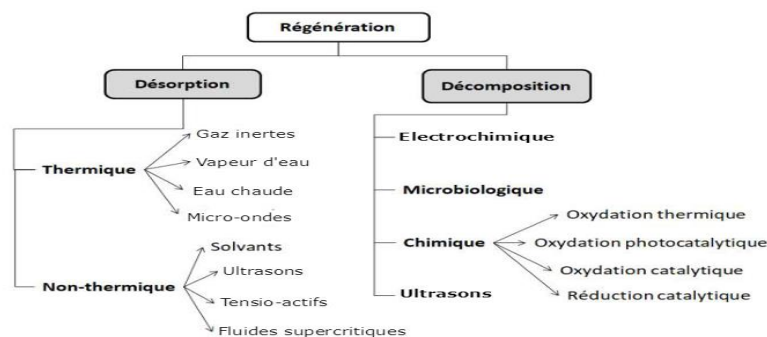


Figure 4-8 techniques développées pour la régénération des adsorbants.

### 4.7 La régénération thermique :

La régénération thermique est une désorption accélérée par un traitement thermique à haute température (700 à 1 000°C) en présence de gaz inertes ou oxydants (vapeur d'eau ou CO<sub>2</sub>). Le principe repose sur le transfert des polluants en phase gazeuse. C'est le procédé industriel le plus largement utilisé. Les unités de régénération ne sont souvent pas sur le site d'utilisation des charbons activés, car les températures élevées nécessitent des équipements spéciaux (four à soles étagées ou four rotatif). Il faut donc assurer le transport des charbons actifs.

#### 4.8 L'effet de la chaleur produite par le système de Fresnel sur les adsorbants :

Au cours de cette expérience nous avons mis une quantité des adsorbant sur le foyer de notre système et on le laisse exposé pendant 5 min a une température qui varie entre 500 °C et 600 °C.



*Figure 4-9 : Photographie des adsorbants utilisés avant la régénération*



*Figure 4-10 : Adsorbant après régénération.*



Les résultats montrent bien que la température générée par le système de Fresnel a influé positivement sur l'adsorbant car nous avons remarqué que la couleur a changé du noir à un marron orangé ce qui se traduit par un phénomène de régénération.

### 4.9 Conclusion :

En variant la distance entre la lentille de Fresnel et le foyer la mesure de température s'est montrée efficace pour la régénération des adsorbants.

En mesurant le courant et la tension et tout le long de la journée on a obtenu des résultats qui assurent l'importance d'utilisation des suiveurs solaires.

# Conclusion Générale

## CONCLUSION GENERALE :

Comme indiqué précédemment, cette étude a principalement pour but de réaliser un concentrateur solaire pour la régénération des adsorbants qui est connecté à un suiveur solaire, ce dernier est alimenté par un panneau photovoltaïque. Notre réalisation a été conçue, analysé pour répondre aux exigences fonctionnelles présentées. Toutes les pièces et ressources nécessaires ont été spécifiées, obtenues et budgétisées pour l'acquisition. Après une analyse et un examen approfondi, on peut conclure que le dispositif en question est prêt à être utilisé dans le domaine de la régénération des adsorbants utilisés pour l'épuration. Ce projet répond à toutes les exigences qu'on était mise en question, y compris :

1. Atteindre une température suffisante pour la régénération des adsorbants.
2. Réaliser un traqueur solaire fonctionnel et l'alimenter par un panneau photovoltaïque de 10Wc.

Notre système peut dépasser les 1000 °C, il est parfaitement adapté pour la régénération des adsorbants qu'on va être utiliser pour l'épuration des eaux usées, d'où nous avons eu des résultats satisfaisants concernant les adsorbants, ces résultats sont les mêmes que ceux obtenus par des expériences qui utilisent des systèmes électriques très énergivores, ainsi on pourra l'utiliser pour d'autres applications qui nécessite une telle haute température.

Le suiveur solaire a été fonctionnel, il nous a permis d'améliorer le gain énergétique pour le système de Fresnel ainsi que le gain énergétique du panneau photovoltaïque.

Par la suite, notre réalisation peut être améliorée et développée, à savoir :

- L'utilisation d'une lentille d'une superficie supérieure afin d'atteindre des hautes températures.
- Inciter la recherche scientifique a varié la distance entre le foyer et la lentille.
- L'utilisation de la lentille de Fresnel pour concentrer les rayonnements solaires sur le panneau photovoltaïque pour améliorer son gain énergétique.



## Bibliographie :

---

- [1] F. Pronovost Développement d'un concentrateur solaire dans une perspective d'exploitation durable de l'énergie solaire Canada 2010.
- [2] G.Cochevelou L'énergie solaire maîtrise et performance photovoltaïque
- [3] L,Wald Introduction au Rayonnement Solaire 2021.
- [4] F. Camacho Manuel Berenguel. Control of Solar Energy Systems University of Almeria, Spain 2012.
- [5] A. Zekry Solar Cells and Arrays: Principles, Analysis, and Design Ain Shams University 2018.
- [6] Y. El Mghouchi Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations Morocco 2015.
- [7] T.Fares Solar energy in Algeria between exploitation policies and export potential Algeria 2019.
- [8] Z. Bouzid Overview of Solar Potential, State of the Art and Future of Photovoltaic Installations in Algeria 2015.
- [9] A. Bouraiou Status of Renewable Energy Potential and Utilization in Algeria 2019.
- [10] A. Abdulameer Abood A comprehensive solar angles simulation and calculation using matlab University of Baghdad Iraq 2015.
- [11] H.Haberlin J. Wiley & Sons, Chichester, W. Sussex, Photovoltaics system design and practice United Kingdom 2012.
- [12] S.Kumar Jha , S. Roy; V. Kumar Singh D. Prasad Mishra Sun's Position Tracking by Solar Angles Using MATLAB India 2020.
- [13] A. Kalogirou Solar Energy Engineering. Processes and Systems 2013.
- [14] [Longitude et latitude.docx \(comenius2011.com\)](#)
- [15] [Altitude - Définition et Explications \(techno-science.net\)](#)
- [16] [Latitude : définition et explications \(techno-science.net\)](#)
- [17] A.Tchapo Singo Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010.
- [18] Monteny b.a étude spectrale du rayonnement solaire en basse Cote d'ivoire 1974.

## Bibliographie

---

- [19] M.Wasfi Solar Energy and Photovoltaic Systems 2011.
- [20] P. Bessemoulin LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET SA COMPOSANTE ULTRAVIOLETTE 2000.
- [21] J.Royer Thomas , D. Eric Schiller , B.Sada Sy le pompage photovoltaïque Canada 1998.
- [22] <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/SEM08/S08P09.HTM>
- [23] B.Sorensen , Origin of renewable energy flows in Renewable Energy (Fifth Edition), Department of Wind Energy, Technical University of Denmark 2017.
- [24] M.E. Hulley The urban heat island effect: causes and potential solutions in Metropolitan Sustainability, 2012.
- [25]<https://study.com/academy/lesson/solar-radiation-transfer-absorption-reflection-scattering.html>
- [26] F. Cruz-Peragon Characterization of solar flat plate collectors Spain 2016.
- [27] J. John, Nidhi .m j A review on performance of solar thermal flat plate collector using different heat transfer fluids Kerala 2015 .
- [28] H.KAROUA Etude des performances thermiques d'un capteur solaire avec effet de concentration de type Fresnel 2011 .
- [29] S.C.Bhatia Advanced Renewable Energy Systems 2014.
- [30] N.Bist , A.Sircar Hybrid solar geothermal setup by optimal retrofitting India 2021.
- [31] R.Pitz-Paal, in Future Energy (Second Edition), 2014.
- [32] H. Singh A Current Review on Linear Fresnel Reflector Technology and Its Applications in Power Plants 2021.
- [33] M. Asif, in Encyclopedia of Sustainable Technologies, 2017.
- [34] M.U.H. Joardder, ... M.H. Masud, in Clean Energy for Sustainable Development, 2017.
- [35] S. Jie Un examen des techniques solaires thermiques axées sur la ligne: auges paraboliques et Fresnel linéaire Chine.
- [36] QibinLiu Modeling and optimizing parabolic trough solar collector systems using the least squares support vector machine method Chine 2012.
- [37] J.Wu A review of thermal absorbers and their integration methods for the combined solar photovoltaic/thermal (PV/T) modules 2016 .

## Bibliographie

---

- [38] S.Reddy Penaka Digital Mapping of Techno-Economic Performance of a Water-Based Solar Photovoltaic/Thermal (PVT) System for Buildings over Large Geographical Cities 2020.
- [39] M.Nesma Etude théorique et expérimentale de l'influence des paramètres climatiques de la région d'Adrar sur le fonctionnement des capteurs solaires Algérie 2020.
- [40] Sakhr M.Sultan M.N. Ervina Efzan Review on recent Photovoltaic/Thermal (PV/T) technology advances and applications 2018.
- [41] D. Honore la lentille de Fresnel : histoire et mise en œuvre France 2015.
- [42] W.T. Xiea, Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses 2011.
- [43] <https://nanovea.com/fresnel-lens-topography/>
- [44] S. El-Yahyaoui Photovoltaïque à concentration : optimisation de l'étage secondaire 2017 .
- [45] Z.Foudil Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïque Université Mentouri Constantine Algérie 2009 .
- [46] B.Paridaa, S. Iniyanb, Ranko Goicc A review of solar photovoltaic technologies 2010.
- [47] N.H. Zaini, M. Z. Ab Kadir, M. Izadi, N.I. Ahmad, M.A.M Radzi and N. Azi The Effect of Temperature on a Mono-crystalline Solar PV Panel 2015
- [48] Z.El Jouad Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques 2017
- [49] D.Berrian Développement des modèles mathématiques d'un générateur photovoltaïque défectueux 2015.
- [50] M.Arabiya Etude et réalisation d'un suiveur solaire photovoltaïque 2016 .
- [51] Cours captation, chapitre 5: Capteurs solaires photovoltaïques Université Alioune DIOP de Bambey 2015.
- [52] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/short-circuit-current>
- [53] W C Benmoussa , Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin Algérie 2007 .
- [54] F. Adamo , F. Attivissimo , A. Di Nisio , A. M. L. Lanzolla , M. Spadavecchia Parameters estimation for a model of photovoltaic panels Department of Electrical and Bari, Italy 2009 .
- [55] T.Dittrish Materials Concepts for Solar Cells Basic Characteristics and Characterization of Solar Cells 2015 .

## Bibliographie

---

- [56] M.Fahad Modélisation d'un module photovoltaïque de type bp sx 150 pour la génération d'énergie électrique Juin 2020.
- [57]l. Bouhaki, R.Saadani, R.Agounoun, K.Sbai, M.Rahmoune Simulation et comparaison des trois technologies des modules photovoltaïques raccordés au réseau 2017.
- [58] M. Djedid Etude expérimentale de l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement d'une cellule PV 2019.
- [59] <https://www.civisol.fr/info/8-les-panneaux-solaires-photovoltaïques>
- [60] B. Bora O.S. Sastrya, R. Singha Series Resistance measurement of Solar PV Modules using Mesh in Real Outdoor condition 2015.
- [61] S.Belbachir Modélisation Et Simulation De L'influence De La Résistance Shunt Sur Les Caractéristiques I(v) Et P(v) D'une Cellule Photovoltaïque 2017.
- [62] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance>
- [63] <https://www.solarpowerworldonline.com/2016/05/advantages-disadvantages-solar-tracker-system/>
- [64] A.Z. Hafeza, A.M. Yousefa, N.M. Haraga Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types 2018.
- [65] S.Seme G.S'tumberger A novel prediction algorithm for solar angles using solar radiation and Differential Evolution for dual-axis sun tracking purposes 2011.
- [66] <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/single-axis-trackers/>
- [67] k. Deekshith , Dhruva Aravind , H. Nagaraju , B. Reddy Solar tracking system 2015.
- [68] <https://www.eagle-robotics.com/>
- [69] Dr.N.Sathish Kumar IOT Based Smart Garbage alert system using Arduino UNO 2016.
- [70] [https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno\\_R3\\_Front](https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno_R3_Front).
- [71] M. Jasim Fadhil Design and implementation of smart electronic solar tracker based on Arduino 2019.
- [72] S.Lohiya Electronic Street Light Using Solar Power and LED 2015.
- [73] BRC 18650 3.7v 7800 mAh Rechargeable Li-ion battery (tu-eshop.com)
- [74] Texas Instruments Incorporated SBOS448G AUGUST 2008–REVISED DECEMBER 2015.



## Bibliographie

---

[75] INA219 Current Sensor with Arduino circuit and code explained (electronicclinic.com).

[76] <https://www.gotronic.fr/art-capteur-de-courant-ina219b-ada904-20701.htm>

[77] T.Zhang, R.Wang, in Handbook of Energy Efficiency in Buildings, 2019.

[78] Steca Elektronik GmbH PV EN SITE ISOLÉ On va le régler Steca Charge Controller Manual - Solsum F Series (autosolar.es).

[79] <https://www.steca.com/index.php?Steca-Solsum-0606-0808-1010-en>

[80] [http://wiki.sunfounder.cc/index.php?title=OLED-SSD1306\\_Module](http://wiki.sunfounder.cc/index.php?title=OLED-SSD1306_Module)

# Annexes

### *Annexe 1 : Programme d'arduino utiliser pour le suiveur solaire*

```
#include<Servo.h>

// 180 horizontal MAX

Servo horizontal; // horizontal servo

Servo vertical; // vertical servo

int servoh = 90; // 90; // stand horizontal servo

int servohLimitHigh = 180;

int servohLimitLow = 0;

// 65 degrees MAX

int servov = 45; // 90; // stand vertical servo

int servovLimitHigh = 180;

int servovLimitLow = 0;

void setup() {

    // put your setup code here, to run once:

    horizontal.attach(9);

    vertical.attach(10);

    horizontal.write(90);

    vertical.write(45);

    delay(3000);

}

void loop() {

    // put your main code here, to run repeatedly:

    int dtime = 10; int tol = 50;
```

## Annexes

---

```
int lt = analogRead(0); // down left
int rt = analogRead(1); // down right
int ld = analogRead(2); // top left
int rd = analogRead(3); // top right

int avt = (lt + rt) / 2; // average value top
int avd = (ld + rd) / 2; // average value down
int avl = (lt + ld) / 2; // average value left
int avr = (rt + rd) / 2; // average value right

int dvert = avt - avd; // check the diffirence of up and down
int dhoriz = avl - avr;

//=====
if (-1*tol > dvert || dvert > tol)
{
  if(avt<avd)
  {
    servov = servov + 1;
    if (servov > servovLimitHigh)
    {
      servov = servovLimitHigh;
    }
    vertical.write(servov);
    delay(20);
  }
}
```

```
else if(avt>avd)
{
    servov = servov - 1;
    if (servov < servovLimitLow)
    {
        servov = servovLimitLow;
    }
    vertical.write(servov);
    delay(20);
}
else if(avt==avd)
{
    //nothing
}

}

//=====
if (-1*tol > dhoriz || dhoriz > tol)
{
    if(avl>avr)
    {
        servoh = servoh - 1;
        if (servoh > servohLimitHigh)
        {
            servoh = servohLimitHigh;
        }
        horizontal.write(servoh);
    }
}
```

## Annexes

---

```
    delay(20);
}
else if(avl<avr)
{
    servoh = servoh + 1;
    if (servoh < servohLimitLow)
    {
        servoh = servohLimitLow;
    }
    horizontal.write(servoh);
    delay(20);
}
else if(avl==avr)
{
    //nothing
}

}

//=====

delay(50);

}
```

***Annexe 2 : les caractéristiques du servo moteur sont ci-dessous***

- Bande passante : 0,050 ms
- Système de contrôle : Contrôle de la largeur d'impulsion
- Fréquence de fonctionnement : 20ms de période / 50hz (contrôle numérique)
- Tension de fonctionnement : 4,8 ~ 6 V DC Volts
- Plage de température de fonctionnement : de 0 à + 55 °C
- Vitesse de fonctionnement (4.8v) : 0.200 sec/60°
- Vitesse de fonctionnement (6v) 0.160 sec/60°
- Couple de calage (4.8v) : 9.4kg/cm
- Couple de calage (6v) : 11kg/cm
- Type moteur : Moteur à balais
- Type de mécanisme : Engrenage en laiton et en aluminium
- Matériau du boîtier : Plastique
- Longueur du fil du connecteur : 32.0cm
- Dimensions :40.7×19.7×42.9mm
- Poids : 55 g
- Rotation : 0°-180°

***Annexe 3 : Caractéristiques de la carte Arduino***

Microcontroller	ATmega328
Tension de fonctionnement	5V
Tension entrée (recommandé)	7-12V
Tension d'entrée (limites)	6-20 V
Pins I/O numériques	14
Pins d'entrée analogique	6
Courant continu par pin I/O	40 mA
DC courant pour pin 3.3V	50 mA
Mémoire flash	32 KB
SRAM	2 KB

## Annexes

---

EEPROM	1 KB
Vitesse d'exécution	16 Hz

### ***Annexe 4 : Caractéristique du capteur photorésistance :***

La tension Maximale	150 Vdc
Puissance Maximale	90mW
Température	-25°c a 75 <sup>0</sup> c
Résistance a 10 Lux	Supérieure à 50 Kohm
Résistance a 0 Lux	Supérieure à 0.9 Mohm
Poids Net	0.0002 Kg
Dimension	2×4×5 mm
Temps de réponse	30 ms
Pic spectral	540NM

### ***Annexe 5 : les Caractéristiques des batteries (Ultrafine 7800m Ah)***

Capacité	7800 mAh
Capacité minimale	1000 mAh
Tension Nominale	3.7 V
Tension de fin de charge	4.2 ± 0.05 v
Température de fonctionnement	Charge : 0 à 45 Décharge : 20 a 60
Humidité de stockage	≤ 75 % RH
Dimensions	65mm×17mm
Cycle	1000
Technologie	Lithium-ion



75 76 77 78 80

***Annexe 6 : Caractéristiques du capteur du courant INA219 [76]***

Alimentation	3 a 5 Vcc
Plage de Mesure	Jusqu'à 3.2 Acc
Résolution	0.8 mA
Précision	±1%
Shunt	0.1 $\Omega$ 1 % 2W
Dimension	26×22×13 mm
Adresse I2C	0x40 (ou 0x41, 0x44 et 0x45 modifiable via pontet à souder)

***Annexe 7 : Les Caractéristiques de l'écran d'affichage que nous avons utilisé***

- Pour l'OLED-SSD1306, un écran plus élaboré et plus beau que le LCD, avec plus de fonctions
- Contraste élevé, permettant un affichage clair Sans besoin de rétro-éclairage
- Tension de fonctionnement : 2,7V - 5,5V ; Taille du PCB : 2,8 x 3,2cm
- Circuit imprimé standard double face, d'une épaisseur de 1,16 mm, avec une disposition élégante, des trous de 3 mm aux deux coins pour une fixation facile.
- Faible consommation d'énergie : 0,04 W en fonctionnement normal