

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur**  
**et de la recherche scientifique**

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécaniques

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction mécanique

**Par :**

MEKBEL Tahar

BELHADI Abid

**Thème**

---

**Etude et réalisation d'un four solaire**

---

Soutenu le 26/06/2018 devant le jury composé de:

<b>Mr.</b> BENSAID Nourddine	Président
<b>Melle.</b> ADJOUADI Noura	Rapporteur
<b>Mr.</b> OURARI Kamal	Examineur

**Année Universitaire 2017-2018**



# REMERCIEMENTS

*Nous remercions mon encadreur « Melle: ADJOUADI N » ; qui par son soutien, son suivi, son enthousiasme, ses précieux conseils et ses encouragements permanents, j'ai pu réaliser ce travail, veuillez croire à l'expression de notre profond respect.*

*Nous remercions également tous les membres du Jury qui ont accepté de nous honorer de leur présence et de juger notre travail.*

*Nous remercions aussi toute personne ayant contribué à notre soutien moral ainsi que nos famille et nos amis .*

*Merci à tous*

*MEKBEL Tahar  
BELHADI Abid*



# DEDICACE

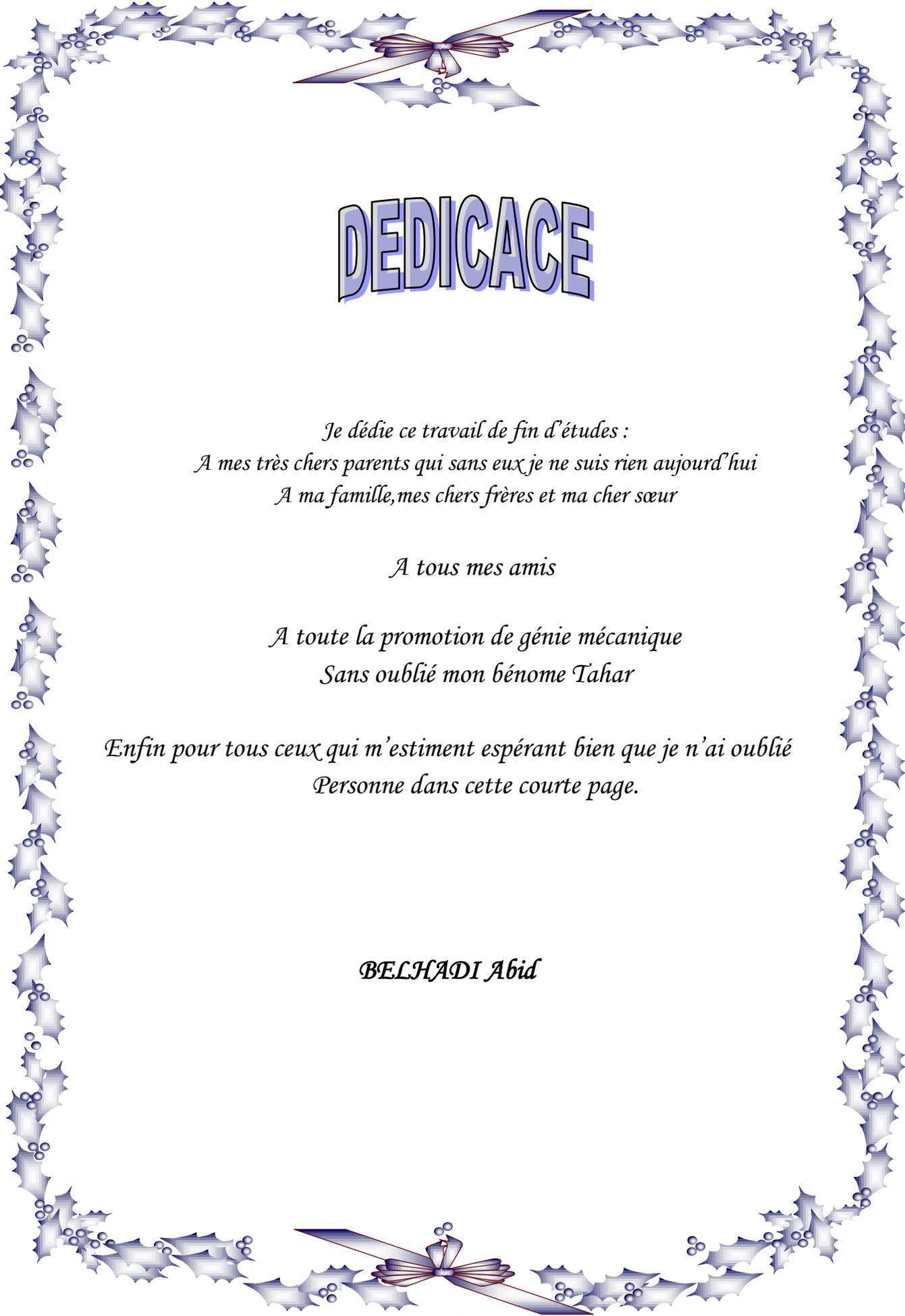
*Je dédie ce travail de fin d'études :  
A mes très chers parents qui sans eux je ne suis rien aujourd'hui  
A ma famille, mes chers frères Djelloul, Amirouche, Jugurtha et mes chers sœurs*

*A tous mes amis*

*A toute la promotion de génie mécanique  
Sans oublier mon bénome Abid*

*Enfin pour tous ceux qui m'estiment espérant bien que je n'ai oublié  
Personne dans cette courte page.*

*MEKBEL Tahar*



# DEDICACE

*Je dédie ce travail de fin d'études :  
A mes très chers parents qui sans eux je ne suis rien aujourd'hui  
A ma famille, mes chers frères et ma chère sœur*

*A tous mes amis*

*A toute la promotion de génie mécanique  
Sans oublier mon benôme Tahar*

*Enfin pour tous ceux qui m'estiment espérant bien que je n'ai oublié  
Personne dans cette courte page.*

*BELHADI Abid*

# *Sommaire*

# SOMMAIRE

---

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Nomenclature

## Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### Chapitre I : Gisement Solaire

I.1. Introduction :.....	3
I .2.Présentation du soleil : .....	3
I.2.1. La carte d'identité de soleil : .....	3
I.2.2. Les constituants principaux de soleil : .....	4
I.2.2.1. Le noyau: .....	4
I.2.2.2. La zone radiative: .....	4
I.2.2.3. La zone de convection: .....	4
I.2.2.4. la photosphère.....	4
I.2.2.5. Chromosphère.....	4
I.2.2.6. La couronne .....	4
I.3. Mouvement du globe terrestre .....	5
I.4. Sphère céleste.....	6
I.5. Coordonnées célestes .....	7
I.5.1. Coordonnées géographiques .....	7
I.5.1.1. Longitude.....	7
I.5.1.2. Latitude .....	7
I.5.2. Coordonnées horaires .....	8
I.5.2.1. Déclinaison solaire .....	8
I.5.2.2. Angle horaire ( $\omega$ ).....	8
I.5.3. Les coordonnées horizontales .....	9
I.5.3.1. Hauteur angulaire du soleil « $\Delta$ » .....	9
I.5.3.2. Angle Azimut « A ».....	9
I.5.4. Angle horaire au coucher du soleil.....	10
I.6. Le rayonnement solaire :.....	10
I.6.1. Composante du rayonnement solaire .....	10

# SOMMAIRE

---

I.6.2. Le rayonnement solaire au sol.....	11
I.6.3. Les instruments de mesure du rayonnement solaire.....	13
I.6.3.1. La mesure du rayonnement solaire direct.....	13
I.6.3.2. La mesure du rayonnement solaire global et diffus.....	13
I.7. Le gisement solaire en Algérie .....	14
I.8. Conclusion .....	17

## Chapitre II : Les Capteurs Solaires

II.1. Introduction .....	18
II.2. Énergie solaire .....	18
II.2.1. L'utilisation de l'énergie solaire .....	18
II.2.2. Les différents types d'énergie solaire .....	19
II.2.2.1. l'énergie passive.....	20
II.2.2.2. l'énergie solaire thermique .....	20
II.2.2.3. l'énergie photovoltaïque .....	21
II.2.2.4. l'énergie thermodynamique .....	22
II.3. Avantages et inconvénients de l'énergie solaires .....	23
II.3.1. Avantages.....	23
II.3.2. Inconvénients .....	23
II.4. Aspect économique.....	23
II.5. L'effet sur l'environnement.....	24
II.6. Les capteurs solaires:.....	25
II.6.1. Principe de captation du rayonnement solaire .....	26
II.6.2. Les Types des capteurs solaires .....	26
II.6.2.1. Les panneaux solaires photovoltaïques .....	26
II.6.2.2. Les Capteurs à concentration .....	27
II.6.2.2.1. Tour solaire .....	27
II.6.2.2.2. Capteurs paraboliques .....	28
II.6.2.2.3. Capteur cylindro-parabolique.....	29
II.6.2.3. Les capteurs solaires à tubes sous-vide .....	30
II.6.2.3.1. Circulation directe .....	31

# SOMMAIRE

---

II.6.2.3.2. Capteur à caloduc .....	31
II.6.2.4. Capteur plan .....	31
II.6.2.4.1. Les capteurs plans vitrés.....	31
II.6.2.4.2. Les capteurs plans non vitrés.....	32
II.7. Fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	33
II.8. Les avantages et les inconvénients des différents capteurs solaires .....	33
II.8.1 Avantages.....	33
II.8.2. Inconvénients .....	34
II.9. Conclusion .....	34

## Chapitre III : Les Fours Solaires

III.1. Introduction .....	36
III.2. Historique des fours solaires .....	36
III.3. Principe de fonctionnement du four solaire .....	37
III.4. Les modèles de fours solaires.....	37
III.4.1. Le four à panneaux .....	37
III.4.2. Le four parabolique .....	38
III.4.3. Le four boîte .....	39
III.5. Les composants du four solaire boîte .....	40
III.5.1. Absorbeur .....	40
III.5.2. le réflecteur .....	40
III.5.3. Angles d'inclinaison du réflecteur.....	41
III.5.4. le vitrage .....	41
III.5.5. Isolation .....	42
III.6. Emplacement du four solaire.....	42
III.7. Comment optimiser la température dans un four solaire .....	42
III.8. L'angle d'orientation du four par rapport au soleil .....	43
III.9. Les températures et temps de cuisson .....	43
III.10. Comment limiter les pertes de chaleur .....	44
III.10.1. La conduction .....	44
III.10.2. La convection .....	45
III.10.3. Le rayonnement .....	45
III.11. Avantages et inconvénients des fours solaires .....	45
III.11.1. Avantages .....	45

# SOMMAIRE

---

III.11.2. Inconvénients.....	46
III.12.CONCLUSION .....	46

## **Chapitre IV : Conception Du Four Solaire**

IV.1. Introduction.....	47
IV.2.Principe et fonctionnement de four solaire boîte .....	47
IV.3.Description du four solaire.....	47
IV.4. Conception du cuiseur boîte sous logiciel SolidWorks .....	49
IV.5.Les étapes de réalisation de four solaire .....	50
IV.6. Détermination du Taux de transmission de la vitre .....	52
IV.7. Détermination du Taux de réflexion de l'inox.....	54
IV.8.Calcul de l'angle d'inclinaison du réflecteur .....	55
IV.9. Expériences et résultats.....	58
IV.10. Variation de différentes températures en fonction de temps.....	58
IV.10.1. Description de l'expérience.....	58
IV.10.2. Présentation des Résultats des expériences .....	58
IV.10.2.1.La journée du 29/05/2018.....	58
IV.10.2.2.La journée du 31/05/2018.....	60
IV.10.2.3.La journée du 03/06/2018.....	61
IV.11. Résumé des résultats .....	63
Conclusion Générale.....	64

Annexe A

## Liste des figures

Figure I.1 : Les constituants principaux de soleil.....	5
Figure I.2 : Variation saisonnière du rayonnement solaire .....	6
Figure I.3 : La sphère céleste.....	6
Figure I.4 : Les coordonnées géographiques.....	7
Figure I.5 : La déclinaison du soleil en fonction des jours. ....	8
Figure I.6 : Les coordonnées horaires .....	9
Figure I.7 : Les coordonnées horizontales.....	10
Figure I.8 : la longueur d'onde de rayonnement solaire. ....	11
Figure I.9 : Bilan du rayonnement solaire arrivé au sol .....	12
Figure I.11 : Instruments de mesure du rayonnement solaire .....	14
Figure I.12 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel. ....	15
Figure II.1 : Schémas représente un plan de l'utilisation de l'énergie solaire .....	19
Figure II.2 : énergie solaire passive. ....	20
Figure II.3 : énergie solaire thermique. ....	21
Figure II.4 : énergie solaire photovoltaïque. ....	22
Figure II.5 : énergie solaire thermodynamique. ....	22
Figure II.6 : Panneaux solaire photovoltaïque. ....	27
Figure II.7 : Centrale à tour solaire .....	28
Figure II.8 : Les centrales à capteur parabolique. ....	29
Figure II.9 : Concentrateur cylindro-parabolique .....	30
Figure II.10 : capteur solaire à tubes sous-vide.....	30
Figure II.11 : Capture plan vitrés. ....	32
Figure II.12 : Capture plan non vitré.....	32
Figure II.13 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan.....	33
Figure III.1: Le four à panneaux. ....	37
Figure III.2: Le four parabolique.....	38
Figure III.3: Le four boîte.....	39
Figure III.4: Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs.....	43
Figure .IV.1: Les composants principaux de four solaire .....	48

## Liste des figures

---

Figure IV.2. Conception du cuiseur solaire boîte avec logiciel SolidWorks .....	50
Figure IV.3.réalisation finale .....	52
Figure IV.4 : Un montage optique pour déterminer le Taux de transmission de la vitre.....	53
Figure IV.5 : Un montage optique déterminer le Taux de réflexion de l'inox. ....	54
Figure IV.6 : Angle d'inclinaison de réflecteur par rapport à l'horizontale .....	54
Figure IV.7 : courbe représente les variations des différentes températures en fonction de temps .....	59
Figure IV. 8 : courbe représente les variations des différentes températures en fonction de temps .....	60
Figure IV.9 : courbe représente les variations des différentes températures en fonction de temps .....	62

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau I.1.</b> Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	15
<b>Tableau IV.1 :</b> les principales données techniques de notre four solaire.....	49
<b>Tableau IV.2.</b> Calcule de Coefficient de transmission de verre.....	54
<b>Tableau IV.3 :</b> représente les variations des différentes températures en fonction de temps .....	59
<b>Tableau IV. 4 :</b> représente les variations des différentes températures en fonction de temps.... .....	.60
<b>Tableau IV.5 :</b> représente les variations des différentes températures en fonction de temps.... .....	61
<b>Tableau IV.6 :</b> résume les différentes températures (T amb et T four). ....	63

## Nomenclature

Symbole	Description	Unité
$\lambda$	Longitude	(°) degré
$\varphi$	Latitude	(°) degré
$\delta$	Déclinaison solaire	(°) degré
$\omega$	Angle horaire	(°) degré
$\Delta$	Hauteur angulaire du soleil	(°) degré
$\omega_s$	Angle horaire de coucher du soleil	(°) degré
$A$	Azimut	(°) degré
$\theta$	Angle des rayons solaires avec la verticale plan de réflecteur	(°) degré
$\beta$	Angle d'inclinaison de la vitre du four à surface inclinée	(°) degré
$\alpha$	Angle du réflecteur principal avec l'horizontal, ( $\alpha_h$ pour le cuiseur à surface horizontale, $\alpha_i$ pour le cuiseur à surface inclinée)	(°) degré
$T_{\text{four}}$	Température à l'intérieure du four	(°C)
$T_{\text{amb}}$	Température ambiante	(°C)
$I_o$	intensité de la lumière issue de la source lumineuse sans la vitre	Volt
$I_v$	par intensité de la lumière transmise la vitre	Volt
$T_V$	Taux de transmission de la vitre	(%)
$I_i$	intensité de la lumière reflétée par l'inox	Volt
$R_i$	Taux de réflexion de l'inox	(%)

# *Introduction générale*

# Introduction Générale

---

La consommation mondiale énergétique augmente malheureusement au détriment de l'environnement qui nous entoure, d'une part, et non renouvelable d'autre part. En effet, les énergies fossiles [charbon, pétrole, gaz naturel] sont utilisées de manière abusive. Ces énergies sont polluantes et limitées. Aujourd'hui la communauté scientifique reconnaît la responsabilité de cette consommation sur le réchauffement climatique qui risque d'avoir des effets dramatique sur les équilibres physiques, économiques ,sociaux et politiques de notre planète. Le recours à des énergies propres pour assurer la sécurité énergétique et le développement économique et social des populations devient incontournable. Les énergies renouvelables et spécialement le solaire devrait être la tendance en tenant compte de la sécurité de l'approvisionnement et de la protection de l'environnement ce choix est motivé par le fait que la quantité d'énergie solaire reçue chaque jour par la planète est 5 fois supérieure à la totalité des consommations quotidiennes humaines (nucléaire, charbon, bois, fioul, gaz, hydraulique...). L'Algérie dispose d'un potentiel solaire le plus fort sur la rive méditerranéenne sur 3500 heures d'ensoleillement par an. Ajuste titre d'exemple, le solaire thermique est de 169440 TWh/an représentant près de 4 fois la consommation énergétique mondiale. Elle possède un potentiel considérable en ce qui concerne les compétences humaines. De ce fait, elle est plus que jamais appelée à s'orienter vers le développement de cette forme d'énergie. [32]

La cuisson solaire est l'une des applications possibles de cette énergie. Le cuiseur solaire contribue à résoudre deux des problèmes majeurs dans le monde

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire est une contribution pour une meilleure intégration des dispositifs à cuisson solaire (cuiseurs solaires boîtes) dans la vie quotidienne

Notre proposition s'est portée sur un design de cuiseur solaire boîte avec une surface réceptrice inclinée permettant de minimiser l'ombrage exercé sur la plaque absorbante par augmentation de la surface d'ouverture, ce qui permet de gagner une quantité importante de rayonnement solaire. Et pour recevoir encore un supplément d'énergie, nous avons effectué une étude pour l'intégration des réflecteurs dans la conception du design final de notre cuiseur.

Le présent travail comporte quatre chapitres et une partie annexe.

## Introduction Générale

---

- Le premier chapitre est consacré sur une généralité sur le soleil et le gisement solaire en Algérie avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.
- Le deuxième chapitre concernant une étude sur l'énergie solaire et une étude théorique sur les capteurs solaires.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différents types des fours solaires et leur fonctionnement et les facteurs qui contrôlent le bon fonctionnement de ces fours.
- Dans le quatrième chapitre nous présentons les différentes étapes de réalisation du four solaire ainsi que les dessins de définitions avec logiciel SolidWorks, à la fin de ce chapitre on a présenté les premières expériences.
- Une introduction générale et une conclusion se rapportant au travail, complètent ce mémoire.

# Introduction Générale

---

La consommation mondiale énergétique augmente malheureusement au détriment de l'environnement qui nous entoure, d'une part, et non renouvelable d'autre part. En effet, les énergies fossiles [charbon, pétrole, gaz naturel] sont utilisées de manière abusive. Ces énergies sont polluantes et limitées. Aujourd'hui la communauté scientifique reconnaît la responsabilité de cette consommation sur le réchauffement climatique qui risque d'avoir des effets dramatique sur les équilibres physiques, économiques ,sociaux et politiques de notre planète. Le recours à des énergies propres pour assurer la sécurité énergétique et le développement économique et social des populations devient incontournable. Les énergies renouvelables et spécialement le solaire devrait être la tendance en tenant compte de la sécurité de l'approvisionnement et de la protection de l'environnement ce choix est motivé par le fait que la quantité d'énergie solaire reçue chaque jour par la planète est 5 fois supérieure à la totalité des consommations quotidiennes humaines (nucléaire, charbon, bois, fioul, gaz, hydraulique...). L'Algérie dispose d'un potentiel solaire le plus fort sur la rive méditerranéenne sur 3500 heures d'ensoleillement par an. Ajuste titre d'exemple, le solaire thermique est de 169440 TWh/an représentant près de 4 fois la consommation énergétique mondiale. Elle possède un potentiel considérable en ce qui concerne les compétences humaines. De ce fait, elle est plus que jamais appelée à s'orienter vers le développement de cette forme d'énergie. [32]

La cuisson solaire est l'une des applications possibles de cette énergie. Le cuiseur solaire contribue à résoudre deux des problèmes majeurs dans le monde

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire est une contribution pour une meilleure intégration des dispositifs à cuisson solaire (cuiseurs solaires boîtes) dans la vie quotidienne

Notre proposition s'est portée sur un design de cuiseur solaire boîte avec une surface réceptrice inclinée permettant de minimiser l'ombrage exercé sur la plaque absorbante par augmentation de la surface d'ouverture, ce qui permet de gagner une quantité importante de rayonnement solaire. Et pour recevoir encore un supplément d'énergie, nous avons effectué une étude pour l'intégration des réflecteurs dans la conception du design final de notre cuiseur.

Le présent travail comporte quatre chapitres et une partie annexe.

## Introduction Générale

---

- Le premier chapitre est consacré sur une généralité sur le soleil et le gisement solaire en Algérie avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.
- Le deuxième chapitre concernant une étude sur l'énergie solaire et une étude théorique sur les capteurs solaires.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différents types des fours solaires et leur fonctionnement et les facteurs qui contrôlent le bon fonctionnement de ces fours.
- Dans le quatrième chapitre nous présentons les différentes étapes de réalisation du four solaire ainsi que les dessins de définitions avec logiciel SolidWorks, à la fin de ce chapitre on a présenté les premières expériences.
- Une introduction générale et une conclusion se rapportant au travail, complètent ce mémoire.

*Chapitre I :*  
*Gisement solaire*

## I.1. Introduction :

Le Soleil produit la chaleur et la lumière nécessaires à la vie sur Terre. Ce rayonnement solaire est utilisé pour chauffer et pour produire de l'électricité.

Le Soleil est une fantastique boule de feu qui brûle depuis 4,7 milliards d'années. Elle est grande et chaude, même si nous en sommes très éloignés, nous bénéficions encore de sa chaleur et de sa lumière. Le Soleil est  $1.3 \cdot 10^6$  Fois plus gros que la Terre, et la chaleur dans son cœur peut atteindre 16 millions de degrés, 150 millions de kilomètres nous séparent de cette formidable source d'énergie, et notre atmosphère nous protège de la puissance de ses rayons. [1]

## I.2.Présentation du soleil :

Le soleil est situé au centre d'un système dit « système solaire » dont la terre fait partie avec d'autres planètes. Le Soleil a une forme sphérique qui est constitué d'hydrogène (71%), d'hélium (27%), et d'autres éléments, plus lourds (2%). Au centre du Soleil, la température atteint environ 16 millions de degrés Celsius, en surface la température du soleil est d'environ  $5900^\circ \text{K}$ . [3]

### I.2.1. La carte d'identité de soleil :

Le soleil est caractérisé par les paramètres suivants :

- Masse :  $2 \cdot 10^{30} \text{ Kg}$ , soit  $1.3 \cdot 10^6$  Fois celle de la terre.
- Rayon :  $7 \cdot 10^8 \text{ m}$ , soit  $10^2$  Fois celui de la terre.
- Age de soleil:  $4,7 \cdot 10^9$  Années.
- Puissance rayonnée par le soleil :  $4 \cdot 10^{23} \text{ kw}$ .
- Distance moyenne (d) à la terre :  $150 \cdot 10^9 \text{ m}$ , il faut de plus de 8mn pour que la lumière solaire nous parvienne. [4]

## **I.2.2. Les constituants principaux de soleil :**

### **I.2.2.1. Le noyau:**

Il s'étend du centre à environ 0,2 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à 76000 kg/m<sup>3</sup>. C'est là qu'est produite l'énergie solaire. [5]

### **I.2.2.2. La zone radiative:**

Elle s'étend de 0,2 à 0,7 rayon solaire environ. Sa température est bien plus basse que celle du noyau, mais sa densité reste très forte. Cette zone joue un rôle important dans les transferts et le filtrage de l'énergie, du cœur vers la surface du Soleil. [5]

### **I.2.2.3. La zone de convection:**

Elle s'étend de 0,7 rayon solaire à 400 km de la surface du Soleil environ. Elle permet les échanges d'énergie entre la zone radiative et la photosphère. En raison de sa faible densité, les échanges dans cette zone se font par convection: les gaz chauds remontent à la Surface, se refroidissent, puis redescendent, se réchauffent, remontent, et ainsi de suite. [5]

### **I.2.2.4. la photosphère :**

C'est la couche gazeuse qui enveloppe le soleil .elle est responsable de presque la totalité du rayonnement que la terre reçoit. Elle est mince d'environ 300km, et de pression de 10<sup>-2</sup> atmosphère et une densité de 10<sup>-8</sup>g/cm<sup>3</sup>. [5]

### **I.2.2.5. Chromosphère :**

Elle surmonte la photosphère. C'est une couche gazeuse qu'on assimile à l'atmosphère solaire son épaisseur 2000 à 3000 km . [5]

### **I.2.2.6. La couronne :**

C'est une auréole blanche irrégulière sans limite définies. Son épaisseur est de l'ordre de 3.10<sup>6</sup> Km. [5]

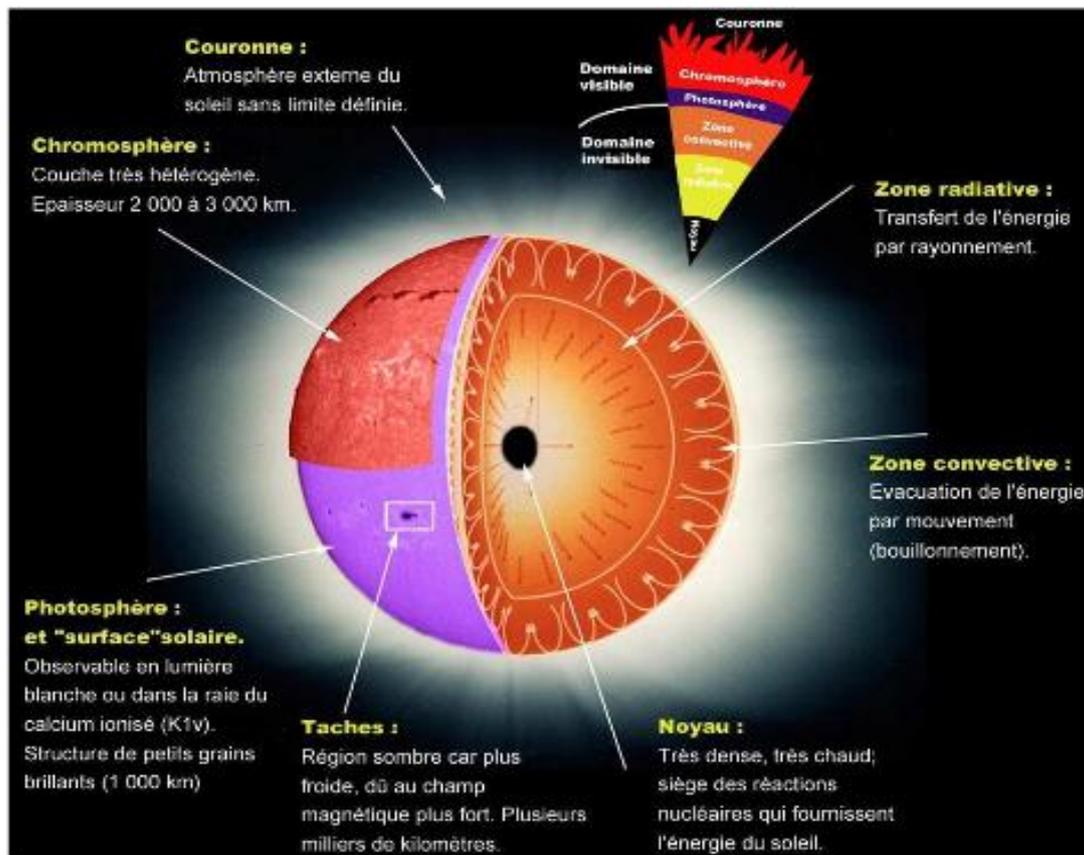
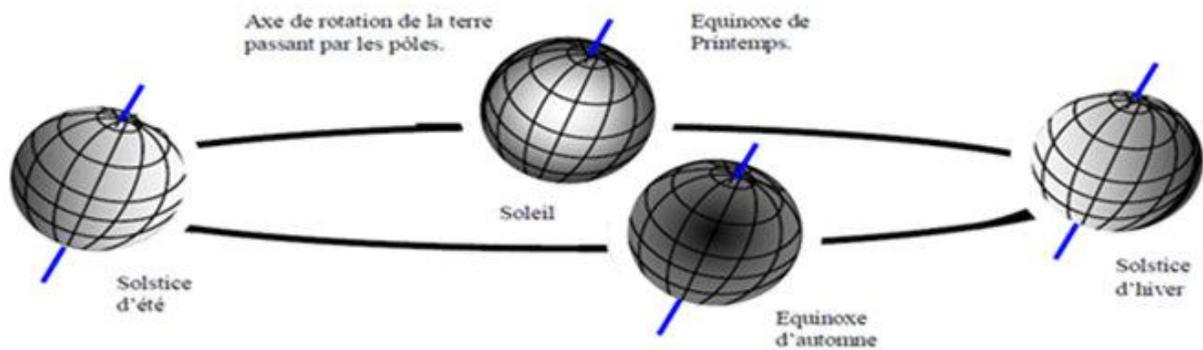


Figure I.1 : Les constituants principaux de soleil. [5]

### I.3. Mouvement du globe terrestre :

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est plus proche du soleil, et au solstice d'été (22 juin) qu'elle en est plus éloignée.

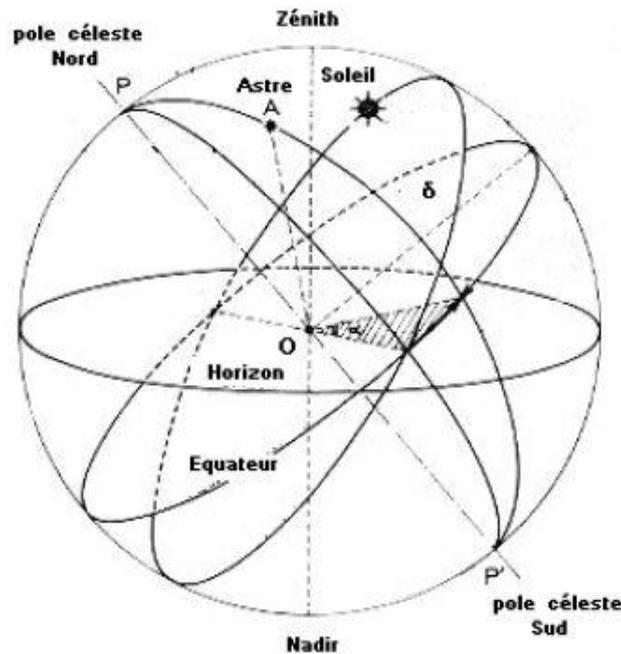
La terre tourne sur elle-même avec une période de 24h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle  $23,27^\circ$  avec la normale au plan de l'écliptique. [6]



**Figure I.2 :** Variation saisonnière du rayonnement solaire [6]

#### I.4. Sphère céleste :

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



**Figure I.3 :** La sphère céleste [7]

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes. [7]

## I.5. Coordonnées célestes :

### I.5.1. Coordonnées géographiques :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre.

#### I.5.1.1. Longitude :

La longitude d'un lieu « $\lambda$ » correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine  $0^\circ$ ) le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'Ouest [7] [8].

Pour Bejaia on a : [9]

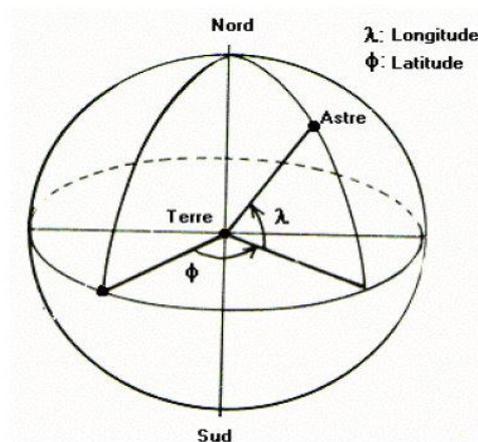
Longitude ( $\lambda$ ) =  $5.5^\circ$  Est ..... (I.1)

#### I.5.1.2. Latitude :

La latitude d'un lieu « $\phi$ » correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à  $0^\circ$ , le pôle Nord par la latitude  $+90^\circ$  et le pôle Sud par la latitude  $-90^\circ$ . Cette convention de signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère Nord et le signe(-) à tous les lieux de l'hémisphère Sud. [8] [9]

Pour Bejaia on a : [9]

Latitude ( $\phi$ ) =  $36.45^\circ$  Nord.....(I.2)



**Figure I.4 :** Les coordonnées géographiques [7]

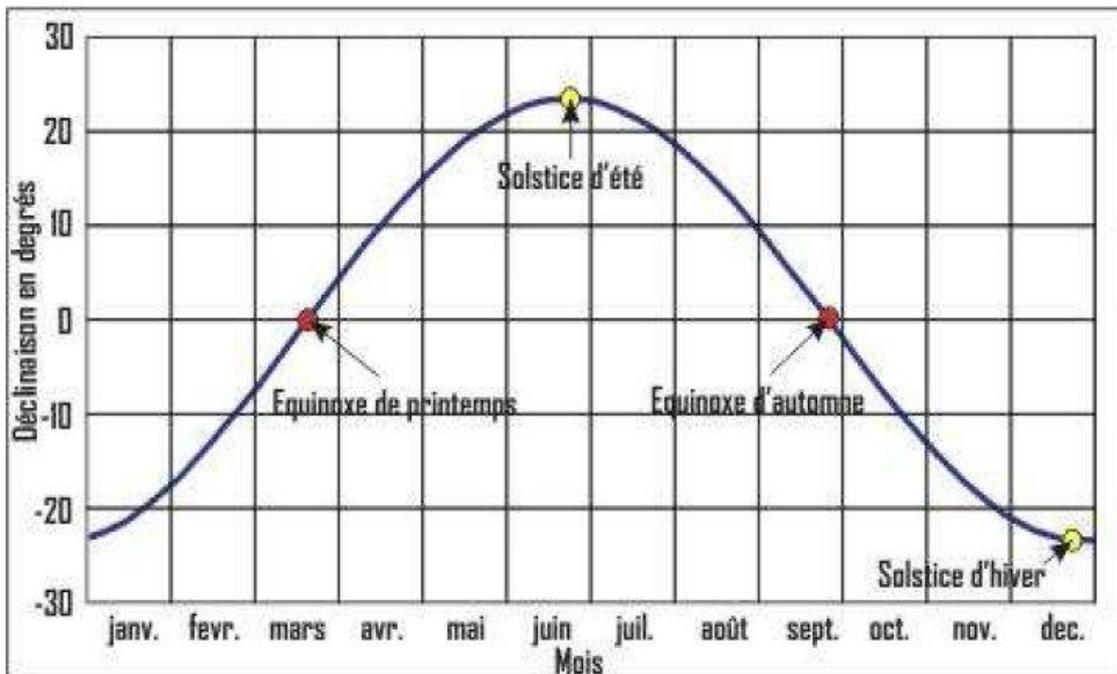
**I.5.2. Coordonnées horaires :**

**I.5.2.1. Déclinaison solaire :**

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes : -23,27° et +23,27° environ. Elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule (I.3). [10]

$$\delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \frac{(284+j)}{365} \right) \dots \dots \dots (I.3)$$

**j** : Numéro du jour dans l'année.



**Figure I.5 :** La déclinaison du soleil en fonction des jours. [10]

**I.5.2.2. Angle horaire (ω) :**

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre 0° et 360°. La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après midi et augmente de 15° par heure. [8] [9]

L'angle horaire  $\omega$  est donné par l'équation suivante :

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \dots\dots\dots(I.4)$$

t : le temps dans la journée. (Heure)

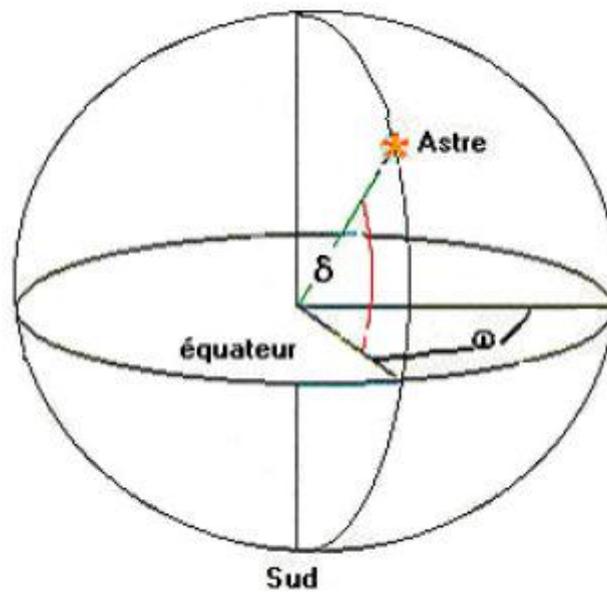


Figure I. 6 : Les coordonnées horaires [8]

### I.5.3. Les coordonnées horizontales :

Le soleil est repéré par l'intermédiaire de deux angles :

#### I.5.3.1. Hauteur angulaire du soleil « $\Delta$ » :

C'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de  $0^\circ$  (soleil à l'horizon) à  $90^\circ$  (soleil au zénith). [8] [9]

#### I.5.3.2. Angle Azimut « A » :

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut du soleil est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. [8]

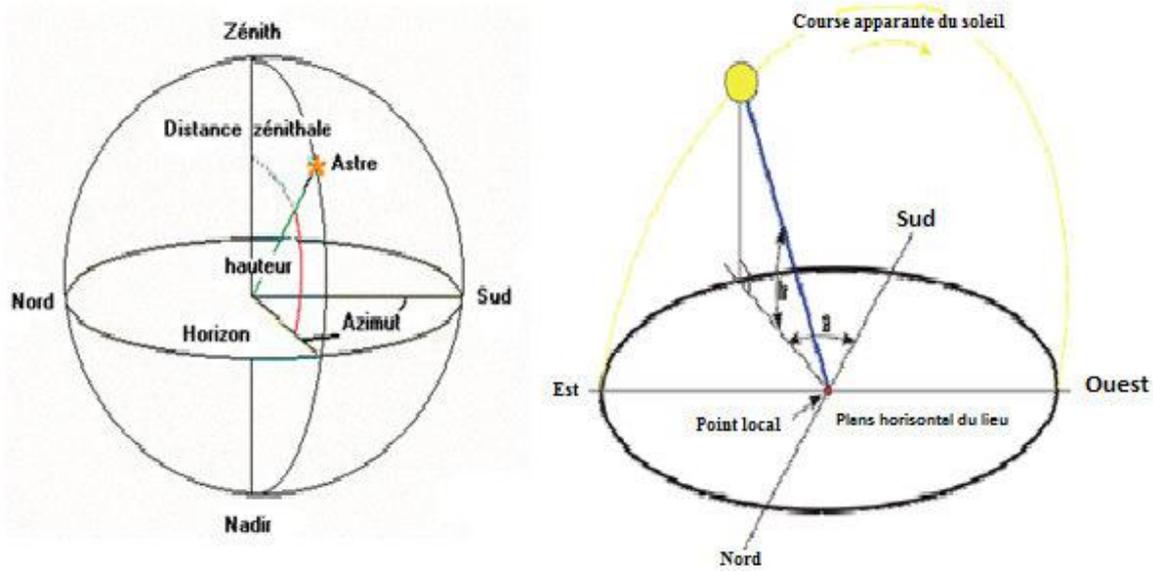


Figure I.7 : Les coordonnées horizontales. [8]

**I.5.4. Angle horaire au coucher du soleil :**

L’angle horaire du soleil est le déplacement angulaire du soleil autour de l’axe polaire. Dans sa course d’Est en Ouest, par rapport au méridien local. Il est donné par l’équation suivante : [10]

$$\omega_s = \text{arc cos} (-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \dots \dots \dots (I. 5)$$

$\delta$  : Déclinaison solaire (°C)

$\varphi$  : Latitude (°C)

**I.6. Le rayonnement solaire :**

Le rayonnement Solaire est une énergie produite par le Soleil à la suite de réactions de fusion thermonucléaire qui dégage une très grande quantité d’énergie, source de la plupart des énergies disponibles sur Terre et exploitable pour la production d’électricité. [14]

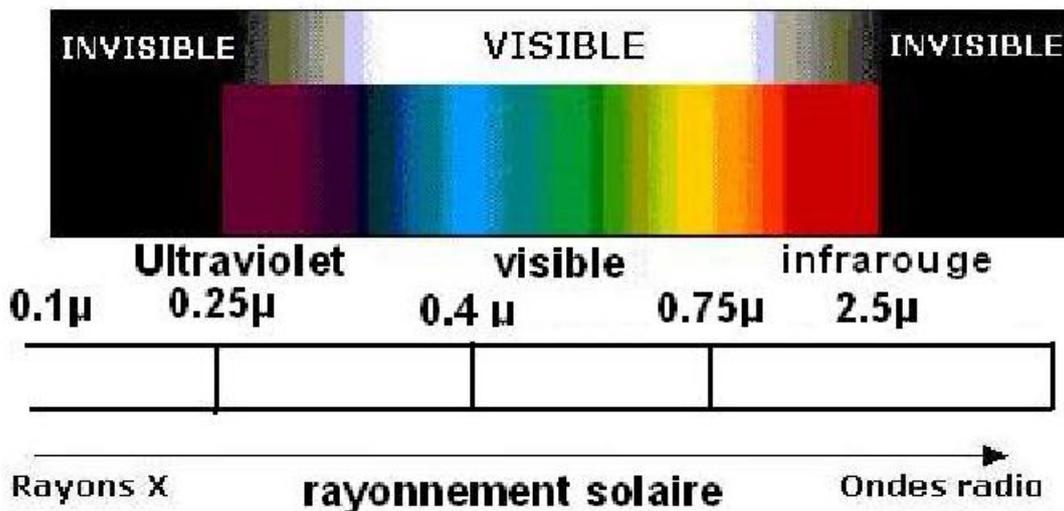
**I.6.1. Composante du rayonnement solaire :**

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d’environ 6000 °K. A une telle température, 40% de l’énergie est émise dans le domaine visible (gamme de longueur d’onde allant de 0,3  $\mu\text{m}$  (violet -bleu) à

0,7 $\mu$ m (rouge). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction.

Tout un éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune.

Chacune de ces couleurs est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde. William Herschell (Vers 1800) qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au-delà du rouge. Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis par le soleil. Les 10% restant du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultra violet). [15]



**Figure. I.8** : la longueur d'onde de rayonnement solaire. [16]

### I.6.2. Le rayonnement solaire au sol :

La variation de rayonnement solaire au sol en fonction de trois paramètres essentiels :

**a** : L'intensité de l'énergie solaire réellement disponible à la surface de la Terre est inférieure à la constante solaire en raison de l'absorption et de la dispersion de cette énergie, due à

l'interaction des photons avec l'atmosphère, les nuages ou encore les fumées produites par la pollution (CO<sub>2</sub>, le méthane CH<sub>4</sub> et le peroxyde d'azote N<sub>2</sub>O).

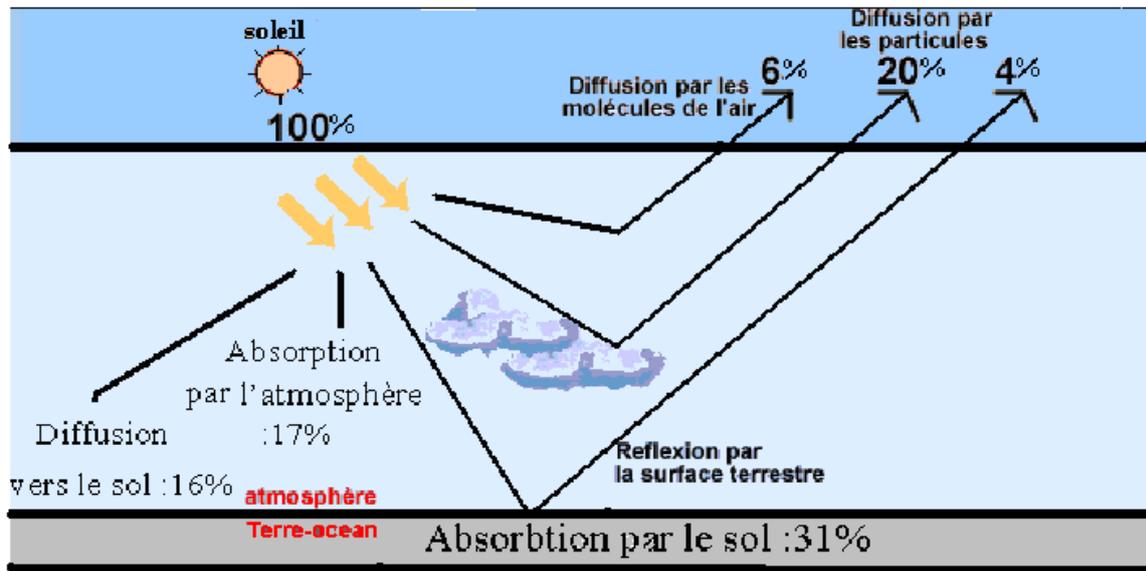


Figure. I.9 : Bilan du rayonnement solaire arrivé au sol. [17]

**b** : L'intensité de l'énergie solaire disponible varie en fonction de la situation géographique du site de captation. En Algérie, plus on est au Sud plus on profite d'une irradiation importante du soleil. Au Nord, moins l'irradiation solaire est importante, mais plus les besoins de chaleur sont importants : saison de chauffe plus longue, température extérieure plus basse, température de l'eau plus basse.

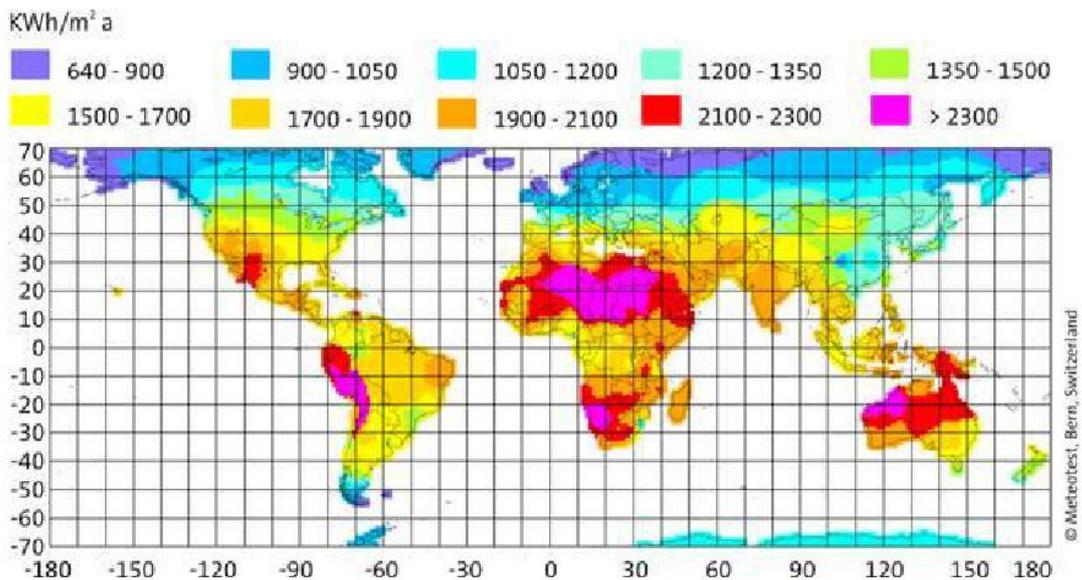


Figure. I.10 : Rayonnement solaire annuel dans le monde (KWh/m<sup>2</sup>.an) [18]

c : La puissance solaire disponible en tout point de la Terre dépend également du jour, de l'heure et de la latitude du point de réception. De plus, la quantité d'énergie solaire captée est fonction de l'orientation du récepteur, pour cela il faut faire une étude astronomique. [18]

### **I.6.3. Les instruments de mesure du rayonnement solaire :**

Parmi les instruments de mesure du rayonnement solaire on peut citer deux types qui sont couramment utilisés :

- La mesure du rayonnement solaire direct.
- La mesure du rayonnement solaire global et diffus.

#### **I.6.3.1. La mesure du rayonnement solaire direct :**

Au sol, la mesure du rayonnement solaire direct est faite à l'aide d'un pyrhéliomètre (Figure I.11.a), cet instrument est en permanence orienté vers le soleil et ne mesure que le rayonnement provenant du seul disque solaire. Le rayonnement capté est absorbé par une surface noire, la différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement direct. Pour mesurer la répartition spectrale du rayonnement solaire, on utilise un spectroradiomètre qui fournit la densité spectrale d'éclairement énergétique du rayonnement. [19]

#### **I.6.3.2. La mesure du rayonnement solaire global et diffus :**

La mesure du rayonnement solaire global est faite à l'aide d'un Pyranomètre (Figure I.11.b), cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie. Le domaine spectral couvert s'étend de 0.3 à 3  $\mu\text{m}$ . Le rayonnement reçu est converti en chaleur par la surface noircie. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global; elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série [19].



**Figure I.11** : Instruments de mesure du rayonnement solaire [6].

**(a)**: Pyréliomètre (mesure du rayonnement direct).

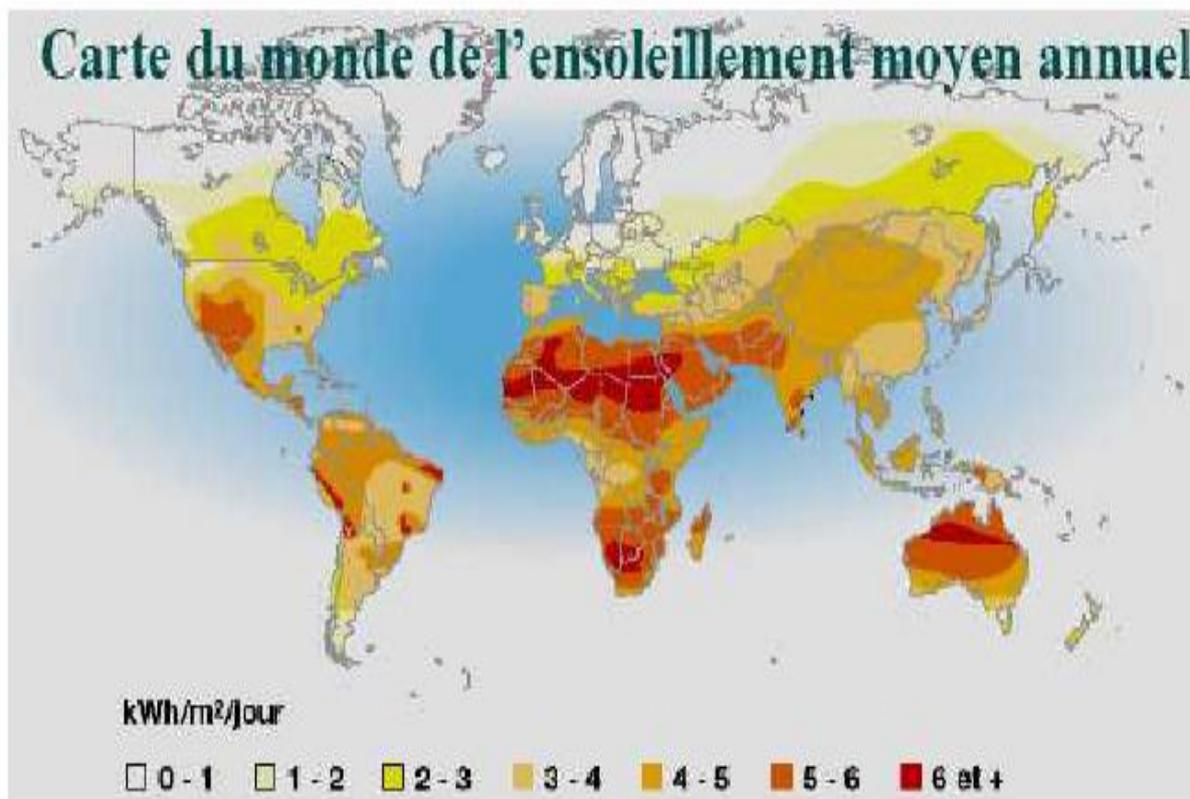
**(b)**: Pyranomètre (mesure du rayonnement global et diffus). (Photo de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – URAER, Ghardaïa)

La mesure du rayonnement solaire diffus est faite à l'aide du même instrument (Figure I.11.b), auquel on a adjoint un écran occultant le rayonnement solaire direct. Selon les cas, cet écran peut être, soit un disque ou une sphère dirigée en permanence vers le soleil, soit une bande pare-soleil parallèle au plan équatorial et déplacée en fonction de la déclinaison solaire. [19]

### **I.7. Le gisement solaire en Algérie :**

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. [12]

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.12 :



**Figure I.12 :** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel. [13]

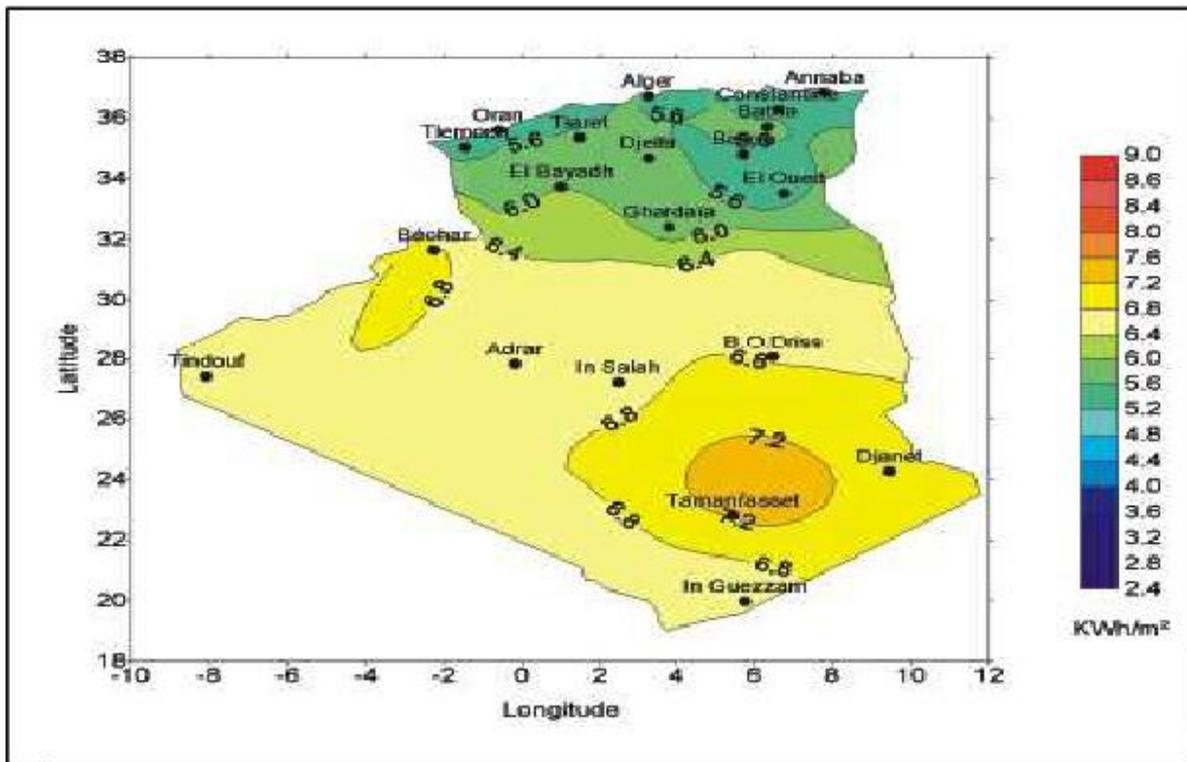
Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement. [13]

**Tableau I.1.** Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques. [13]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [13].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figure I.13).



**Figure I.13 :** Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [13]

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M (Office National de la Météorologie) réparties sur tout le territoire algérien (figure I.13). Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre. [12]

**I.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons rassemblée quelque généralité sur l'irradiation solaire et la trajectoire de soleil. Nous avons fait une petite approche sur les rayonnements solaire et les instruments de mesure du rayonnement, ainsi que le gisement solaire en Algérie.

*Chapitre II :*  
*Les capteurs*  
*solaires*

## II.1.Introduction :

Dans l'utilisation de l'énergie solaire, la faible densité de l'énergie et la fourniture instable de cette dernière est due aux variations des conditions atmosphériques. La plus grande part de recherche est consacrée au développement du chauffe-eau solaire du point de vue rendement thermique en général, mais rare sont les études sur les capteurs solaires utilisant l'air comme fluide caloporteur, car ce dernier a un coefficient de transfert de chaleur par conduction convection entre l'absorbeur et le fluide beaucoup plus faible que celui de l'eau. Le rendement d'un capteur solaire, conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique dépend de sa forme, de la technique choisie et de la façon dont on réduit les pertes de chaleur à la surface de celui-ci. Il existe une gamme étendue de capteurs solaires à air avec différentes disposition de l'absorbeur. Pour notre étude, nous avons choisi un capteur avec le passage d'air situé entre l'absorbeur et l'isolant. Les capteurs solaires à air sont importants dans les applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des locaux, cuire des aliments et le séchage. [3]

## II.2. Énergie solaire :

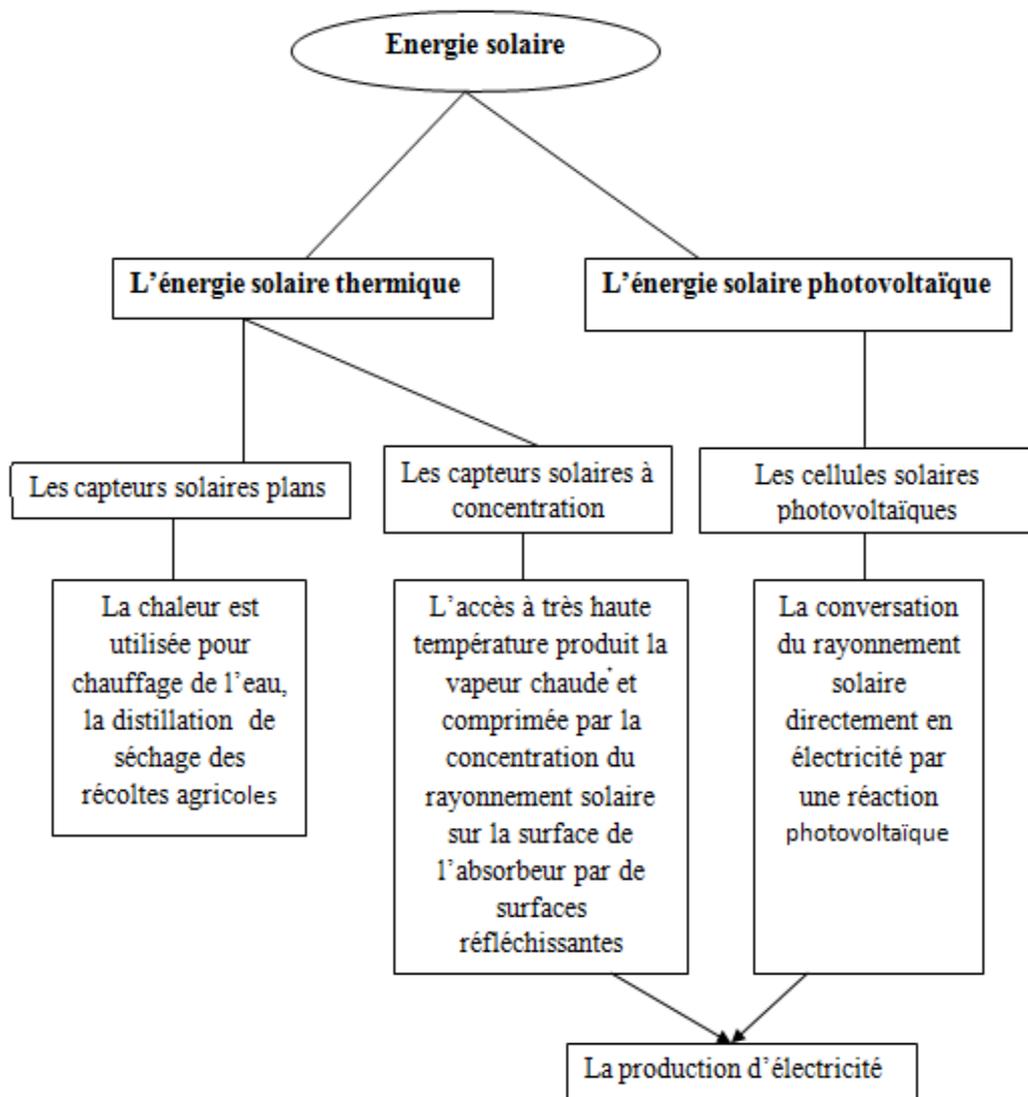
L'énergie solaire est l'énergie rayonnée par le soleil. Cette énergie est à l'origine de nombreux phénomènes Physiques tels que la photosynthèse, le vent ou le cycle De l'eau. Elle vient de la fusion nucléaire se produisant au cœur du Soleil. Elle circule dans l'espace sous forme d'un Rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est Composé de photons, petites particules d'énergies élémentaires. [1]

### II.2.1. L'utilisation de l'énergie solaire :

La première et plus répandue des utilisations de l'énergie solaire est sa transformation en énergie thermique. Nous effectuons cette transformation naturellement : il suffit de se mettre au soleil pour ressentir de la chaleur. Notre corps transforme l'énergie solaire en énergie thermique. Avec une architecture appropriée, un bâtiment est aussi capable de transformer cette énergie en énergie thermique. L'utilisation la plus connue actuellement est le chauffage « solaire » :

L'eau pour les robinets ou les radiateurs est chauffée par des panneaux solaires. Une autre utilisation de cette transformation est l'usage de fours solaires. Les petits fours solaires

«domestiques » peuvent chauffer facilement jusqu'à 150°C et les fours industriels ou pour la recherche peuvent atteindre jusqu'à 3000°C en quelques secondes. [1]



**Figure II.1 :** Schéma représente un plan de l'utilisation de l'énergie solaire. [11]

### II.2.2. Les différents types d'énergie solaire :

Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires tout d'abord nous allons les citer et ensuite les expliquer :

- L'énergie passive.
- L'énergie thermique.
- L'énergie photovoltaïque.
- L'énergie thermodynamique.

### II.2.2.1. l'énergie passive :

C'est une énergie non polluante et qui est disponible en grande quantité. Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, pour l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.

Son fonctionnement : l'énergie lumineuse du soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres et qui est absorbée par les murs mais aussi par les meubles, par les planchers, est rejetée sous forme de chaleur. [1]

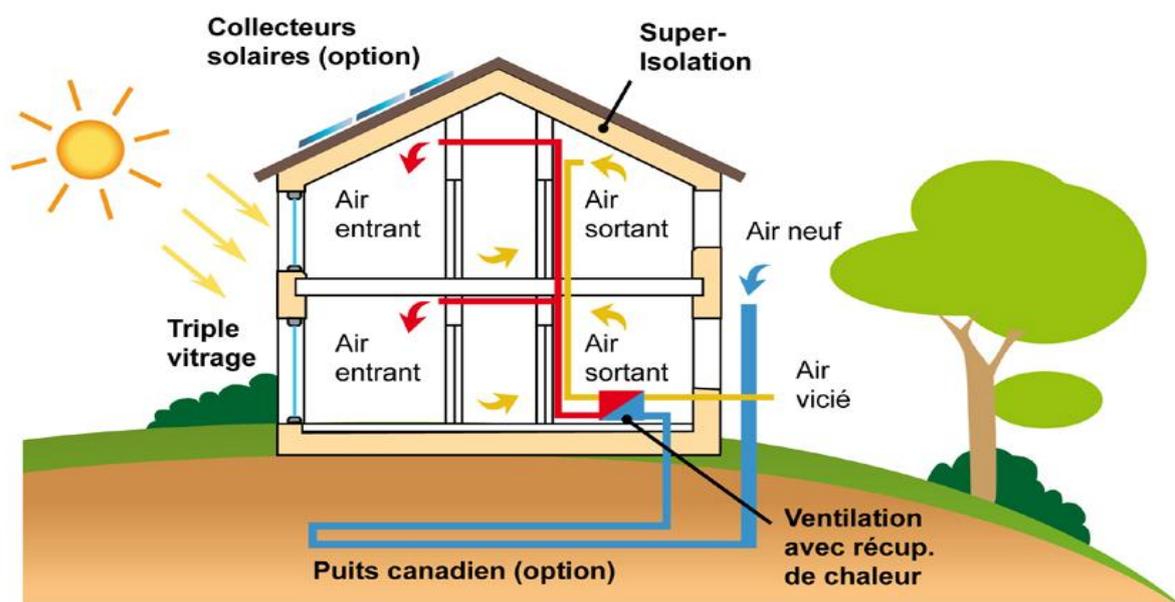


Figure II.2 : énergie solaire passive. [11]

### II.2.2.2. l'énergie solaire thermique :

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage ou pour obtenir de l'eau chaude.

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son

tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires. [1]

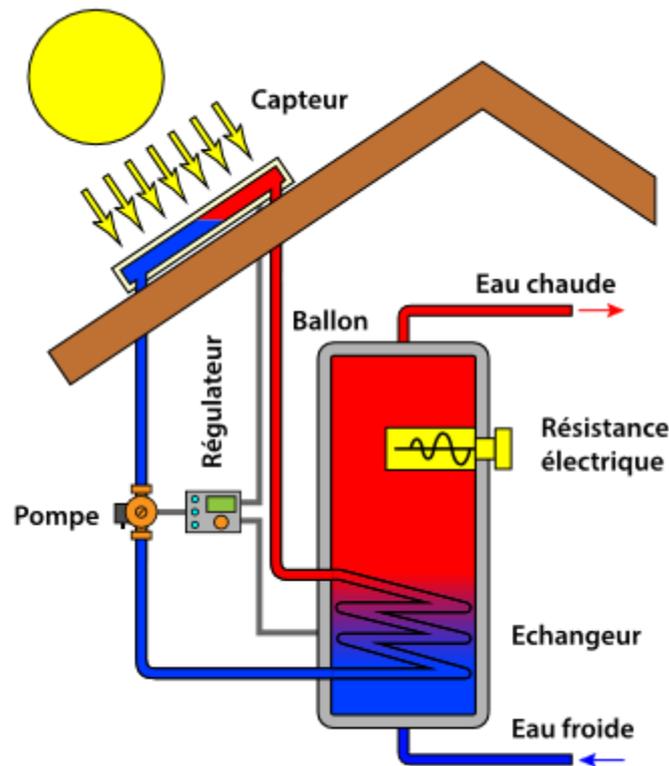


Figure II.3 : énergie solaire thermique. [11]

### II.2.2.3. l'énergie photovoltaïque :

Cet effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement négligeable mais on lui prédit un grand avenir, son coût baissera fortement dans les années à venir. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison, contrairement aux autres formes d'énergies solaires qui ne produisent que de la chaleur grâce aux capteurs du panneau qui transforme les rayonnements du soleil en cellule photovoltaïque.

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de deux fines plaques. Le courant qui en ressort est continu donc cette énergie produit de l'électricité. [1]

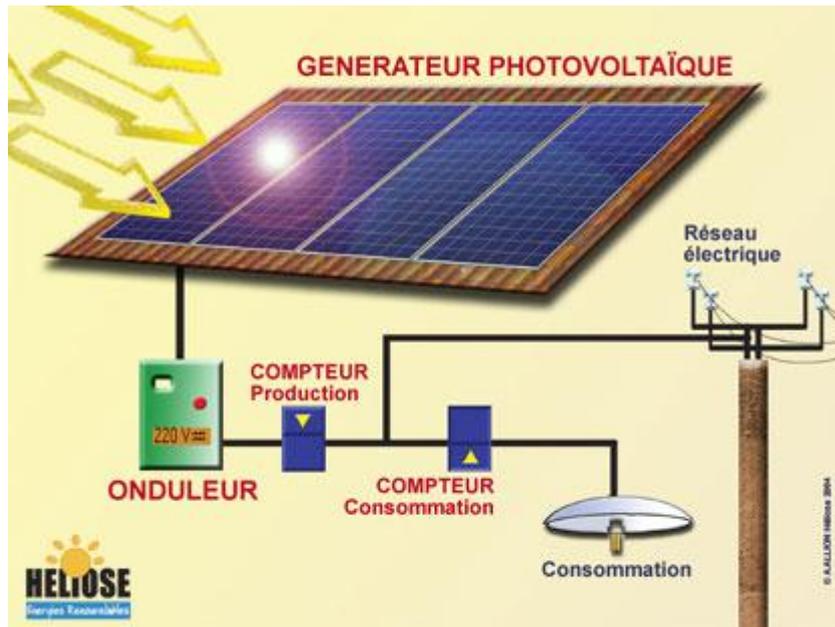


Figure II.4 : énergie solaire photovoltaïque. [11]

#### II.2.2.4. l'énergie thermodynamique :

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans les centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante. [1]

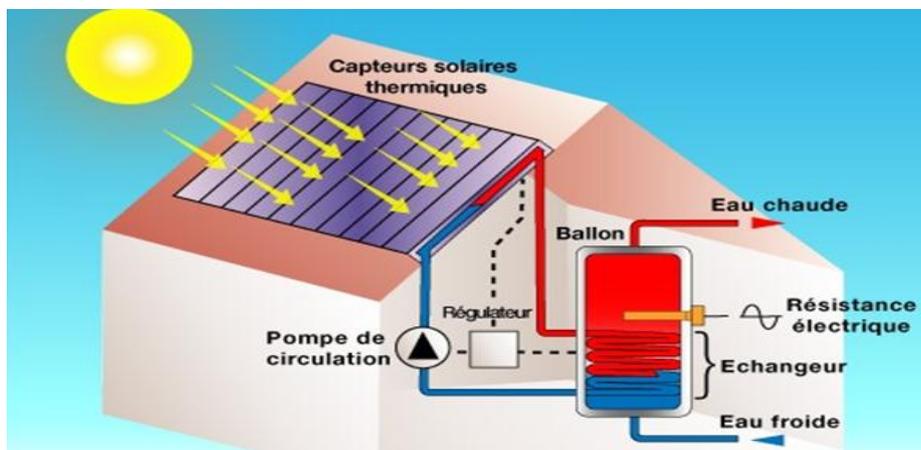


Figure II.5 : énergie solaire thermodynamique. [11]

### II.3. Avantages et inconvénients de l'énergie solaires :

L'énergie solaire possède plusieurs avantages et inconvénients :

#### II.3.1. Avantages :

- Les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les Régions.
- Les techniques et les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières.
- La main d'œuvre ne nécessite qu'une formation complémentaire aisément maîtrisable.
- Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de ses besoins.
- Les frais de maintenance sont réduits. Si l'entretien des installations ne doit pas être négligé, les frais de maintenance et donc de fonctionnement sont cependant relativement faibles. [1]

#### II.3.2. Inconvénients:

L'énergie solaire thermique active a toutefois certaines limites: Elle est variable dans le temps. Sous les climats tempérés, cette variation est surtout importante en fonction des saisons. Ceci entraîne une nécessité de stocker cette énergie, ce qui augmente considérablement le coût des installations.

C'est une énergie diffuse. La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée; ceci rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple). [1]

### II.4. Aspect économique :

Sur le long terme, les prix du charbon, du gaz naturel et du pétrole augmentent avec l'épuisement de la ressource. Le solaire apporte une source virtuellement inépuisable d'énergie et la commission européenne pour les énergies renouvelables prévoit que l'énergie solaire représentera une proportion de 20 % dans les énergies renouvelables, celles-ci devant apporter 20 % de l'énergie en 2020 et 50 % en 2040.

Les systèmes de production d'énergie solaire ont un coût proportionnel quasi-nul : il n'y a pas de combustible, seulement des frais (entretien, gardiennage, réparation...) qui dépendent très peu de la production. Il faut cependant tenir compte des coûts d'investissement, beaucoup plus élevés que pour les techniques fossiles ou les autres renouvelables (éolien, hydraulique...).

L'usage de capteurs thermiques permet de produire de l'eau chaude sanitaire à faible coût. Une fois l'installation réalisée, l'entretien est très peu coûteux et permet de faire des économies substantielles de combustible fossile ou d'électricité.

En revanche, pour la production d'électricité, le coût de l'installation est important (pour le solaire thermodynamique) ou très élevé (pour le photovoltaïque), et ces techniques ne sont pas encore avancées pour une généralisation. De nombreux pays ont donc mis en place des systèmes d'incitation financière (sous forme de détaxation, de subventions, ou de tarifs avantageux pour le rachat de l'énergie produite).

L'usage de systèmes de production d'énergie solaire se justifie aussi dans les situations où il est très coûteux de transporter des combustibles (fossiles) ou de procéder à un raccordement au réseau électrique, comme pour des appareils isolés, ou dans des zones isolées ou peu peuplées. [1]

### **II.5.L'effet sur l'environnement :**

L'énergie solaire, comme l'hydroélectricité, l'éolien, la géothermie et l'énergie marémotrice, est une énergie verte ou propre c'est-à-dire qu'elle produit une faible quantité de polluants.

Les centrales électriques solaires et les panneaux photovoltaïques permettent de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. L'impact environnemental se situe principalement au niveau de la fabrication, du transport, de l'installation et du recyclage de ces infrastructures. La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique en tant que telle n'émet pas de pollution.

L'utilisation du silicium dans la fabrication des panneaux photovoltaïques alourdit le bilan énergétique. En effet, les usines de silicium rejettent une grande quantité de CO<sub>2</sub> dans l'air. Les panneaux solaires sont aussi constitués en faible quantité de substances dangereuses

comme le plomb, le brome ou le cadmium. Néanmoins, des efforts sont faits pour remplacer ces matériaux par d'autres, plus écologiques.

Garantis 20 à 30 ans, les panneaux photovoltaïques sont recyclables à 85 %. Des entreprises privées et des organismes à but non lucratif facilitent le recyclage dans le but de diminuer l'enfouissement et la pollution des sols. D'après une étude effectuée en 2007 par l'Agence Internationale de l'Énergie, il faut de 1 à 5 ans pour qu'un système photovoltaïque produise autant d'énergie qu'il a été nécessaire pour sa fabrication.

Installés au sol, les panneaux solaires peuvent modifier le paysage et déranger la faune locale principalement par la pose de clôture sur des terrains de grande superficie. Une des réponses à ce problème est de construire des corridors pour faciliter le passage des animaux.

Aujourd'hui, l'énergie est essentielle pour répondre aux besoins des individus, des industries ou des transports. On cherche donc des solutions alternatives aux énergies fossiles polluantes et limitées. Ces impacts environnementaux sont minimes par rapport aux avantages à long terme et les avancées dans ce domaine en feront une énergie de plus en plus propre aux fils des années. [1]

## II.6. Les capteurs solaires:

Le capteur solaire fait le lien entre le rayonnement solaire incident et le consommateur de chaleur. Il a pour tâche de convertir le plus efficacement possible la lumière solaire en chaleur.

L'absorbeur, de couleur foncée, est le cœur du capteur ; il s'échauffe sous l'action du rayonnement solaire. Il comprend un ensemble de tubes qui permettent de transporter, par le biais d'un caloporteur, la chaleur produite. Toutefois, ce n'est pas toute cette chaleur qui suit ce cheminement, car il y a diverses pertes par convection, conduction et rayonnement thermique. Le capteur doit être pourvu d'une isolation thermique afin de réduire ces pertes. En général, de la laine minérale est appliquée derrière le capteur et sur ses côtés, tandis qu'un vitrage de couverture est appliqué sur l'avant. Lorsqu'il s'agit de capteurs tubulaires, c'est le vide qui enveloppe les tubes qui forme une isolation thermique (très efficace).

Le capteur plan avec couverture est le type de capteur le plus utilisé. Il existe aussi des capteurs plans qui concentrent le rayonnement solaire à l'aide de plusieurs réflecteurs cylindro-paraboliques et le projettent sur un absorbeur cylindrique. [18]

### **II.6.1. Principe de captation du rayonnement solaire :**

Le capteur plan est considéré comme un simple absorbeur de rayonnement solaire direct et diffus qui le transforme en chaleur. Le rayonnement solaire est non seulement absorbé par le ciel, mais aussi par tout l'environnement.

Un capteur plan est relativement sensible aux conditions du ciel, dont la réalisation ne demande pas une conception compliquée. Cependant, la conception d'un collecteur avec effet de concentration, fait appel à des techniques plus ou moins complexes, dont le principe consiste à rassembler le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite que la surface d'ouverture du collecteur, afin d'augmenter la concentration du rayonnement direct aux niveaux de l'absorbeur.

Les capteurs plans utilisent le rayonnement diffus provenant du ciel et du sol, par contre les concentrateurs n'utilisent que le rayonnement direct. [18]

### **II.6.2. Les Types des capteurs solaires :**

Il existe plusieurs types de capteurs solaires, on peut les citer comme suit :

#### **II.6.2.1. Les panneaux solaires photovoltaïques :**

Le premier type des capteurs solaires sont les panneaux solaires photovoltaïques. Le mot photovoltaïque est composé du terme photo, qui signifie lumière et de voltaïque dont l'origine est le nom de l'inventeur de la pile électrique Volta. Autre explication est le synonyme de photopile. Une photopile est constituée généralement de deux couches positive et négative. Leur contact permet une pénétration des électrons d'une couche à l'autre et dès qu'un rayon de soleil arrive sur le panneau, un apport d'énergie se crée. [20]

Le courant produit à la sortie d'une cellule photovoltaïque est de type continu. Dans le cas d'une installation domestique, un onduleur doit donc transformer celui-ci en courant alternatif.



**Figure II.6 :** Panneaux solaire photovoltaïque. [20]

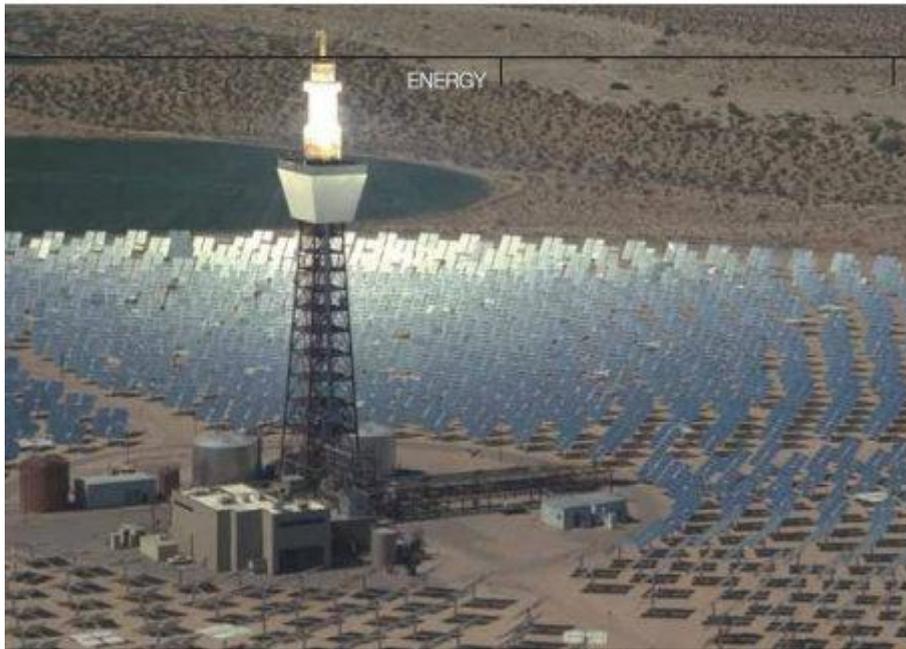
### **II.6.2.2. Les Capteurs à concentration :**

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes (miroir, aluminium, inox...) paraboliques ou cylindro-paraboliques pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée pour plus d'efficacité. [16]

#### **II.6.2.2.1. Tour solaire :**

Ce type de capteur est constitué de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. L'avantage de la tour solaire par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée.

Les miroirs uniformément répartie sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un receveur au sommet de la tour solaire. Températures importantes, de 800 °C à 1000°C. [16]



**Figure II.7 :** Centrale à tour solaire. [16]

#### **II.6.2.2.2. Capteurs paraboliques :**

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome (libre). Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante.

De toutes les technologies solaires, les capteurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité (29.4%).

Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Ils possèdent donc également un important potentiel de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certains pays du sud. [16]



**Figure II.8 :** Les centrales à capteur parabolique. [16]

### **II.6.2.2.3. Capteur cylindro-parabolique :**

Le système convertit l'énergie solaire en énergie thermique. Le miroir concentrateur est un cylindre de section parabolique. Il ne comporte qu'une seule direction de courbure ; sa fabrication et mise en forme sont donc considérablement simplifiées. Installé le long de l'axe Nord-Sud, le miroir est animé d'un seul mouvement de rotation qui le fait basculer d'Est en Ouest de façon à être éclairé par le rayonnement solaire selon l'axe optique de la parabole. La concentration est obtenue sur une ligne, matérialisée par le récepteur tubulaire dans lequel circule le fluide caloporteur, on ajoute à ce concentrateur un système de guidage pour optimiser la captation des rayons solaire, généralement on utilise des petites moteurs accompagnés d'un ensemble d'engrenages qui font office de réducteurs ou on utilise régulièrement des vérins pour leur simplicité de fonctionnement et leur maniabilité. [21]

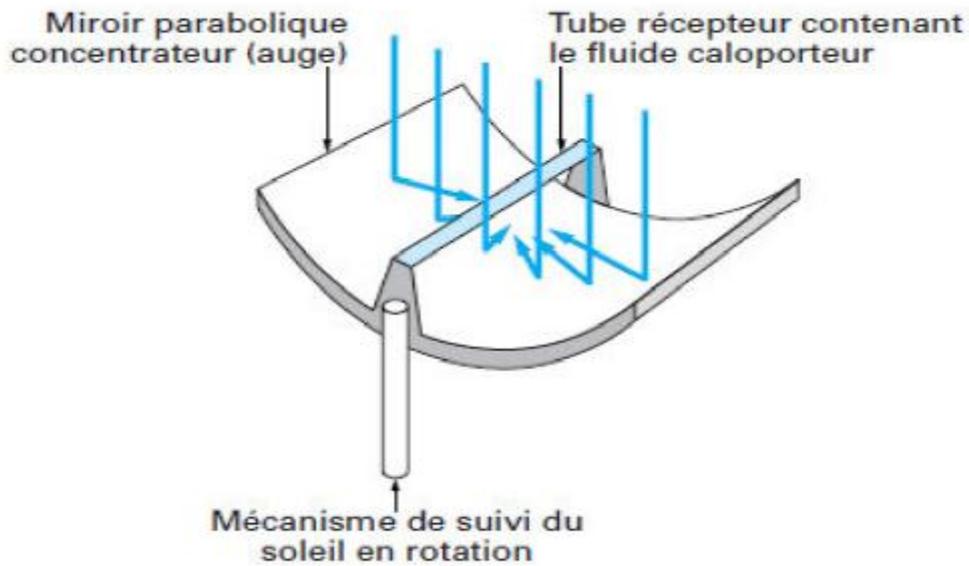


Figure II.9 : Concentrateur cylindro-parabolique. [20]

### II.6.2.3. Les capteurs solaires à tubes sous-vide :



Figure II.10 : capteur solaire à tubes sous-vide. [20]

Ce sont des dispositifs de tube de verre sous-vide, à l'intérieure desquels se trouve l'absorbeur, qui est connecté au circuit à l'intérieure duquel circule le fluide caloporteur. La

mise sous-vide a pour fonction d'éviter les pertes thermiques, afin d'obtenir de bonnes performances sans avoir à utiliser un coffre de protection ou une isolation thermique. On distingue plusieurs types de capteurs sous vide :

#### **II.6.2.3.1.Circulation directe :**

Le fluide caloporteur passe successivement dans chaque tube pour y être chauffé. Le principe est simple, mais la fabrication est difficile à cause des liaisons verre/métal nécessaires pour la circulation du fluide caloporteur. [16] [17]

#### **II.6.2.3.2.Capteur à caloduc :**

Le liquide à l'intérieur du tube est vaporisé et se condense dans un condenseur et relâche ainsi l'énergie de condensation à un fluide caloporteur circulant au sommet des tubes. Cette conception permet le remplacement facile d'un tube, car le circuit du tube et le circuit du champ de capteurs n'est pas connecté.

La conception des capteurs sous vide les rend plus efficaces pour capter le rayonnement diffus du soleil, et leur rendement diminue peu lorsque la température du fluide augmente. Et cela grâce à la très bonne isolation thermique obtenue par le vide poussé. Des réflecteurs peuvent être installés sous les tubes afin de réfléchir le rayonnement lumineux sur les faces intérieures. [16] [17]

#### **II.6.2.4. Capteur plan :**

Le capteur plan est la pièce d'une installation de chauffage de l'eau sanitaire ou de chauffage des locaux. Il est chargé de transformer le rayonnement solaire en chaleur. De forme simple, la technologie plane et la plus utilisée. En fonction de leurs utilisations, on retrouve deux types de capteurs plans :

- Avec vitrage.
- Son vitrage.

##### **II.6.2.4.1. Les capteurs plans vitrés :**

Le capteur plan vitré est généralement utilisé dans les installations de chauffage de l'eau sanitaire ou des locaux. La température de fonctionnement est généralement comprise entre 30°C et 60°C. Il est constitué d'une caisse isolée couverte par un vitrage. A l'intérieure, on

retrouve l'absorbeur dans lequel circule le fluide caloporteur. Le vitrage bloque le rayonnement infrarouge et isole la lame d'air au-dessus de l'absorbeur pour garde la chaleur. [22]



**Figure II.11 :** Capture plan vitrés. [22]

#### **II.6.2.4.2. Les capteurs plans non vitrés :**

Le capteur plan non vitré est beaucoup plus économique mais moins répandu. Très dépendant de la température extérieure, il est généralement utilisé dans les installations de chauffage de piscine mais peut parfois faire office de système de chauffage de l'eau sanitaire dans les pays chaud. Dans les zones tempérées, la température de fonctionnement est généralement inférieure à 30°C. Il est seulement constitué d'un absorbeur dans le quelle circule le fluide caloporteur. [22]



**Figure II.12 :** Capture plan non vitré. [22]

### II.7. Fonctionnement d'un capteur solaire plan:

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple (figure II.13) Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise au consommateur.

Le vitrage est transparent pour le rayonnement visible, la couverture transparente crée un effet de serre.

L'isolation thermique en dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermiques et augmente ainsi son rendement. [22]

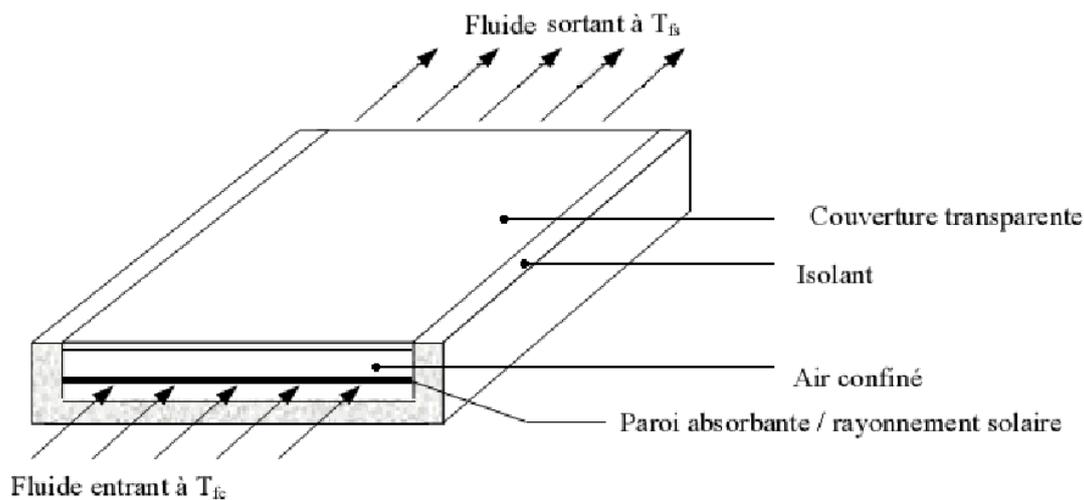


Figure II.13 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan. [22]

### II.8. Les avantages et les inconvénients des différents capteurs solaires:

Les capteurs solaires possède des avantages est des inconvénients.

#### II.8.1 Avantages :

La conversion photovoltaïque se fait sans force motrice donc nous constatons une usure minimale. Elle ne produit ni bruits, ni polluants, ni bioxyde de carbone, ni odeurs. Cette méthode peut être considérée comme une des plus favorables à l'environnement. [20]

La lumière de soleil étant disponible partout, elle est exploitable quelle que soit la région.

L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie de besoin en eau chaude sanitaire et en chauffage. [20]

### **II.8.2. Inconvénients :**

Le prix de fabrication est toujours assez important dû à la haute technologie utilisée. La durée de vie des panneaux photovoltaïques est de 20 à 25 ans car ensuite le silicium cristallise et rend les cellules inutilisables. Mais selon certaines études la fabrication n'est jamais rentabilisée pendant les 20 premières années.

Ensuite le recyclage des cellules en « fin de vie » est un point non résolu. De plus la performance des cellules est basse car le rendement de la conversion de l'énergie solaire ne représente que 15% à 18% (ratio entre l'énergie lumineuse reçue et l'énergie électrique produite). Cela veut dire que nous sommes seulement capables d'utiliser 15% d'énergie reçue sous forme de rayons de soleil, en comparaison le rendement d'une centrale nucléaire est de 30%. Puis pendant les périodes creuses en hiver, l'énergie solaire a besoin d'une source supplémentaire pour distribuer l'énergie.

La performance des panneaux photovoltaïques est assez basse par rapport aux autres sources d'énergie mais en cas des installations intégrées au toit des maisons suffisantes car l'électricité est d'une partie produite par des panneaux photovoltaïques et le reste des besoins énergétiques est satisfait par le réseau national. Mais dans des régions bien ensoleillées, les panneaux photovoltaïques en combinaison avec les panneaux solaires thermiques sont capables d'autoalimenter la maison en énergie (l'électricité, l'eau chaude, le chauffage). De plus la technologie avance toujours et les scientifiques augmentent petit à petit la performance des cellules photovoltaïques. Une fois fabriqués, les panneaux solaires sont faciles à installer et maintenir, ils peuvent donc très bien alimenter en électricité des endroits isolés et mal accessibles. [20]

### **II.9. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude sur l'utilisation de l'énergie solaire, nous avons montrés que l'utilisation de l'énergie solaire est divisée en plusieurs sujets, y compris leur

utilisation dans le domaine de la production d'énergie thermique et le chauffage de l'eau et les chauffages des bâtiments ainsi que leur utilisation dans la production d'électricités. Dans la deuxième partie, nous avons étudié l'élément le plus important de l'exploitation de l'énergie solaire qui est le capteur solaire ou on a résumé quelques types de capteurs solaires.

Le choix entre les types de capteurs solaires est déterminé par le type d'application recherchée, la fiabilité, le prix et les températures souhaitées.

Dans le prochain chapitre nous allons parler des différents types des fours solaires et leur fonctionnement et les facteurs qui contrôlent le bon fonctionnement de ces fours.

*Chapitre III :*  
*Les fours*  
*solaires*

### III.1. Introduction :

Dans le monde, les sources d'énergie habituellement utilisées pour la cuisson sont le charbon, le gaz naturel, l'électricité et le bois. Des énergies dont l'utilisation est plus ou moins néfaste pour l'environnement. Le charbon et le gaz naturel tout d'abord parce que ce sont des combustibles fossiles, ils dégagent des gaz contribuant à l'augmentation de l'effet de serre. Quant au bois, c'est une énergie renouvelable et écologique, à condition seulement que son utilisation ne contribue pas à la déforestation de certaines régions. L'électricité ensuite, car même s'il est possible de produire de l'électricité de manière écologique, il faut ensuite la convertir en chaleur dans un four, ce qui n'est pas très efficace sur le plan énergétique. [23]

Le four solaire est à ce jour la solution la plus écologique. C'est un appareil basé sur la conversion en chaleur des rayonnements lumineux émis par le soleil.

### III.2. Historique des fours solaires :

Les débuts de la cuisson solaire remontent à plus de 200ans. A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, De Saussure, voulant créer une machine mesurant l'intensité du rayonnement solaire, construit de fait le premier cuiseur solaire dont nous avons la trace. L'engouement pour la technique est immédiat.

De nombreux chercheurs mettent au point des modèles variés pour faire cuire des œufs, viandes, légumes et même du pain. Auguste Mouchot, auteur du premier traité consacré à l'énergie solaire " La chaleur solaire" (1869), améliore le cuiseur de Saussure et, en 1875, il est même envoyé en Algérie expérimenter et diffuser son invention parmi les officiers français. Mais l'idée, jugée non -rentable en ces temps d'énergie fossile abondante, passe à la trappe.

Ce n'est qu'au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle que l'idée de la cuisson solaire refait surface. Elle connaît en effet une nouvelle impulsion marquée par la reprise simultanée des recherches dans plusieurs pays (Chine, Inde, USA, Allemagne...). La crise énergétique de 1973 réveille définitivement les inventeurs. Aux Etats- Unis, Barbara Kerr et Sherry Cole commencent des expérimentations sur le four solaire. Elles fondent en 1986 la "Solar Cookers International", organisation à but non lucratif qui vise à diffuser et perfectionner les techniques de cuisson solaire.

Au début des années 2000, la coopération entre les différents acteurs a permis un début de standardisation des modèles et de rationalisation des techniques, ainsi qu'une diffusion et une production plus large, qui restent néanmoins le fait d'initiative modeste et locale. [24]

### **III.3. Principe de fonctionnement de four solaire :**

La plupart des fours solaires fonctionnent de la manière suivante :

le rayonnement solaire est converti en chaleur. Cette chaleur est conservée pour cuire les aliments dans la durée. Dans certains cas, les apports solaires sont multipliés par l'ajout de miroirs.

L'énergie utilisée par les fours solaires est une énergie renouvelable qui provient du Soleil. Ce rayonnement solaire est un ensemble d'ondes électromagnétiques constituées de photons.

Le rayonnement solaire est ensuite converti en chaleur par un absorbeur, dont sa surface est généralement sombre. Dans la plupart des fours solaires, cette fonction est assurée par le récipient contenant les aliments.

Dans un souci d'efficacité, la chaleur doit être conservée au maximum. Les fours solaires de type "boîte" utilise un vitrage pour garder la chaleur à l'intérieur de la boîte par effet de serre. Au niveau des autres parois, l'ajout d'une isolation classique améliore la conservation de la chaleur.

Enfin, les rayons solaires peuvent être déviés par des miroirs et permettre l'apport d'énergie supplémentaire vers le foyer du four solaire. [24]

### **III.4. Les modèles de fours solaires :**

Les technologies utilisées dans la conception des fours solaires tournent autour de trois modèles de bases : les fours solaires de type "boîte", les fours paraboliques et les fours à panneaux. Elles répondent aux besoins de respecter les principes de bases que sont : la conversion du rayonnement en énergie thermique, la rétention de la chaleur et l'apport d'énergie supplémentaire. [23]

#### **III.4.1. Le four à panneaux :**

Dans ce dispositif, les panneaux sont constitués de morceaux de carton recouvert d'un papier réflecteur comme de l'aluminium. Les différents panneaux concentrent

grossièrement les rayons du soleil sur un pot qui se trouve sous un bol en verre généralement ou en plastique pour créer de l'effet de serre. Ils permettent de nettoyer de l'eau en la chauffant au delà de 65 degrés Celsius. [23]



**Figure III.1:** Le four à panneaux. [23]

#### **III.4.2. Le four parabolique :**

La géométrie parabolique de ce dispositif permet de concentrer l'ensemble des rayons lumineux qui tombe sur la surface de la parabole en un point où l'on place le plat de cuisson. La puissance de ce dispositif dépend bien sûr de la taille de la parabole; avec une parabole de 1.4 mètre de diamètre, on peut faire bouillir plusieurs litres d'eau en 30 minutes; les plus grandes paraboles permettent d'atteindre des températures de l'ordre de 800°C. Il est plus dangereux à utiliser car on atteint des températures élevées. Des dispositifs dont le foyer se situe en dehors de la parabole sont dangereux car la puissance disponible à ce foyer atteint rapidement quelques centaines de watts : cela peut par exemple provoquer des graves lésions dans l'œil ou se trouver à l'origine d'un incendie. [23]



**Figure III.2:** Le four parabolique. [23]

### III.4.3. Le four boîte :

Le four solaire de type "boîte" est le type de four solaire le plus répandu par rapport au four parabolique. Il est constitué d'une boîte dont l'intérieur est tapissé de réflecteurs et d'une couverture transparente sur le dessus. Le rayonnement pénètre à l'intérieur de la boîte et est réfléchi sur un récipient dont la surface absorbe les rayons. La couverture transparente permet d'isoler l'intérieur du four de l'extérieur et de garder le maximum de chaleur; C'est le principe de l'effet de serre. Parfois, la couverture est composée d'un ou plusieurs réflecteurs positionnés de manière à apporter davantage de rayonnements solaires.

La puissance est globalement plus faible comparée aux fours solaires paraboliques, ce qui nécessite des temps de cuissons plus longs. La température maximale de four varie selon les modèles mais tourne autour des 150°C. Malgré ces performances plus faibles, les fours solaires de type "boîtes" ont l'avantage d'être plus faciles à fabriquer, peu encombrants et simple à utiliser. [23]



**Figure III.3:** Le four boîte. [23]

Nous allons étudier un four solaire de type boîte et arriver par la suite à le réaliser.

### **III.5. Les composants du four solaire boîte :**

#### **III.5.1. Absorbeur :**

Le récepteur solaire converti le rayonnement solaire concentré en chaleur utilisable. Le récepteur est le composant le plus chaud du système de four solaire. L'efficacité du récepteur solaire traduit son aptitude à transférer le maximum de puissance radiative incidente à la plaque chauffante à la température de travail en supportant des pertes thermiques minimales. L'élément actif du récepteur est la plaque chauffante. [25]

#### **III.5.2. le réflecteur :**

Le réflecteur doit être maintenu en position verticale au-dessus de la boîte. Le support du réflecteur va permettre de faire varier l'angle entre le réflecteur et la boîte. Plusieurs positions seront ainsi possibles pour permettre une bonne réflexion des rayons du soleil. [27].

**III.5.3. Angles d'inclinaison du réflecteur : [25]**

Afin de collecter un maximum d'énergie, un cuiseur doit être muni des réflecteurs additionnels. Les angles d'inclinaison de ces réflecteurs doivent être optimaux au maximum.

$$\theta = \varphi \pm \delta \dots \dots \dots (III.1)$$

L'angle d'inclinaison  $\alpha$  du réflecteur est calculé à partir de :

$$\alpha_h = \frac{1}{3} (2\theta - \frac{\pi}{2}) \dots \dots \dots (III.2)$$

Dans notre cas où la surface réceptrice est inclinée d'un angle  $\beta$  avec l'horizontal (le calcul de l'angle  $\alpha$  est donné par :

$$\alpha_l = \frac{1}{3} (2\theta + \beta - \frac{\pi}{2}) \dots \dots \dots (III.3)$$

**III.5.4. le vitrage :**

Une vitre simple (ou dite blanche) est moins onéreuse et donne de bons résultats. L'épaisseur pourra varier de 3 à 5 mm (4 mm étant la plus courante). La double vitre n'est pas nécessaire; elle peut présenter quelques avantages mais aussi de nombreux inconvénients. Pour s'en expliquer, il faut d'abord dire que toute vitre a un effet transparent et un effet miroir. Un double vitrage diminue la transparence augmente l'effet miroir, mais augmente aussi l'effet de serre. Si, en plus, la lumière arrive sur un double vitrage, avec une inclinaison importante, les rejets de lumière seront conséquents, et c'est ce qui se passe lorsque l'on met le four au soleil en début de journée.

Comparativement à un four à simple vitrage atteignant les 100° en un quart d'heure, un four à double vitrage monte en température deux fois moins vite. Certes, il chauffera alors un peu plus mais cela représente un intérêt tout relatif, le simple vitrage permettant une cuisson suffisante. Par ailleurs, il est fortement conseillé de mettre un couvert vitré sur la marmite. En effet, c'est cette deuxième vitre qui va permettre un deuxième effet de serre dans la casserole dont la température sera augmentée alors de 20 à 50° par rapport au four. [27].

### III.5.5. Isolation :

L'isolation joue un rôle très important dans les applications thermiques de l'énergie solaire, pour limiter les pertes par conduction et convection vers le milieu environnant, au niveau des côtés et en bas du capteur. L'isolant doit être opaque aux rayonnements de grandes longueurs d'onde, dans le domaine de l'infrarouge émis par la plaque rayonnante (absorbeur). [28].

Un bon isolant doit avoir les qualités suivantes :

- Une faible conductivité thermique
- Une faible densité (pour une faible inertie thermique)
- La chaleur massique doit être basse

### III.6.Emplacement du four solaire :

Le four ou le cuiseur solaire doit être placé à l'extérieur, dans un endroit ensoleillé, exposé au vent, mais protégé des vents violents, des nuages, des brumes, de la poussière et de l'ombre éventuelle des arbres ou des bâtiments proches qui réduit le rayonnement et augmente le temps de cuisson.

Le lieu choisi doit être éloigné des sites de dépôt de déchets humains, de déchets d'animaux et des eaux usées. Il est préférable de clôturer le site pour éviter la présence d'animaux domestiques. [26]

### III.7. Comment optimiser la température dans un four solaire :

Si votre four est mal positionné, la chaleur qu'il récupérera ne lui permettra pas de produire une cuisson correcte. La meilleure façon de vérifier si le four solaire est bien positionné est de surveiller l'ombre qu'il marque au sol.

Le mieux est de placer la fenêtre de votre four toujours le plus directement face au soleil. Cela demande un peu d'expérience au début de positionner correctement son four. Il ne faut pas se fier à la lumière déglagée par les réflecteurs. Le meilleur moyen est de surveiller l'ombre derrière le four. Elle doit être complètement égale à droite et à gauche. [29]

### III.8. L'angle d'orientation du four par rapport au soleil :

Un four solaire devra être ajusté vers le haut ou vers le bas selon la période de l'année. C'est parce que l'angle du soleil avec la Terre change d'environ 30 degrés entre le solstice d'hiver et le solstice d'été. La plupart des fours sont conçus pour être utilisés en été et doivent être surélevés à l'arrière pour être fonctionnels en hiver. À chaque fois, il faut se fier à l'ombre qui doit être symétrique et la plus petite possible. [30]

### III.9. Les températures et temps de cuisson :

La cuisine solaire est un moyen écologique et économique de préparer les aliments. Le fonctionnement des cuiseurs solaires dépend uniquement de l'ensoleillement et non de la température extérieure. Par conséquent, ils s'utilisent aussi bien en été qu'en hiver et ce dans toutes les régions ensoleillées du globe. Un minimum de 40 minutes d'ensoleillement suffit pour un bon fonctionnement. [31]

La température atteinte par les cuiseurs solaires simples (de type boîte et les cuiseurs à panneaux réfléchissants) est généralement comprise entre 100 et 200 °C et dépend tout d'abord du nombre et de la taille des panneaux utilisés. La température atteinte par d'autres types de cuiseurs (les cuiseurs paraboliques) varie entre 150 et 250 °C en fonction du diamètre du réflecteur. [32]

Cependant, des températures comprises entre 80 et 90°C suffisent pour cuire les nourritures et gardent leur goût, humidité et éléments nutritifs (Figure III.4). [31]

Les temps de cuisson sont très variables, ils varient considérablement en fonction de divers facteurs notamment la période de l'année, le moment de la journée, le degré d'ensoleillement, la force du vent, le type de récipient utilisé et la quantité de nourriture préparée. Les surfaces foncées absorbent mieux la lumière du soleil que les surfaces claires. C'est pourquoi les aliments cuisent mieux dans des récipients en métal foncé, peu profonds, fermés par des couvercles adaptés afin de maintenir la chaleur et l'humidité. [30]

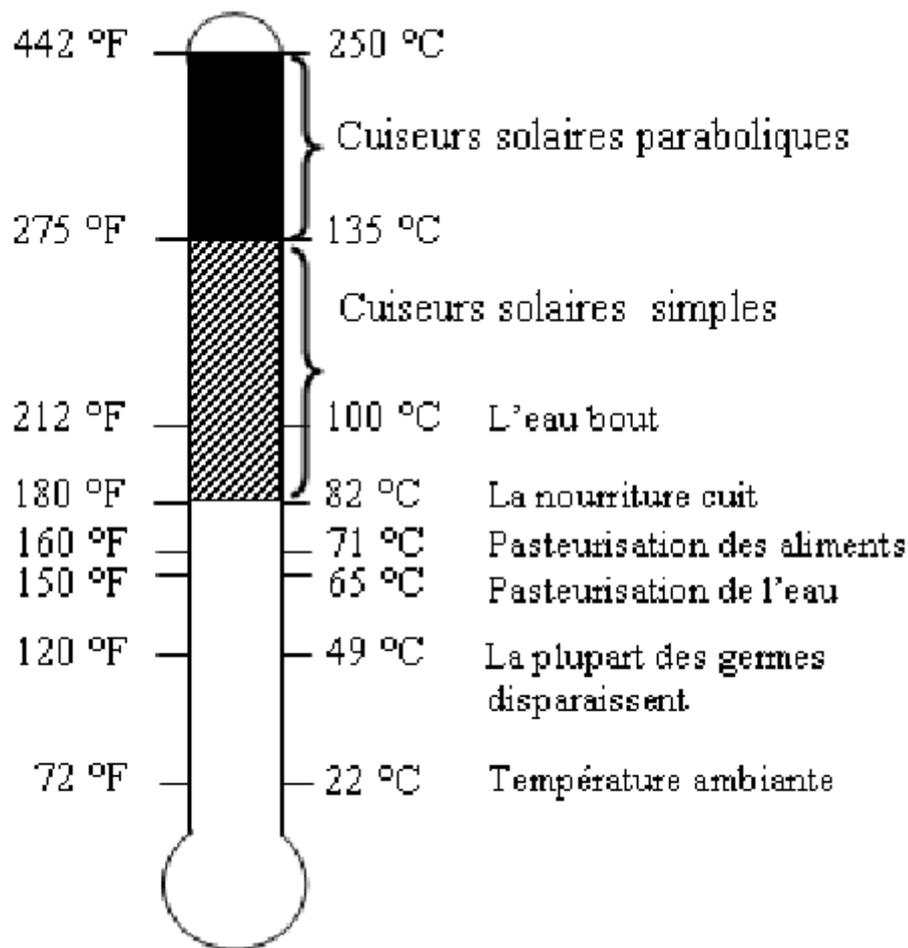


Figure III.4: Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs. [30]

### III.10. Comment limiter les pertes de chaleur:

Pour limiter les pertes de chaleur on peut agir sur plusieurs facteurs :

- La conduction.
- La convection.
- Le rayonnement.

#### III.10.1. La conduction :

C'est la propriété d'un matériau à conduire la chaleur. On peut limiter ce phénomène en choisissant un matériau isolant qui va retenir plus longtemps la chaleur à l'intérieur du four.

Nous utilisons de la laine de mouton, c'est un bon isolant, léger et qui résiste à la température du four.

Le choix du double vitrage permet aussi de limiter les pertes par conduction. En effet, la lame d'air immobile entre les deux vitres (le verre est très conducteur) joue le rôle d'un isolant. L'épaisseur de la lame d'air ne doit pas faire plus de 3 cm pour qu'elle reste immobile. Au delà de 3 cm, on risque d'avoir un phénomène de convection naturelle interne au double vitrage. [24]

### **III.10. 2. La convection :**

C'est un mode de transfert thermique qui implique un mouvement de la matière à l'intérieur d'un milieu. La fermeture hermétique du four (utilisation de joints) permet de limiter les pertes par convection avec le milieu extérieur. Il subsistera la convection naturelle à l'intérieur du four dû à la différence de température entre les parois en aluminium du four et le double vitrage. Le vent créera une convection forcée qui refroidira le four. [24]

### **III.10.3.Le rayonnement :**

C'est un transfert de chaleur sous forme d'onde électromagnétique. Tout corps émet un rayonnement qui est fonction de sa température. Les aliments à l'intérieur du four émettent un rayonnement infrarouge qu'il va falloir conserver. C'est le rôle du double vitrage, qui crée un effet de serre : les vitres sont transparentes au rayonnement du soleil, par contre elles retiennent 50 % du rayonnement infrarouge produit par l'échauffement des aliments.

L'absorption du rayonnement par un corps dépend de sa couleur. Celui-ci est maximal pour un « corps noir ». Le récipient qui contient les aliments sera donc choisi de couleur foncé pour se rapprocher d'un « corps noir ». [24]

## **III.11.Avantages et inconvénients des fours solaires :**

### **III.11.1. Avantages :**

- On ne risque pas de faire brûler les aliments.
- On utilise une énergie renouvelable, gratuite est non polluante.
- Le four est transportable.
- Il n'y a aucun élément contaminant (gaz de combustion...). [24]

**III.11.2. Inconvénients : [17].**

- Lorsqu'on ouvre le four pour surveiller la cuisson, on perd une grande partie de la chaleur.
- Relativement long à cuire.
- Dépendant du bon vouloir du soleil.
- Ils sont compliqués à construire. [24]

**III.12.CONCLUSION :**

Dans ce chapitre, nous avons cité les différents types des fours solaires et leur fonctionnement et les facteurs qui contrôlent le bon fonctionnement de ces fours.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les différentes étapes de réalisation du four solaire et nous allons procéder aux expériences afin de déterminer la performance de notre four solaire.

*Chapitre IV :*  
*Conception de*  
*four solaire*

### **IV.1. Introduction:**

Le four solaire est, à ce jour, la solution la plus écologique. C'est un appareil basé sur la conversion en chaleur des rayonnements lumineux émis par le soleil.

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes étapes de réalisation du four solaire. Notre expérience a été réalisée au niveau du hall technologique du département de Génie Mécanique, université de A-Mira de Bejaïa.

Le four solaire boîte à été réalisé dans le but de faire cuire des aliments, Le système est simple, Il ne possède pas de source de chaleur auxiliaire.

Après la description du four solaire, ce chapitre présente également les premières expériences afin de déterminer la performance de notre four solaire.

### **IV.2.Principe et fonctionnement de four solaire boîte :**

Le rayonnement pénètre à l'intérieur de la boîte et réfléchi sur un récipient dont la surface absorbe les rayons. La couverture transparente permet d'isoler l'intérieur du four de l'extérieur et de garder le maximum de chaleur; C'est le principe de l'effet de serre. Parfois, la couverture est composée d'un ou plusieurs réflecteurs positionnés de manière à apporter davantage de rayonnements solaires.

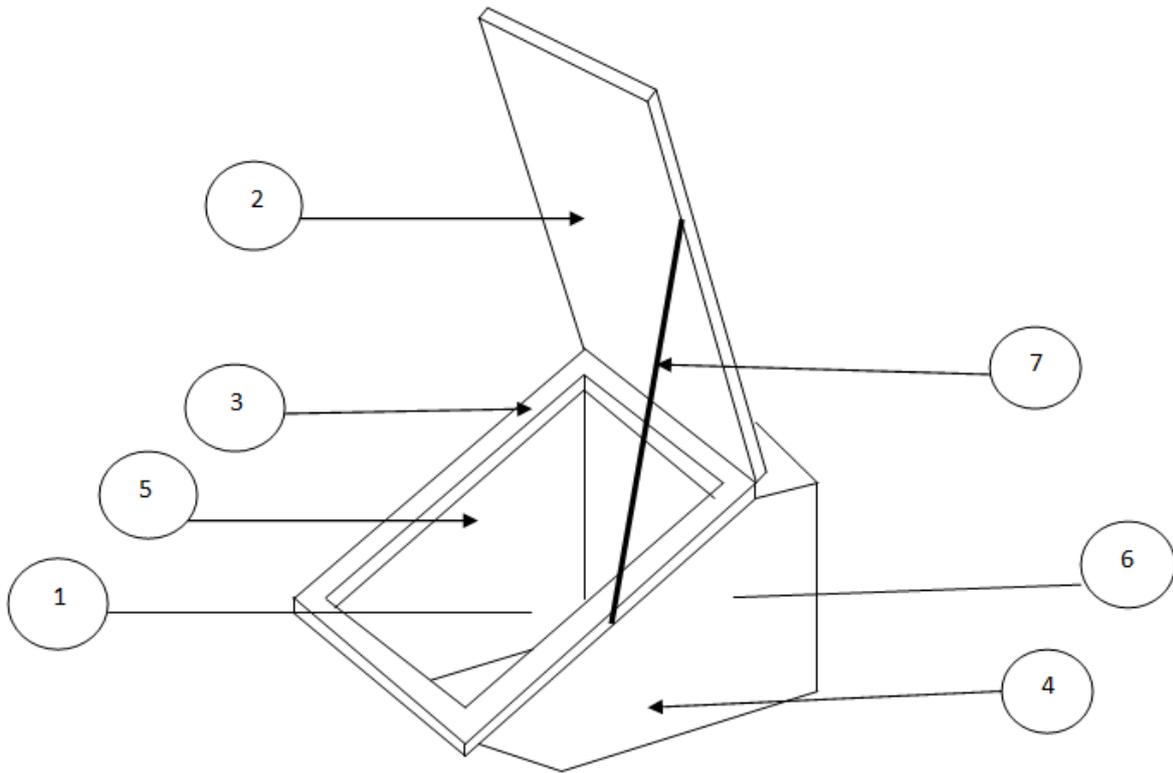
### **IV.3.Description du four solaire :**

Le four solaire est constitué d'une boîte extérieure en bois, une boîte interne de cuisson en inox, un couvercle à simple vitrage, un isolant thermique et un réflecteur.

L'espace entre le boîtier externe et boîtier interne, y compris le fond du plateau est rempli d'un matériau isolant pour réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur.

Le dispositif a été développé sur la base des exigences techniques pour la cuisson des aliments. Le choix des matériaux du four solaire est lié à la disponibilité des matériaux au niveau de l'université de A/Mira de Bejaïa.

Dans notre travail. On a choisi de réaliser le four type boîte avec une surface incliné.



**Figure .IV.1:** Les composants principaux de four solaire.

1-absorbeur.

2-le réflecteur.

3-porte vitré.

4- boîte en bois.

5- la vitre.

6-Isolant thermique.

7-Support.

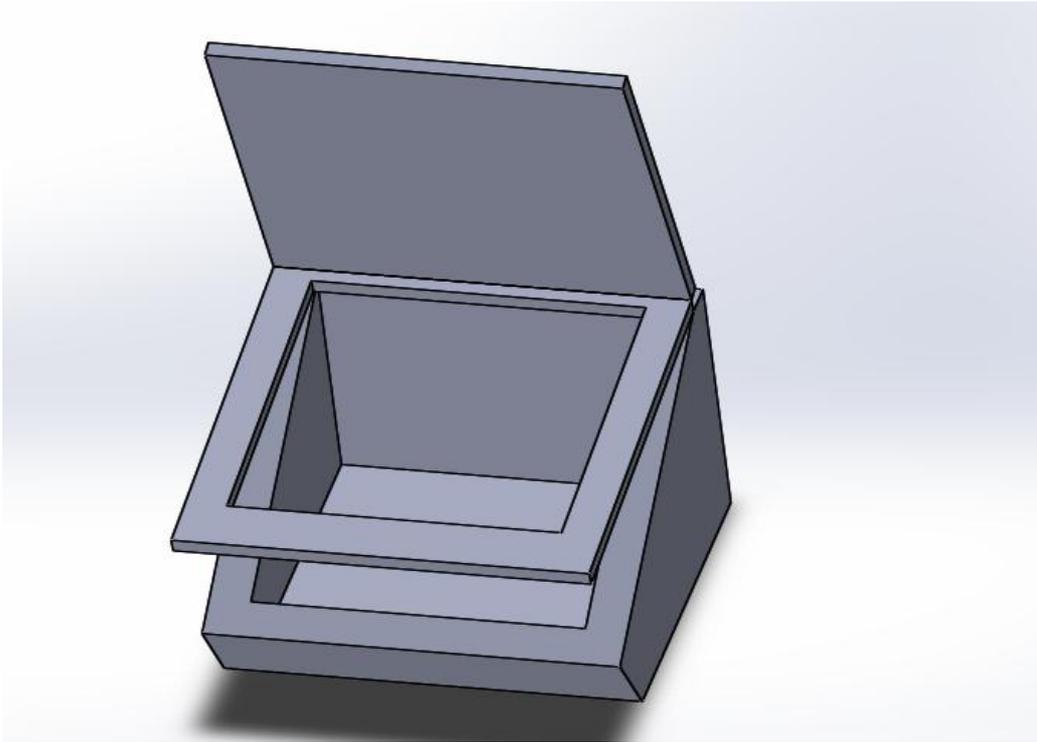
Le choix de la forme et les dimensions de notre four sont pris à partir du document « four solaire entropie juillet2013 ». Le tableau suivant résume les principales données techniques de notre four solaire.

**Tableau IV.1 :** les principales données techniques de notre four solaire

Absorbeur	Tôle en inox de 2 mm d'épaisseur.
Le réflecteur	Réflecteur recouvert de tôle en inox, Démentions (500x509) mm.
Porte vitré	Cadre en bois (500x509) mm.
Boîtier externe	Bois de 15 mm d'épaisseur
Vitrage	Verre ordinaire de 5mm d'épaisseur
Isolant thermique	Laine de mouton avec 35 mm d'épaisseur

#### IV.4. Conception du cuiseur boîte sous logiciel SolidWorks :

Pour réaliser notre four solaire, nous avons besoin de faire une conception. Pour cela nous avons utilisé le logiciel SolidWorks. Un détail de la conception contenant les divers plans est illustré sur la figure (IV.2).Annexe A



**Figure IV.2.** Conception du cuiseur solaire boîte avec logiciel SolidWorks

#### **IV.5. Les étapes de réalisation de four solaire :**

##### **a. Absorbeur:**

L'absorbeur du four est réalisé avec une plaque d'inox de 2 mm d'épaisseur, on commence par tracer les contours de la plaque, puis on les découpe à l'aide d'une cisaille.

##### **b. Boite en bois :**

On commence par réaliser le cadre. Pour cela, on coupe les montants et les traverses. On les assemble avec la colle et les vis. Une fois le cadre fini, on découpe les différentes parois de la boîte, après en les assemble avec le cadre.

##### **c. Assemblage du boîtier et l'absorbeur :**

Avant de fixer l'absorbeur sur les cadres intérieures, on isole la partie entre le boîtier extérieur et les plaques intérieure d'inox (absorbeur) avec un isolant (la laine de mouton). Après en fixe les plaques d'absorbeur sur les cadres internes avec des vis

**d. Porte Vitrée :**

On commence par le cadre de la porte vitrée du four qui est réalisé avec quatre profilés de bois. Ces profilés sont usinés avec la défonceuse d'une rainure de 7 mm de profondeur et de 6 mm d'épaisseur. Cette rainure est destinée à accueillir la vitre dont l'épaisseur fait 5 mm, ce qui laisse un jeu d'un millimètre lorsqu'elle insérée dans la rainure. Il est très important de laisser un jeu pour que la vitre puisse se dilater sans être contrainte lorsqu'on va faire chauffer le four et ainsi éviter qu'elle ne se fende. Après on découpe la vitre à l'aide d'une coupe verre de vitrier selon les dimensions (453 x 414) mm<sup>2</sup>. Enfin on les assemble.

**e. Le réflecteur :**

Pour réaliser le réflecteur on découpe une plaque en bois selon les dimensions (500x509) mm<sup>2</sup>. Après on découpe une plaque en inox avec les mêmes mesures de la plaque de bois, puis on les assemble à l'aide des vis.

**f. Assemblage Réflecteur Porte vitrée :**

On fixe les charnières à l'aide des vis sur le réflecteur. Les charnières sont ensuite vissées sur le cadre de la porte vitrée.

**g. Assemblage final :**

On fixe d'autres charnières sur le caisson et la porte vitrée ainsi que les fermoirs.



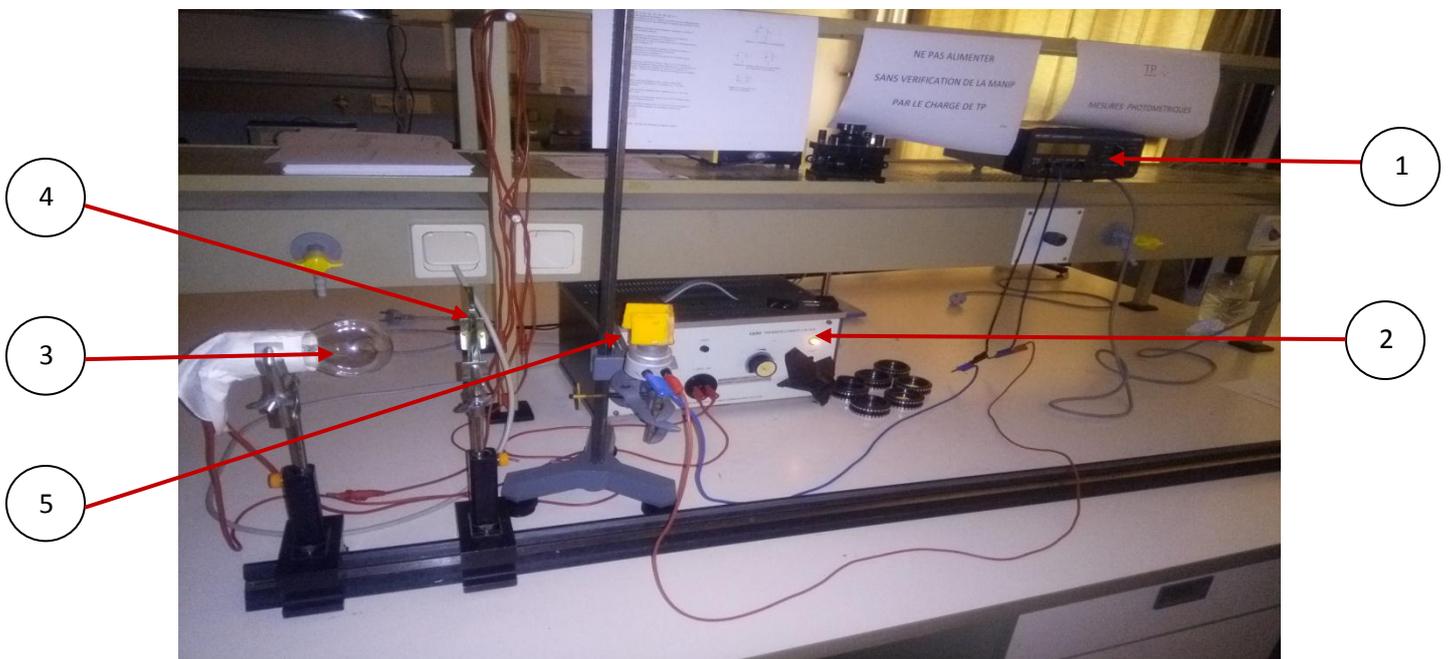
**Figure IV.3.**réalisation finale

### IV.6. Détermination du taux de transmission de la vitre :

Pour déterminer le taux de transmission de la vitre on réalise un montage optique composé de :

- Lampe à incandescence.
- Détecteur photodiode branché en photovoltaïque avec un multimètre.
- échantillon de la vitre.

Le montage est montré par la figure suivante :



**Figure IV.4 :** Un montage optique pour déterminer le taux de transmission de la vitre.

Nomenclatures :

- 1- Multimètre.
- 2- Générateur de tension.
- 3- Lampe à incandescence.
- 4- échantillon de la vitre.
- 5- photodiode.

On a mesuré l'intensité de la lumière issue de la source lumineuse sans la vitre ( $I_0$ ) en 3 mesures. Ensuite, on place un échantillon de la vitre sur le porte échantillon situé entre la

source de la lumière et le capteur. On mesure l'intensité de la lumière ( $I_v$ ) transmise par la vitre en 3 mesurages.

Pour calculer le coefficient de transmission on divise la valeur de l'intensité de la lumière avec le verre sur l'intensité de la lumière sans le verre.

$$T_v = \left( \frac{I_0}{I_v} \right) \times 100 \dots \dots \dots \text{IV.1}$$

On obtient les résultats suivants :

**Tableau IV.2.** Calcule de Coefficient de transmission de verre.

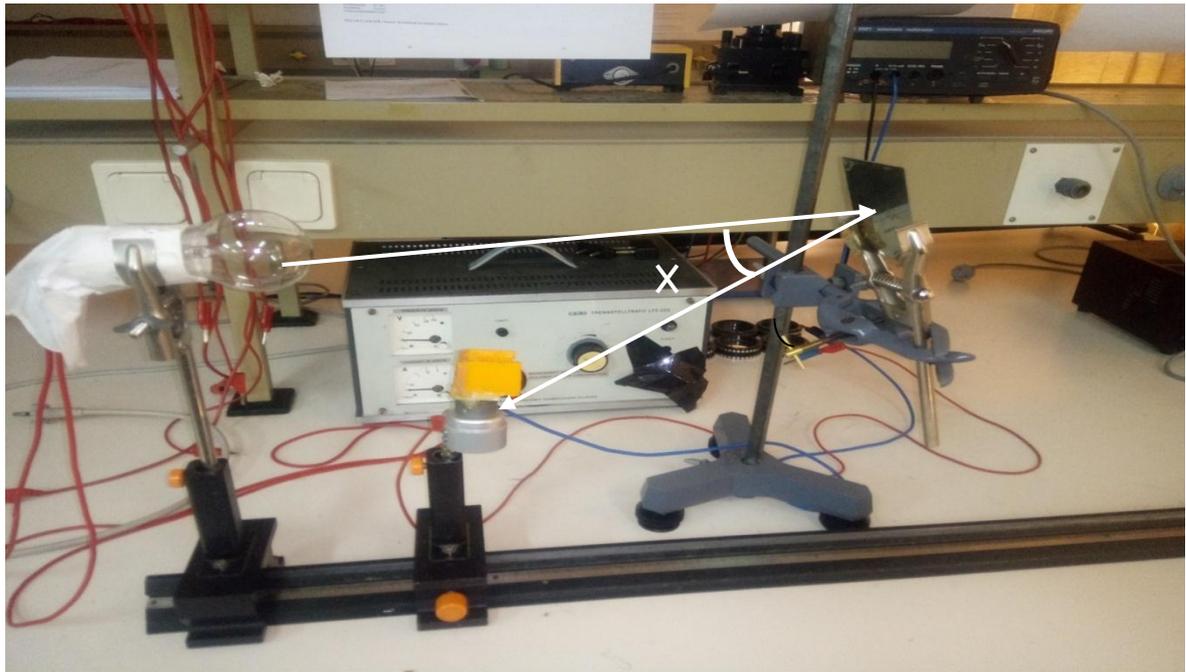
	l'intensité de la lumière sans le verre(V)	l'intensité de la lumière avec le verre(V)	Coefficient de transmission (Tv%)
Mesure 1	0.4553	0.4478	98.35
Mesure 2	0.4366	0.4276	97.93
Mesure 3	0.3890	0.3820	98.2
Moyenne	0.4269	0.4191	98.17

#### IV.7. Détermination du taux de réflexion de l'inox :

Pour déterminer le taux de réflexion de l'inox on réalise un montage optique composé de :

- Lampe à incandescence.
- Détecteur photodiode branché en photovoltaïque avec un multimètre.
- échantillon d'inox.

Le montage est montré par la figure suivante :



**Figure IV.5 :** Un montage optique déterminer le taux de réflexion de l'inox.

On a mesuré l'intensité de la lumière issue de la source lumineuse ( $I_0$ ). En suite on a placé le détecteur photodiode entre la source de la lumière et l'échantillon d'inox avec un angle ( $x$ ) par rapport à l'horizontal. Après on a mesuré l'intensité de la lumière réflécté par l'inox ( $I_i$ ).

On a obtenue :

$$I_0 = 0.3950 \text{ V et } I_i = 0.3838 \text{ V}$$

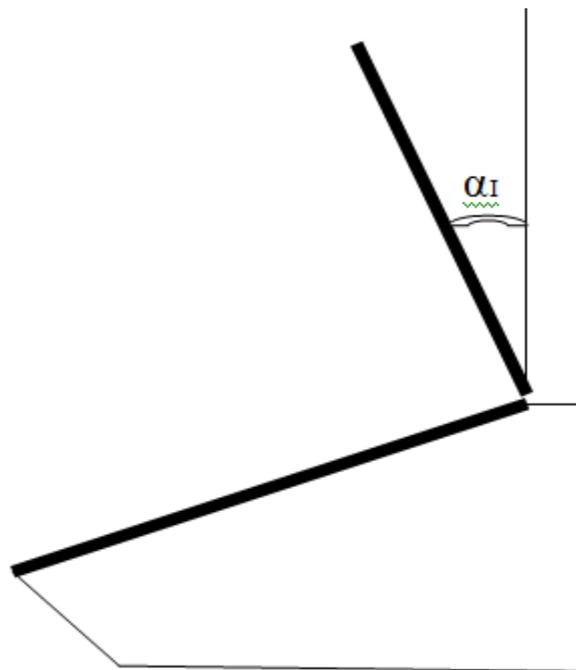
Pour calculer le coefficient de réflexion on divise la valeur de l'intensité de la lumière réfléctée par l'inox sur l'intensité de la lumière.

$$Ri = \left(\frac{I_0}{I_i}\right) \times 100 \dots \dots \dots \text{IV.2}$$

$$Ri = \left(\frac{0.3838}{0.3950}\right) \times 100$$

$$Ri = 97.16 \%$$

#### IV.8. Calcul de l'angle d'inclinaison du réflecteur :



**Figure IV.6.** Angle d'inclinaison de réflecteur par rapport à l'horizontale.

**Pour la journée de 29/05/2018**

Son numéro dans l'année est :  $j = 149$ .

D'après l'équation (I.3) on a :

$$\delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \frac{(284+j)}{365} \right)$$

$$\text{Donc } \delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \frac{(284+149)}{365} \right)$$

$$\delta = 21.6^\circ$$

D'après l'équation (III.1) on a :

$$\theta = \varphi \pm \delta$$

$$\text{Avec } \varphi = 36.45^\circ \quad (\text{I.2})$$

$$\theta = 36.45 + 21.6$$

$$\theta = 58.05^\circ$$

$$\text{D'où } \alpha_1 = \frac{1}{3} (2\theta + \beta - \frac{\pi}{2})$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{3} (2 \times 58.05 + 30 - \frac{\pi}{2})$$

$$\alpha_1 = 18.7^\circ$$

**Pour la journée de 31/05/2018**

Son numéro dans l'année est :  $j = 151$ .

D'après l'équation (I.3) on a :

$$\delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \frac{(284+j)}{365} \right)$$

$$\text{Donc } \delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \frac{(284+151)}{365} \right)$$

$$\delta = 21.9^\circ$$

D'après l'équation (III.1) on a :

$$\theta = \varphi \pm \delta$$

$$\text{Avec } \varphi = 36.45^\circ \quad (\text{I.2})$$

$$\theta = 36.45 + 21.9$$

$$\theta = 58.35^\circ$$

$$\text{D'où } \alpha_2 = \frac{1}{3} (2\theta + \beta - \frac{\pi}{2})$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{3} (2 \times 58.35 + 30 - \frac{\pi}{2})$$

$$\alpha_2 = 18.9^\circ$$

Pour la journée de 03/06/2018

Son numéro dans l'année est :  $j = 154$ .

D'après l'équation (I.3) on a :

$$\delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \frac{(284+j)}{365} \right)$$

$$\text{Donc } \delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \frac{(284+154)}{365} \right)$$

$$\delta = 22.30^\circ$$

D'après l'équation (III.1) on a :

$$\theta = \varphi \pm \delta$$

$$\text{Avec } \varphi = 36.45^\circ \quad (\text{I.2})$$

$$\theta = 36.45 + 22.30$$

$$\theta = 58.75^\circ$$

$$\text{D'où } \alpha_3 = \frac{1}{3} \left( 2\theta + \beta - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{3} \left( 2 \times 58.75 + 30 - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\alpha_3 = 19.17^\circ$$

#### IV.9. Expériences et résultats :

Dans cette partie, on a mené plusieurs expériences pour déterminer les différents paramètres qui interviennent lors de l'opération du cuire des aliments qui sont comme suit :

- La température ambiante.
- la température dans le capteur.

## IV.10. Variation des différentes températures en fonction de temps :

### IV.10.1. Description de l'expérience :

Nous avons doté notre dispositif de deux thermomètres pour mesurer les différentes températures. On met un thermomètre de type « dilatation des liquides (de 0 à 50°C) » pour mesurer la température ambiante. Un autre thermomètre digital à infrarouge avec un système de pointage laser double pour mesurer la température à l'intérieur de four

### IV.10.2. Présentation des Résultats des expériences :

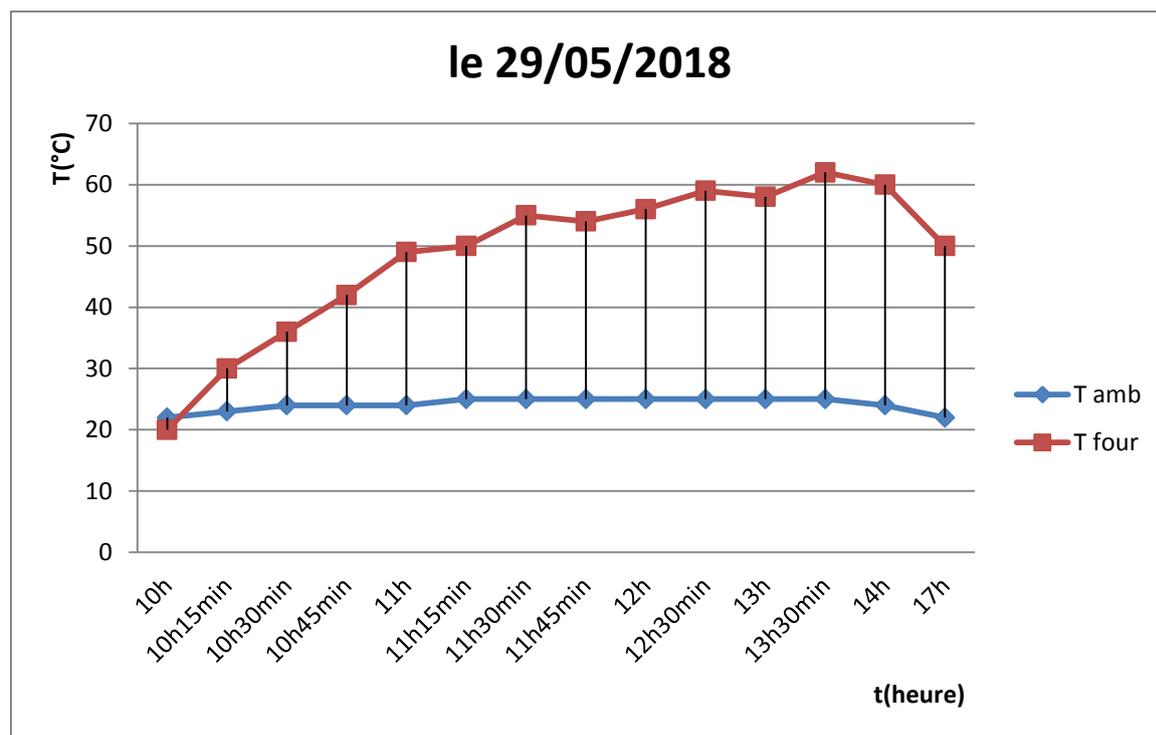
Durant notre travail nous avons pris des mesures pendant 03 journées différentes.

#### IV.10.2.1. La journée du 29/05/2018 :

Les températures relevées en fonction du temps sont représentées sur le tableau (IV.3) et la figure (IV.7) suivantes :

**Tableau IV.3 :** représente les variations des différentes températures en fonction de temps.

	10h	10h 15m	10h 30m	10h 45m	11h	11h 15m	11h 30m	11h 45m	12h	12h 30m	13h	13h 30m	14h	17h
T <sub>amb</sub> (°C)	22	23	24	24	24	25	25	25	25	25	25	25	24	22
T <sub>four</sub> (°C)	20	30	36	42	49	50	55	54	56	59	58	62	60	50



**Figure IV.7** : courbe représente les variations des différentes températures en fonction de temps.

### Interprétations et discussion des résultats obtenues :

La température ambiante varie entre 22°C et 25°C, elle est de moyenne de 23.5°C.

Après avoir effectué notre expérience, nous avons observé qu'au début de l'essai à 10h les conditions météorologiques sont assez bonnes (état du ciel clair), sans prendre en compte la vitesse du vent. Donc au début nous avons mesuré une température égale 20°C sur le capteur, ainsi que la température à l'extérieur est de 22°C, après 15 min en remarque une augmentation linéaire de la température à l'intérieur de four jusqu'à 12h 30. Sachant que durant cette journée, le capteur est orienté Sud-Est dans la matinée et à partir de 13h on l'a orienté vers le l'Ouest, juste après 30min nous avons observé une augmentation de la température du capteur à 62°C.

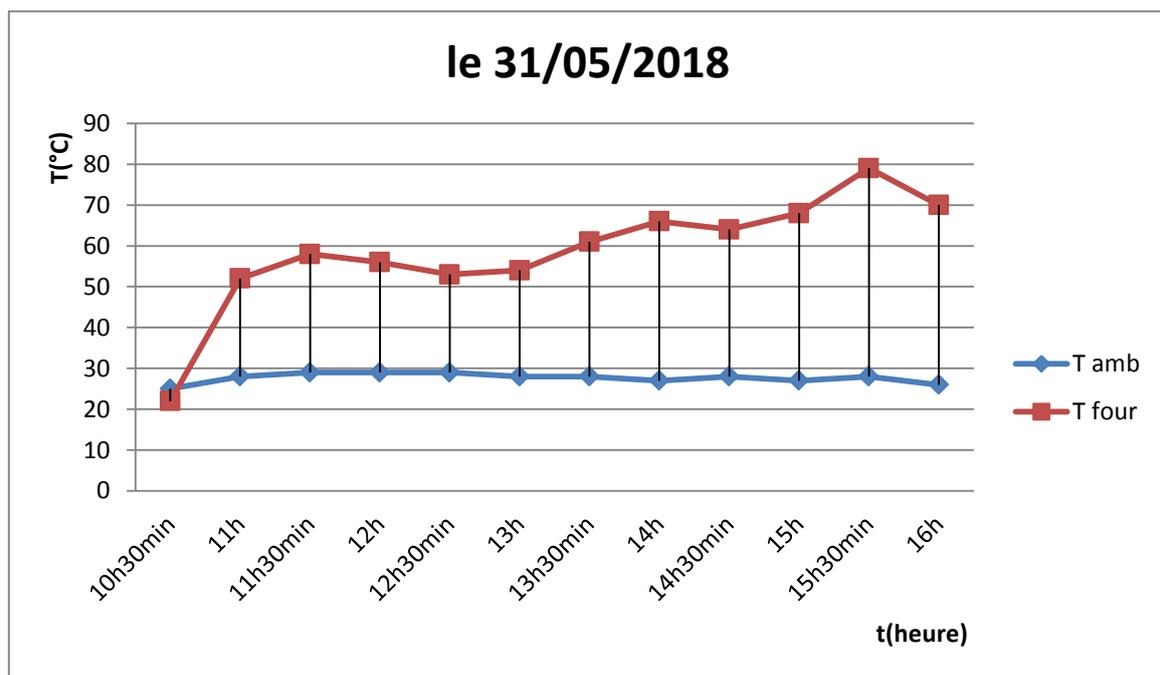
A partir de 16h30 les différentes températures ont commencé à baisser parce que la température ambiante a commencé la diminution brutalement.

**IV.10.2.2.La journée du 31/05/2018 :**

Les températures relevées en fonction du temps sont représentées sur le tableau (IV.4) et la figure(IV.8) suivantes :

**Tableau IV. 4 :** représente les variations des différentes températures en fonction de temps.

	10h 30min	11h	11h 30min	12h	12h 30min	13h	13h 30min	14h	14h 30min	15h	15h 30min	16h
T <sub>amb</sub> (°C)	25	28	29	29	29	28	28	27	28	27	28	26
T <sub>four</sub> (°C)	22	52	58	56	53	54	61	66	64	68	79	70



**Figure IV. 8 :** courbe représente les variations des différentes températures en fonction de temps.

### Interprétation et discussion des résultats obtenue :

La température ambiante varie entre 25°C et 29°C pour toute la journée elle est de moyenne de 27°C. Le ciel est en état ensoleillé.

Donc au début nous avons mesuré une température égale 22°C sur le capteur, ainsi que la température à l'extérieur est de 25°C, Après une demi-heure la température dans le four à augmenter rapidement jusqu'à 52°C, et à partir de 15h30 nous avons observé une augmentation maximale de la température du capteur à 79°C avec une température ambiante 28°C.

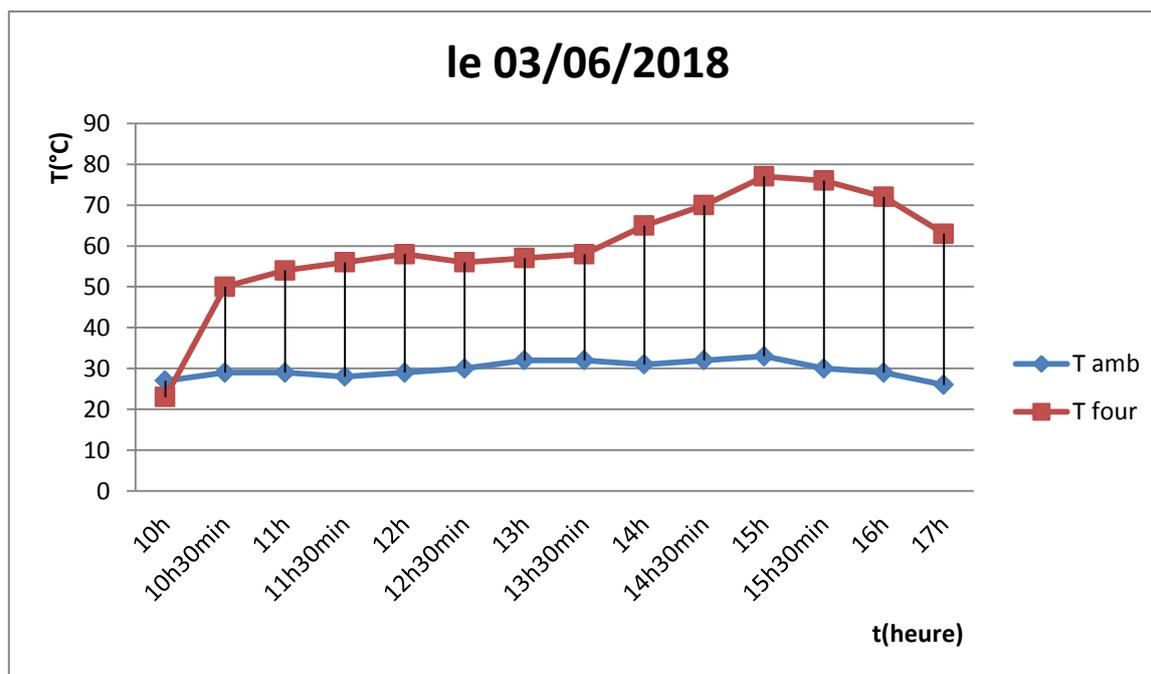
A partir de 16h les différentes températures ont commencé à diminuer, parce que la température ambiante a commencé la diminution brutalement.

#### IV.10.2.3.La journée du 03/06/2018 :

Les températures relevées en fonction du temps sont représentées sur le tableau(IV.5) et la figure suivantes(IV.9) :

**Tableau IV.5 :** représente les variations des différentes températures en fonction de temps.

	10h	10h 30m	11h	11h 30m	12h	12h 30m	13h	13h 30m	14h	14h 30m	15h	15h 30m	16h	17h
T <sub>amb</sub> (°C)	27	29	29	28	29	30	32	32	31	32	33	30	29	26
T <sub>four</sub> (°C)	23	50	54	56	58	56	57	58	65	70	77	76	72	63



**Figure IV.9 :** courbe représente les variations des différentes températures en fonction de temps.

### Interprétions et discussion des résultats obtenus :

La température ambiante varie entre 27°C et 33°C pour toute la journée elle est de moyenne de 30°C, le ciel en état ensoleillé.

A partir du 10h:30 la température à l'intérieur de four à augmenter rapidement, et elle est stable jusqu'à 13h 30

Nous avons remarqué une importante de différence des températures entre la température ambiante et celle du four ( $\Delta T=21$  °C), et à partir de 15h nous avons observé une augmentation maximale de la température du capteur à 77°C avec une température ambiante 33°C ( $\Delta T=44$  °C).

A 15h30 la température ambiante et celle de four ont commencé à diminué.

### IV.11. Résumé des résultats :

Dans le tableau suivant on à résumé la différence entre la température ambiante et la température à l'intérieur de four:

On note:

$T_{\text{amb}}$  : la température ambiante (°C).

$T_{\text{four}}$  : la température du four (°C).

$\Delta T1$  : la différence entre la température ambiante et la température de four solaire (°C).

**Tableau IV.6** : résume les différentes températures ( $T_{\text{amb}}$  et  $T_{\text{four}}$ ).

	$T_{\text{amb}}$ (moy) (°C)	$T_{\text{four}}$ (moy) (°C)	$\Delta T$ (moy) (°C)
Journée du 29/05/2018	24,14	48,64	24,50
Journée du 31/05/2018	27,67	58,58	30,91
Journée du 03/06/2018	29,79	59,64	29,85
Moyenne (°C)	27,2	55,62	28,42

D'après les mesures qu'on a obtenues on constate que :

- Les différentes températures augmente avec le rayonnement solaire capte jusqu'à atteindre leur valeur maximale au environ 14h, puis chutent d'une façon assez brusque jusqu'aux environs de 17h.
- On constate aussi que la température du four est double que la température ambiante.

$$T_{\text{four}} = 2T_{\text{amb}} \text{ (°C)}$$

# *Conclusion générale*

## Conclusion Générale

---

L'énergie est considérée comme le facteur le plus important dans le développement économique des nations. La demande mondiale en énergie est prévue d'augmenter rapidement au cours des prochaines années avec l'augmentation de la population humaine, l'urbanisation et la modernisation. Actuellement, l'utilisation des sources d'énergies fossiles dominent encore le secteur résidentiel, considéré comme le secteur principal; du point de vue besoins énergétiques, dans le monde. La demande d'énergie pour la cuisson est comptée comme la plus importante dans le secteur. En Algérie, pour les citoyens qui sont installés dans plusieurs régions isolées du pays, la cuisson des aliments revient très onéreuse, quand on exploite les sources énergétiques conventionnelles et induit des conséquences désastreuses sur l'écosystème en exploitant le bois des quelques arbustes restants dans ces régions.

Dans ce contexte et dans le cadre de ce travail, on s'est proposé de faire la conception et la réalisation pratique d'un four solaire de type boîte avec surface réceptrice inclinée muni de réflecteurs à concentration d'énergie. Cette configuration permet d'améliorer les performances du cuiseur et résoudre quelques problèmes liés à la cuisson solaire à savoir; les rendements minimes à cause des faibles températures. Après une étude bibliographique sur les systèmes à cuisson solaire, leur développement et leur utilisation à travers le monde, nous avons commencé par l'étude détaillée de notre problématique. Une conception fait à l'aide du logiciel SolidWorks. Dans la partie principale de ce travail, nous avons procédé à la réalisation du cuiseur solaire avec son réflecteur. Le cuiseur est ensuite testé au site de Bejaia (université A.MIRA). Les tests entrepris pour vérifier la faisabilité et le bon fonctionnement du cuiseur réalisé.

*Références  
bibliographiques*

## Bibliographie

---

- [1] KHADRAOUI Zakaria « Etude d'une centrale solaire thermique » mémoire fin d'étude université BADJI MOKHTAR ANNABA 2016/2017.
- [2] RAYMOND BACQ (1982) « Le guide de l'énergie solaire et les pompes à chaleur » Edition marabout
- [3] ZIDANE Faouzi et HAMMI Sassi « Etude et Réalisation d'un séchoir solaire à capteur solaire plan. » mémoire fin d'étude université Abderrahmane MIRA BEJAIA 2016 /2017
- [4] J. Bernard, « *Energie solaire calculs et optimisation* », Ellipse Edition Marketing 2004.
- [5] PEUSER F.A., REMMERS K-H., SCHNAUSS M. : Installations solaires thermiques : conception et mise en oeuvre, Systèmes solaires, 2005, 400 p
- [6] European office: Solenergy Europe St. Petersburg, Russia, Universal solar tracker Sunflower St.
- [7] M. Haddadi, '*Elaboration d'une Commande pour Héliostat*', Revue des Energies Renouvelables, Numéro Spécial, pp. 153 – 157, 2003.
- [8] Document, '*Contrôle des Systèmes DEGERtraker*', DEGERenergie GmbH, 72160 Horb/Germany. <http://www.degerenergie.de>
- [9] European office: Solenergy Europe St. Petersburg, Russia, Universal solar tracker Sunflower St.
- [10] S. Chin, J. Gadson and K. Nordstrom, '*Nerd Girls, Maximum Power Point Tracker*', Nerd Girls Solar/MPPT Group May 12, 2003.
- [11] Guide de l'énergie renouvelable, *Sarl BAOSEM*, 2007.
- [12] M. Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).
- [13] A. Mefti, M.Y. bouroubi, H. Mimouni, 'Evaluation du potentiel énergétique solaire', Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).
- [14] CSTB, ASDER, CLIPSOL-RECHERCHE : PSD-MI : méthode mensuelle d'évaluation des performances thermiques des Planchers Solaires Directs.

## Bibliographie

---

- [15] Ademe, Eau chaude solaire collective : bonnes pratiques, novembre 2005, 38 p
- [16] Les Centrales Solaires à Concentration Université de Liège Faculté des sciences appliquées Mai 2007 Quoilin Sylvain Ingénieur Civil Electromécanicien/Energéticien
- [17] Guehza Med lazhar, impact de l'espace entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire sur le rendement du capteur plan à double vitrage, mémoire magister université d'Ouargla
- [18] D. Guerraiche, 'simulation et prédiction de la radiation solaire directe absorbé par un champ de capteur Cylindro-parabolique', mémoire en Magister, Batna, Algérie, 2002.
- [19] P. Bessemoulin, J.Oliviéri, Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, France: Document Meteo-France (Service central d'exploitation de la meteorology and Centre radiométrique de Carpentras), 2000.
- [20] Bc. Monika Kokrdová « L'ENERGIE SOLAIRE » mémoire de magister université palacky à olomouc 2010/1011.
- [21] Module de formation continue des énergies renouvelables Module <<capteur solaire>> cours de base M31.1 Edition 2009
- [22] N, Bellel. Etude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries ; thèse de doctorat, Université de Constantine. (2004).
- [23] [www.boliviainti-sudsoleil.org](http://www.boliviainti-sudsoleil.org). (15 Mars 2015)
- [24] four\_solaire\_entropie\_juillet2013
- [25] V. Neeranartvong, Etude d'un concentrateur solaire a simple réflexion. Thèse de Docteur, Ingenieur, Institut National Polytechnique, Toulouse, (1983).
- [26] B.Y.H.Liu et R.C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of distribution of direct, diffuse and total solar radiation, Solar Energy, 4 (1960) : 1-19.
- [27] H.Naito, Y.Kohsaka, D.Cooke, Development of solar receiver for high-Efficiency thermionic/ thermoelectric conversion system. Solar Energy, 58(4):191-195 · October (1996).

## Bibliographie

---

- [28] Ibrahim SMA, El-Reidy MK, «The performance of solar cooker in Egypt,» *Renewable Energy*, Vols. %1 sur %26-8, pp. 1041-1050, 1995.
- [29] Berhinger R. et Götz M., 2009. Cuiseurs solaires : Autoconstruction et recettes Ed. La Plage.
- [30] A. Dizier, F. Pignon, «Manuel de cuisson solaire,» Edition commune SCI / iD COOK, Paris, France, 2005.
- [31] «Solar Cooking,» SCInet, [En ligne]. Available: <http://solarcooking.org/>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [32] HADJ BELKACEMI Mohammed « Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé » mémoire de fin d'étude Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2010/2011.