

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULoud MAMMERI TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE-MECANIQUE



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en génie mécanique

Option : Energétique

Spécialité : Froid, Chauffage et Climatisation

THÈME

Etude et réalisation d'un
concentrateur solaire parabolique

Proposé et dirigé par :

Mr : S.MAKHLOUF

Réalisé par :

KHEROUS Nabil

HAMZAOUI Jugurtha



2014/2015

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu Dieu qui nous a donné la force pour mener à bien l'étude de ce projet.

Nous exprimons nos vifs remerciements à notre promoteur Mr S.MAKHLOUF, enseignant à l'institut de Génie Mécanique de Tizi-Ouzou de nous avoir proposé le sujet. On tient à le remercier pour sa précieuse aide, sa disponibilité et ses précieux conseils pour l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi aux personnels de hall de technologie de Ouad-Aissi et spécialement à Mr M.Ahcene et Mr A.Sofiane

Nos remerciements vont également aux personnels de l'usine de « Nouara » de Tizi rached pour nous avoir fourni le papier aluminium

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de l'institut de Génie Mécanique de nous avoir suivis le long de notre cursus universitaire

Nous remercions également le président et les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en jugeant notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

- A mon très cher père et ma très chère mère auxquels je dois tout mon respect et que je ne remercierai jamais assez pour leurs soutiens, encouragements et conseils durant tout mon parcours universitaire;*
- A mes frères, Samir et Hakim ;*
- A ma petite sœur Lydia ;*
- A toute la famille KHEROUS et YAHI ;*
- A mon cher binôme Jugurtha et toute sa famille ;*
- A mes très cher amis de K 28, Nacer, Yacine, Amrane, Tarik, Elhadi, Mourad, Rachid ;*
- A ma copine Djahida ;*
- A tous mes amis ;*
- A toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.*

KHEROUS Nabil

Je dédie ce travail à:

Mon très cher père et ma très chère mère auxquels je dois tout dans la vie et que je ne remercierai jamais assez pour leurs soutiens, Encouragements durant tout mon parcours universitaire.
Mes frères Billy Fifou Med Saïd et ma chère sœur Messa le petit Abdo ainsi que toute la famille
A mon pote et cher binôme Nabil
Tous les amis de M19 M20 M26 M27 M66
Saïd, Ghiles, Mourad Aghezfane, Sadek
Les gens de « axxam azeggagh »
Manchester United et S.A.F
Tous mes amis et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin dans ce travail.

Hamzaoui Jugurtha

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Gisement solaire	
I.1- Introduction.....	2
I.2- Mouvement du Globe terrestre.....	2
I.3- La sphère céleste.....	3
I.4- Les coordonnées célestes.....	3
I.4.1- Coordonnées géographiques.....	5
- Latitude.....	5
- Longitude.....	5
- Altitude.....	5
I.4.2- Coordonnées horaires.....	6
- Déclinaison du soleil.....	6
- Angle horaire du soleil.....	7
I.4.3- Coordonnées horizontales.....	9
- Hauteur du soleil.....	9
- Azimut du soleil.....	9
- Angle zénithal.....	9
- Angle incidence.....	10
I.5 - Durée d'insolation.....	10
I.6 - Rayonnement solaire.....	10
I.6.1 -Rayonnement hors atmosphère.....	11
I.6.2 - Rayonnement solaire en atmosphère terrestre.....	11
I.6.3 -Indice de clarté.....	11
I.7 - La constante solaire.....	12
I.8 - Notions générales sur le rayonnement solaire au sol.....	12
I.8.1- Rayonnement solaire arrivant au sol.....	12
I.8.1.1 - Rayonnement direct.....	13
a- L'éclairement direct.....	13
b- Irradiation direct.....	14
I.8.1.2 - Rayonnement diffus.....	14
a- L'éclairement diffus.....	14
b- Irradiation diffuse.....	14

SOMMAIRE

I.8.1.3 – Rayonnement réfléchi.....	14
I.8.1.4 - Rayonnement global.....	14
I.9- Rayonnement solaire en Algérie.....	15
Conclusion.....	16

Chapitre II : Généralité sur les cuiseurs solaire

II.1- Introduction.....	17
II.2- Définition.....	17
II.3- Historique.....	17
II.4- Principe de fonctionnement du cuiseur solaire.....	18
II.5- Principe de la réflexion.....	19
II.5.1- Réflexion sur une surface plane.....	19
II.5.2- Réflexion sur une surface courbe.....	20
II.6- Les différents types de cuiseurs solaires.....	20
II.6.1- Les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur.....	20
II.6.1.1- Les cuiseurs directs.....	20
- Les cuiseurs boîte.....	20
- Les cuiseurs à concentration.....	21
• Type parabolique.....	22
• Cylindro-parabolique.....	22
• Type sphérique.....	22
• Type à panneaux.....	22
II.6.1.2- Type indirect.....	24
- Avec collecteurs solaires plans.....	24
- Avec tube collecteur.....	25
- Avec collecteur à concentration.....	25
II.6.2- Cuiseur solaire avec stockage de chaleur.....	25
II.6.2.1- Stockage de chaleur sensible.....	25
II.6.2.2- Cuiseurs solaires avec stockage de chaleur latente.....	26
II.7- Four solaire d’Odeillo.....	27
II.7.1- Présentation.....	27
II.7.2- Le principe de fonctionnement.....	27
II.7.3- Domaine d’utilisation.....	28

SOMMAIRE

II.8- Les Avantages et Inconvénients.....	28
II.8.1- Avantages.....	28
II.8.2- Inconvénients.....	30
Conclusion.....	30

Chapitre III : Etude théorique d'un concentrateur solaire parabolique

III.1- La géométrie parabolique.....	31
III.1.1- Définition.....	31
III.1.2- Equation de la parabole.....	31
III.1.3- Equation réduite d'une parabole.....	31
III.1.4- Caractéristiques d'une parabole.....	32
a- Taille d'une parabole.....	32
b- Surface d'arc parabolique.....	32
c- Longueur d'arc parabolique.....	33
d- surface d'ouverture de la parabole.....	33
e- Angle d'ouverture d'une parabole.....	33
III.1.5- Système optique d'une surface parabolique.....	34
III.2- Les composants d'un concentrateur solaire parabolique.....	35
III.2.1- Réflecteur.....	35
III.2.2- Récepteur.....	36
III.3- La concentration solaire.....	38
III.3.1- Concentration géométrique.....	38
III.3.2- Concentration optique.....	40
III.4- Bilan thermique sur le concentrateur parabolique.....	40
III.4.1- Le Réflecteur.....	40
III.4.2- Le récepteur.....	40
a- Le flux utile.....	41
b- Le flux absorbé.....	41
c- Les pertes thermiques.....	42
- Pertes par évaporation.....	42
- Pertes par convection.....	42
- Pertes par rayonnement.....	43

SOMMAIRE

III.5- Expression de la température du récepteur.....	44
III.6- Efficacité du concentrateur.....	44
III.7- Exemple d'application théorique.....	45
Conclusion.....	46

Chapitre IV : La cuisson avec un cuiseur solaire

IV.1 - La cuisson solaire.....	47
IV.2 - Facteurs essentiels pour la cuisson solaire.....	47
IV.2.1 - Emplacement du cuiseur solaire.....	47
IV.2.2 - Moment d'utilisation du cuiseur solaire.....	48
IV.2.3 - Type de récepteur utilisé pour la cuisson des aliments.....	48
IV.2.4 - Durée de la cuisson.....	49
IV.2.5 - Cuisson alimentaire en fonction des températures.....	49
IV.3 - Comment préparer un plat avec un cuiseur solaire.....	51

Chapitre V : Réalisation et discussions des résultats

V.1- Introduction.....	53
V.2- Description générale du montage réalisé.....	53
a- La parabole.....	53
b- La monture.....	56
c- Le récepteur.....	56
V.3-Résultats et discussions.....	57
V.3.1- résultats.....	58
V.3.2- comparaison entre les résultats théoriques et mesuré.....	65
Conclusion.....	65
Conclusion générale.....	66

SOMMAIRE

Nomenclature

Notations

Unités

Lettres latines

d : Le numéro du jour a partir du 1 ^{er} janvier	[Jr]
L : La longitude du lieu	[degré]
TSV : Temps solaire vrai	[heure]
TL : Le temps légal	[heure]
h : Hauteur du soleil	[degré]
i : L'inclinaison du capteur	[degré]
S_0 : Durée d'insolation	[heure]
G_0 : Le rayonnement extraterrestre	[MJ/m ² j]
G : Le rayonnement solaire global reçu sur le sol	[MJ/m ² j]
K_T : L'indice de clarté	/
I_0 : La constante solaire corrigée	[W/m ²]
$C_{t,s}$: Correction de distance terre-soleil	/
I^* : Le rayonnement solaire direct	[W/m ²]
D^* : Le rayonnement solaire diffus	[W/m ²]
S_{dir} : Puissance reçue directe	[W/m ²]
H_{dir} : Energie reçue directe	[J/m ²]
S_{dif} : Puissance diffuse reçue	[W/m ²]
H_{dif} : Energie diffuse reçue	[J/m ²]
S_{ref} : Puissance réfléchie reçue par la surface inclinée	[W/m ²]
H_{ref} : Energie réfléchie reçue par la surface inclinée	[J/m ²]
T_r : Coefficient de trouble de LINK	/
H_r : Humidité relative	[%]
T_{am} : Température	[°C]
P_v : Pression de vapeur	[mmHg]
D : Diamètre de la parabole	[m]
P : le paramètre de la parabole	[m]
f : la distance focale = $P/2$	[m]
P_f : Profondeur de la parabole	[m]
S_x : Surface de la parabole	[m ²]
L_p : Longueur d'arc parabolique	[m]

SOMMAIRE

A_{par} : Surface d'ouverture de la parabole	[m ²]
C_g : Concentration géométrique	/
C_{en} : Concentration énergétique	/
Q_u : Le flux utile	[W]
m_f : Masse du fluide	[kg]
c_f : Chaleur massique du fluide	[J/kg.K]
m_r : Masse du récepteur	[kg]
c_r : Chaleur massique du récepteur	[J/kg.K]
Q_{ref} : Le flux réfléchi	[W]
Q_{abs} : Le flux absorbé	[W]
Q_{per} : Pertes thermiques	[W]
Q_{cd} : Pertes par conduction	[W]
k : Conductivité thermique du récepteur	[W/m.K]
A_{rec} : Surface du récepteur	[m ²]
T_{rec} : Température du récepteur	[°C]
Δx : Epaisseur du récepteur	[m]
Q_{cv} : Pertes par convection	[W]
h_{cv} : Coefficient de perte par convection	[W/m ² .K]
D_{rec} : Diamètre du récepteur	[m]
V_{vent} : Vitesse du vent	[m/s]
CP_{air} : Chaleur spécifique de l'air	[J/kg.K]
H : la hauteur du récepteur	[m]
Q_{ray} : Pertes par rayonnement	[W]
h_{ray} : Coefficient de perte par rayonnement	[W/m.K]
T_{ciel} : Température du ciel	[°C]
Re : Nombre de Reynolds	/
Pr : Nombre de Prandtl	/
Nu : Nombre de Nusselt	/
Lettres grecques	
φ : La latitude du lieu	[degré]
δ : Déclinaison solaire	[degré]
ω : L'angle horaire	[degré]

SOMMAIRE

α : Azimut du soleil	[degré]
Δ : Décalage administrative	[heure]
θ_z : Angle zénithal	[degré]
θ : Angle d'incidence	[degré]
β : Coefficient de trouble atmosphérique	/
ρ : Albédo, facteur de réflexion du sol	/
Ψ : Angle d'ouverture d'une parabole	[degré]
ε : L'angle sous lequel on voit le soleil a partir de la terre	[rad]
α_{rec} : Facteur d'absorption du récepteur	/
ρ_{ref} : Facteur de réflexion du réflecteur	/
τ_{rec} : Facteur de transmission du récepteur	/
λ_{air} : Conductivité thermique de l'air	[W/m. K]
ν_{air} : Viscosité cinématique de l'air	[m ² /s]
μ_{air} : Viscosité dynamique de l'air	[kg/m.s]
ε_{rec} : Facteur d'émissivité du récepteur	/
σ : Constante Stefan-Boltzmann	[W/m ² .K ⁴]
η : Efficacité du concentrateur	/

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1 : Mouvement du globe terrestre.....	2
Figure I-2 : La sphère céleste.....	3
Figure I-3 : Les coordonnées géographiques terrestres.....	5
Figure I-4 : La déclinaison de la terre en fonction du jour.....	7
Figure I-5 : Coordonnées horaire (équatoriales).....	8
Figure I-6 : Les coordonnées horizontales.....	10
Figure I-7 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	11
Figure I-8 : Evolution annuelle de la constante solaire.....	12
Figure I-9 : Composantes du rayonnement global sur une surface inclinée.....	15
Figure I-10 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....	15
Figure I-11 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné en fonction de latitude du lieu.....	16

SOMMAIRE

Chapitre II

Figure II-1 : Principe de fonctionnement du cuiseur solaire.....	19
Figure II-2 : Réflexion sur une surface plane.....	19
Figure II-3 : Réflexion sur une surface courbe.....	20
Figure II-4 : Les différents modèles du type boîte.....	21
Figure II-5 : Les cuiseurs solaires à concentration.....	22
Figure II-6 : Un modèle de cuiseur solaire à panneaux.....	23
Figure II-7 : cuiseur Avec collecteurs solaires plans.....	24
Figure II-8 : cuiseur avec stockage de chaleur sensible.....	26
Figure II-9 : Cuiseurs solaires avec stockage de chaleur latente.....	26
Figure II-10 : Le four solaire d'Odeillo.....	27
Figure II-11 : principe de fonctionnement du four d'odeillo.....	28

Chapitre III

Figure 1 : graphe montre les caractéristiques d'une parabole.....	31
Figure 2 : graphe d'une parabole d'équation $y^2=2px$	32
Figure 3 : angle d'ouverture de la parabole en fonction de la distance focal.....	33
Figure 4 : Distance focale en fonction de l'angle d'ouverture d'une parabole $D = 1m$	34
Figure 5 : Réflexion des rayons solaire sur une parabole parfaite.....	35
Figure 6 : variation du coefficient de réflexion de quelques métaux en fonction de la longueur d'onde de l'onde incidente perpendiculaire à la surface.....	36
Figure 7: la réflexion des rayons forme une image circulaire.....	37
Figure 8 : Diamètre de l'image circulaire en fonction de l'angle d'ouverture de la parabole $D = 1m$	38
Figure 9 : coup méridienne d'une demi-parabole montrant les projections de l'image du soleil sur le plan focal.....	39
Figure 10 : bilan thermique sur un récepteur.....	41

Chapitre VI

Figure 1 : Moment d'utilisation du cuiseur solaire.....	48
Figure 2 : Types de récepteurs utilisés pour la cuisson des aliments.....	48
Figure 3 : Les facteurs essentiels pour la cuisson.....	49
Figure 4 : Cuisson alimentaire en fonction des températures.....	50

SOMMAIRE

Figure 5 : La durée de cuisson de quelques aliments.....51

Chapitre V

Figure 1 : Le squelette de la parabole.....54

Figure 2 : La mise en place des baguettes en plastique sur le squelette.....54

Figure 3 : La mise en place des triangles en aluminium sur le squelette.....55

Figure 4 : Image d'un réflecteur parabolique.....55

Figure 5 : L'ensemble parabole sur sa monture.....56

Figure 6 : Une marmite en aluminium peinte en noire57

Figure 7 : Chauffage d'un litre d'eau avec le concentrateur réalisé.....58

Figure 8 : Schéma du système d'acquisition de données58

Figure 9 : Evolution des températures mesurées du 2eme essai59

Figure 10 : Evolution de l'éclairement théorique et mesuré au cours de la journée60

Figure 11 : Diagramme solaire pour la ville de Tizi Ouzou60

Figure 12 : Evolution des températures mesurées du 3eme essai62

Figure 13 : Evolution des températures au début du 4eme essai63

Figure 14 : Evolution des températures après 16 minutes63

Figure 15 : Evolution des températures après 32 minutes64

Figure 16 : Evolution des températures après 72 minutes64

Figure 17 : Les aliments après 90 minutes de cuisson65

Introduction générale

Selon des études faites par certains instituts de recherche, la consommation en énergie des pays en voie de développement va connaître une augmentation très importante, surtout après la mondialisation du commerce et des échanges entre les états.

Le dernier choc pétrolier et la catastrophe de la centrale nucléaire de Tchernobyl et celle de FUKUSHIMA, ont beaucoup stimulé la recherche et le développement de nouvelles sources d'énergies renouvelables et particulièrement solaires.

Cette énergie peut être transformée en chaleur à basse température, par des capteurs plans, utilisant conjointement l'absorption par une surface sélective et l'effet de serre créé par le vitrage, ces capteurs ne permettent pas en général de dépasser une température de 100 °C.

Pour travailler à température élevée, il faut accroître le flux optique incident qui pourrait se faire par concentration du rayonnement solaire. Cette opération est réalisée à l'aide de capteurs appelés concentrateurs solaires. Parmi ce type de concentrateurs, il y a les concentrateurs solaires paraboliques.

Ces systèmes comportent en général une surface réfléchissante sous forme parabolique destinée à concentrer l'énergie solaire sur une surface absorbante, ce qui permet d'avoir une forte augmentation de chaleur.

L'avantage d'une telle méthode est de pouvoir atteindre des températures élevées bien adaptées pour le chauffage d'eau (production d'eau stérilisée et de vapeur d'eau), et pour les cuisines solaires et production d'électricité par les moteurs Stirling.

Notre travail est consacré à l'étude et à la modélisation du concentrateur solaire parabolique et la réalisation d'un prototype. Le mémoire de synthèse des travaux réalisés a été réparti comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'étude de la course du soleil par rapport à la terre au cours de la journée et de l'année.

Le second chapitre porte sur les généralités sur les cuiseurs solaires et leurs caractéristiques.

Le troisième chapitre est consacré pour une étude théorique sur un concentrateur parabolique.

Le quatrième chapitre porte sur les généralités sur la cuisson solaire.

Enfin le cinquième chapitre est consacré à la réalisation d'un prototype du concentrateur étudié et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.

Le mémoire se termine par une conclusion qui reprend l'essentiel des résultats obtenus et les perspectives à venir.

Chapitre I : Gisement solaire

I.1- Introduction

La ressource de base la plus importante pour tous les potentiels énergétiques renouvelables est l'énergie solaire, c'est le rayonnement émis dans toutes les directions par le soleil et que la terre reçoit à raison d'une puissance moyenne de $1,4 \text{ kW/m}^2$, pour une surface perpendiculaire à la direction terre-soleil. Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion, suivant les conditions météorologiques et la latitude du lieu au niveau du sol.

Afin d'exploiter au mieux cette ressource énergétique et pour un bon dimensionnement des installations solaires, il est nécessaire de connaître la quantité d'énergie solaire disponible à un endroit spécifique à chaque instant de la journée et de l'année.

Pour cette raison, on a jugé nécessaire de présenter dans ce chapitre les notions générales sur les coordonnées célestes ainsi que le rayonnement solaire.

I.2- Mouvement du Globe terrestre

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique 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 c'est au solstice d'été (21 Juin) qu'elle en est plus éloignée.

La terre tourne sur elle-même avec une période de 24 h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle $\delta=23.45^\circ$ avec la normale au plan de l'écliptique.

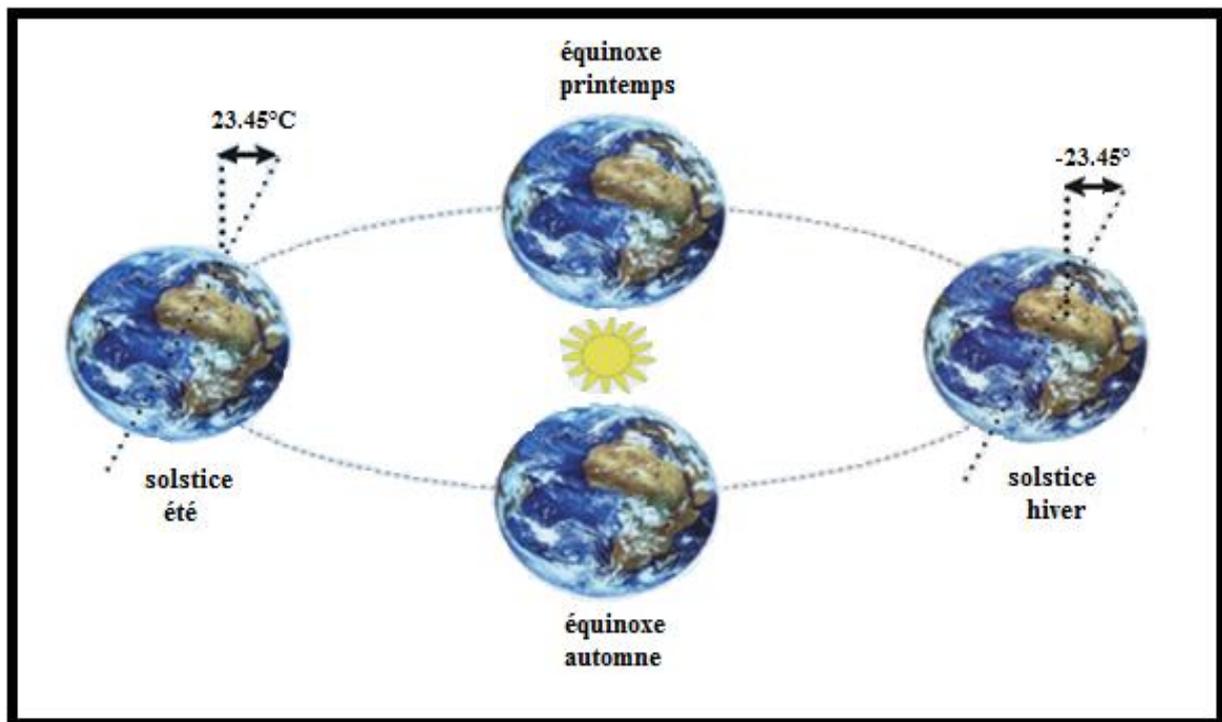


Figure I-1 : Mouvement du globe terrestre [1]

$$\overline{OA} = \cos h \overline{OH} + \sin h \overline{OZ} \quad (\text{I-2})$$

En projetant cette expression vectorielle dans le repère orthogonal (O, X, Y, Z) correspondant aux directions (ouest sud zénith) et en se rappelant que la sphère céleste est une sphère unité on obtient :

$$\overline{OA} = \cos h \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{pmatrix} + \sin h \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos h \sin \alpha \\ \cos h \cos \alpha \\ \sin h \end{pmatrix} \quad (\text{I-3})$$

On a d'autre part (plan de l'équateur) :

$$\overline{OA} = \cos \omega \cdot \overline{OK} + \sin \omega \cdot \overline{OW} \quad (\text{I-4})$$

Ce qui peut s'écrire dans le repère (O, X, Y, Z)

$$\overline{OT} = \cos \omega \begin{pmatrix} 0 \\ \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix} + \sin \omega \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \omega \\ \cos \omega \sin \varphi \\ \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (\text{I-5})$$

Le vecteur \overline{OP} ses coordonnées dans le repère (O, X, Y, Z) sont :

$$\overline{OP} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (\text{I-6})$$

En projetant dans le repère (O, X, Y, Z) la première expression du vecteur \overline{OA} écrit plus haut, on obtient :

$$\begin{pmatrix} \sin \alpha \cos h \\ \cos h \cos \alpha \\ \sin h \end{pmatrix} = \cos \delta \begin{pmatrix} \omega \\ \sin \varphi \cos \omega \\ \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix} + \sin \delta \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (\text{I-7})$$

On peut alors écrire trois expressions scalaires appelées formules de Gauss.

Reliant entre elles les quatre coordonnées célestes α , ω , h et δ pour une latitude φ donnée :

$$\cos h \sin \alpha = \cos \delta \sin \omega \quad (\text{a})$$

$$\sin h = \cos \delta \cos \omega \cos \varphi + \sin \varphi \sin \delta \quad (\text{b}) \quad (\text{I-8})$$

$$\cos h \cos \alpha = \cos \delta \cos \omega \cos \varphi - \sin \delta \cos \varphi \quad (\text{c})$$

A partir de l'équation (b) on détermine l'angle horaire du lever et du coucher du soleil $\omega_{L/C}$

Au lever du soleil h est nul donc :

$$\cos \omega_L \cos \varphi \cos \delta + \sin \delta \sin \varphi = 0$$

$$\cos \omega_L = -\frac{\sin \delta \sin \varphi}{\cos \varphi \cos \delta}$$

$$\omega_L = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \varphi) \quad (\text{I-9})$$

Et à partir de l'équation (a) on peut déterminer l'azimut α :

$$\cos h \sin \alpha = \cos \delta \sin \omega$$

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h}$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h}\right) \quad (\text{I-10})$$

I.4.1- Coordonnées géographiques terrestres

Un point sur la surface de la terre est repéré par ces coordonnées :

- **La latitude (φ)**

Une latitude donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie entre 0 et 90°, positivement vers le pôle Nord et négativement vers le pôle Sud.

- **La longitude (L)**

La longitude d'un lieu donné est l'angle formé par le méridien de ce lieu avec le méridien d'origine (méridien de Greenwich) ; elle est comptée de 0° à 180°, positivement vers l'est et négativement vers l'ouest.

- **L'altitude**

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre (m).

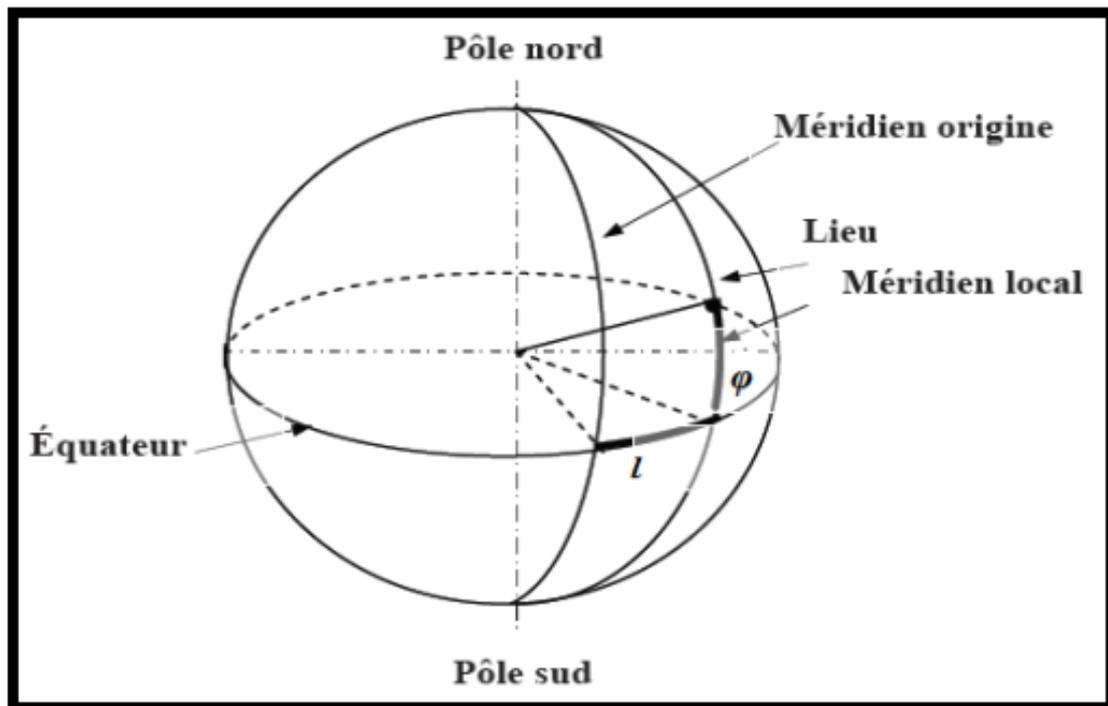


Figure I-3 : les coordonnées géographiques terrestres [2]

I.4.2- Coordonnées horaires

Les coordonnées horaires sont liées à l'heure de l'observation et n'ont aucune relation avec la position d'un observateur sur la terre. Elles ont comme plan de référence, le plan de l'équateur. Les coordonnées horaires sont au nombre de deux :

- La déclinaison du soleil (δ)

La déclinaison est l'angle que fait la direction d'observation du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Elle est exprimée en degrés ($^{\circ}$), minute ($'$) et seconde ($''$) d'arc. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. En considérant la déclinaison δ comme constante sur une journée, l'équation de Copernic fournit la relation qui relie ces deux grandeurs.

$$\delta = 23.45 \left[\sin \frac{2\pi(284+d)}{365} \right] \quad (I-11)$$

d : est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

La déclinaison solaire varie de -23.45° au solstice d'hiver à 23.45° au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes, et cette variation entraîne des variations de la hauteur du soleil pour un même site.

En Juin, l'hémisphère Nord se trouve rapprochée du soleil. Le soleil est plus haut sur l'horizon pour une même heure et la durée du jour est plus grande. L'irradiation journalière est ainsi automatiquement augmentée par rapport au solstice d'hiver, en décembre.

jour	JANV	FEV	MARS	AVRI	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
1	-23.01°	-17.52°	-8.29°	4.02°	14.90°	22.04	23.12°	17.91°	7.72°	- 4.21°	-15.36°	-22.10°
2	-22.93°	-17.25°	-7.91°	4.41°	15.21°	22.17°	23.05°	17.65°	7.34°	- 4.61°	-15.66°	-22.24°
3	-22.84°	-16.97°	-7.53°	4.81°	15.52°	22.30°	22.97°	17.38°	6.96°	- 5.01°	-15.96°	-22.36°
4	-22.75°	-16.69°	-7.15°	5.20°	15.82°	22.42°	22.89°	17.11°	6.57°	- 5.40°	-16.26°	-22.48°
5	-22.65°	-16.40°	-6.76°	5.60°	16.11°	22.54°	22.80°	16.83°	6.18°	- 5.79°	-16.55°	-22.59°
6	-22.54°	-16.11°	-6.38°	5.99°	16.40°	22.65°	22.70°	16.55°	5.79°	- 6.18°	-16.82°	-22.70°
7	-22.42°	-15.82°	-5.99°	6.38°	16.69°	22.75°	22.59°	16.26°	5.40°	- 6.57°	-17.10°	-22.80°
8	-22.30°	-15.52°	-5.60°	6.76°	16.97°	22.84°	22.48°	15.96°	5.02°	- 6.96°	-17.38°	-22.89°
9	-22.17°	-15.21°	-5.20°	7.15°	17.25°	23.93°	22.36°	15.67°	4.61°	- 7.34°	-17.65°	-22.97°
10	-22.04°	-14.90°	-4.81°	7.53°	17.52°	23.01°	22.24°	15.36°	4.21°	- 7.72°	-17.91°	-23.05°
11	-21.90°	-14.59°	-4.41°	7.91°	17.78°	23.09°	22.11°	15.06°	3.82°	- 8.10°	-18.17°	-23.12°
12	-21.75°	-14.27°	-4.02°	8.29°	18.04°	23.15°	21.97°	14.74°	3.42°	- 8.48°	-18.42°	-23.18°
13	-21.60°	-13.95°	-3.62°	8.67°	18.30°	23.21°	21.82°	14.43°	3.02°	- 8.86°	-18.67°	-23.24°
14	-21.44°	-13.62°	-3.22°	9.04°	18.55°	23.27°	21.67°	14.11°	2.62°	- 9.23°	-18.91°	-23.29°
15	-21.27°	-13.29°	-2.82°	9.41°	18.79°	23.31°	21.52°	13.78°	2.22°	- 9.60°	-19.15°	-23.33°
16	-21.09°	-12.95°	-2.42°	9.78°	19.03°	23.35°	21.35°	13.45°	1.81°	- 9.97°	-19.38°	-23.37°
17	-20.92°	-12.62°	-2.02°	10.15°	19.26°	23.39°	21.18°	13.12°	1.41°	-10.33°	-19.60°	-23.40°

18	-20.73°	-12.27°	-1.61°	10.51°	19.49°	23.41°	21.01°	12.79°	1.01°	-10.69°	-19.82°	-23.42°
19	-20.54°	-11.93°	-1.21°	10.87°	19.71°	23.43°	20.82°	12.45°	0.61°	-11.05°	-20.03°	-23.43°
20	-20.34°	-11.58°	-0.81°	11.23°	19.93°	23.44°	20.64°	12.10°	0.20°	-11.40°	-20.24°	-23.44
21	-20.14°	-11.23°	-0.40°	11.58°	20.14°	23.45°	20.44°	11.75°	-0.20°	-11.75°	-20.44°	-23.45°
22	-19.93°	-10.87°	0.00°	11.93°	20.34°	23.44°	20.24°	11.40°	-0.61°	-12.10°	-20.64°	-23.44°
23	-19.71°	-10.51°	0.40°	12.27°	20.54°	23.43°	20.03°	11.05°	-1.01°	-12.45°	-20.82°	-23.43°
24	-19.49°	-10.15°	0.81°	12.62°	20.73°	23.42°	19.82°	10.69°	-1.41°	-12.79°	-21.01°	-23.41°
25	-19.26°	-9.78°	1.21°	12.95°	20.92°	23.40°	19.60°	10.33°	-1.81°	-13.12°	-20.18°	-23.39°
26	-19.03°	-9.41°	1.61°	13.29°	21.10°	23.37°	19.38°	9.97°	-2.22°	-13.45°	-21.35°	-23.35°
27	-18.79°	-9.04°	2.02°	13.62°	21.27°	23.33°	19.15°	9.60°	-2.62°	-13.78°	-21.51°	-23.31°
28	-18.55°	-8.67°	2.42°	13.95°	21.44°	23.29°	18.91°	9.22°	-3.02°	-14.11°	-21.67°	-23.27°
29	-18.30°		2.82°	14.27°	21.60°	23.24°	18.67°	8.86°	-3.42°	-14.43°	-21.82°	-23.21°
30	-18.04°		3.22°	14.59°	21.75°	23.18°	18.42°	8.48°	-3.82°	-14.74°	-21.97°	-23.15°
31	-17.78°		3.62°		21.90°		18.17°	8.10°		-15.06°		-23.08°

- **Tableau 1 : Récapitulatif de la déclinaison solaire au cours de l'année**

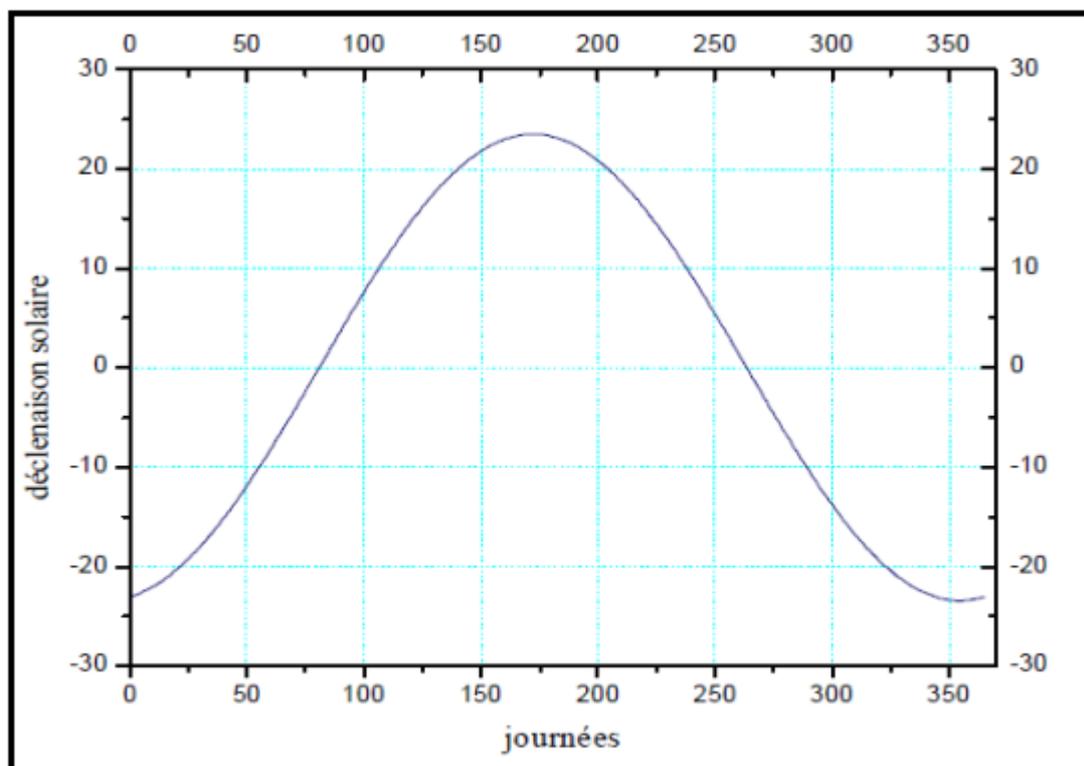


Figure I-4 : La déclinaison solaire en fonction du jour [8]

- **Angle horaire du soleil (ω)**

L'angle horaire est l'angle ou l'arc compté sur l'équateur dans le sens rétrograde à partir du plan vertical du lieu passant par le Sud jusqu'au plan méridien passant par le centre du soleil. Il mesure la course du soleil dans le ciel. L'angle horaire définit le temps solaire vrai *TSV* ; il

est midi TSV si $\omega = 0$. Exprimé en degrés d'angle, sa valeur est nulle à midi solaire, elle est négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure (un tour de 360° en 24 heures). L'angle horaire ω ($^\circ$) est donné par la formule suivante :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (I-12)$$

TSV est le temps solaire vrai en heure, se calcule par l'équation suivante :

$$TSV = TL - \Delta + \frac{4L+ET}{60} \quad (I-13)$$

ET : est une correction de temps en minute.

$$ET = -(0.002 - 0.4197 \cos w' + 3.2265 \cos 2w' + 0.0903 \cos 3w' + 7.3509 \sin w' + 9.3912 \sin 2w' + 0.3361 \sin w') \quad (I-14)$$

$$w' = \frac{360}{366} \quad (\text{En degré})$$

L : Longitude du lieu exprimée en degré

TL : Le temps légal du lieu.

Δ : L'heure administratif (pour l'Algérie : GMT+1)

La formule (I-12) n'est pas valable pour les heures de lever et de coucher du soleil. Il faut ainsi déterminer l'angle solaire au coucher, et au lever qui dépendent de la déclinaison et de la latitude du lieu.

$$\omega_L = -\sin^{-1}(\tan \delta \tan \varphi) \quad (I-15)$$

Pour l'angle horaire au coucher du soleil est tout simplement l'opposé de l'angle horaire au lever.

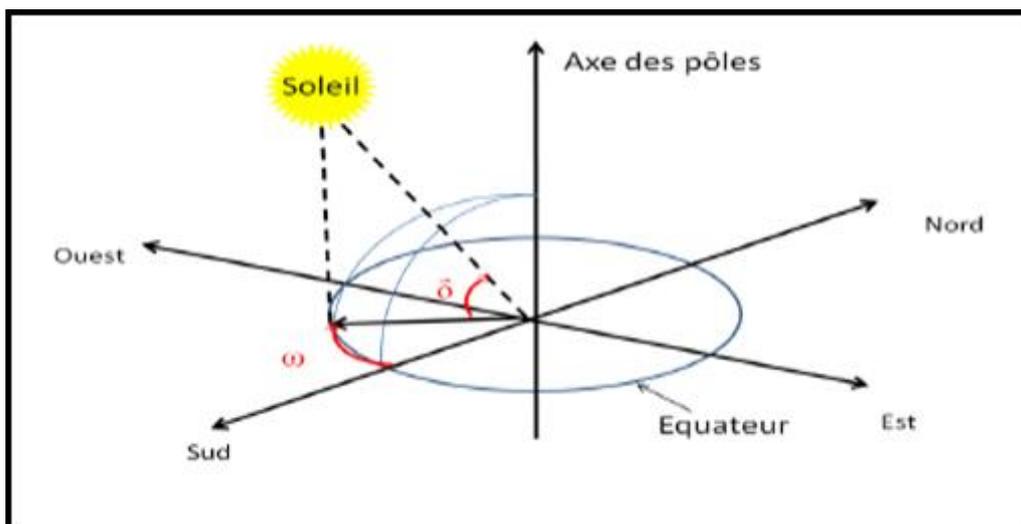


Figure I-5 : Coordonnées horaires (équatoriales)

I.4.3- Les coordonnées horizontales

Les coordonnées horizontales dépendent du lieu d'observation. Elles ont comme plan de référence le plan horizontal, perpendiculaire à la verticale du lieu. Un objet est repéré dans ce système de coordonnées par ces composantes:

- La hauteur du soleil (h)

La hauteur angulaire du soleil, communément appelée hauteur du soleil ou élévation du soleil, est l'angle compris entre la direction apparente du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu considéré. Sa valeur est nulle au lever ou au coucher du soleil et maximale lorsque le soleil est à son zénith.

Elle varie au cours de la journée en fonction de la déclinaison δ de l'angle horaire ω , et de la latitude φ . De façon telle que :

$$\sin h = \cos \delta \cos \omega \cos \varphi + \sin \varphi \sin \delta \quad (\text{I-16})$$

Il s'agit de la formule fondamentale, permettant de connaître, quels que soient le jour, l'heure et le lieu, la hauteur du soleil sur l'horizon. La hauteur maximale du soleil (à midi solaire) :

$$h_{max} = \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta \quad (\text{I-17})$$

Il faut noter que la hauteur du soleil intervient fortement sur la valeur de l'éclairement solaire.

- L'azimut du soleil (α)

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction Sud ou Nord. Il est mesuré commençant par le Nord ou par le Sud, soit vers l'Est soit vers l'Ouest, à travers un axe de 360° (l'azimut est compris entre $-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$).

Dans l'hémisphère Nord, l'origine des azimuts correspond à la direction du sud. L'angle azimutal est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \right) \quad (\text{I-18})$$

- L'angle zénithal (θ_z)

C'est l'angle entre le zénith local et la ligne joignant l'observateur et le soleil. Il varie de 0 à 90° .

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\varphi) \quad (\text{I-19})$$

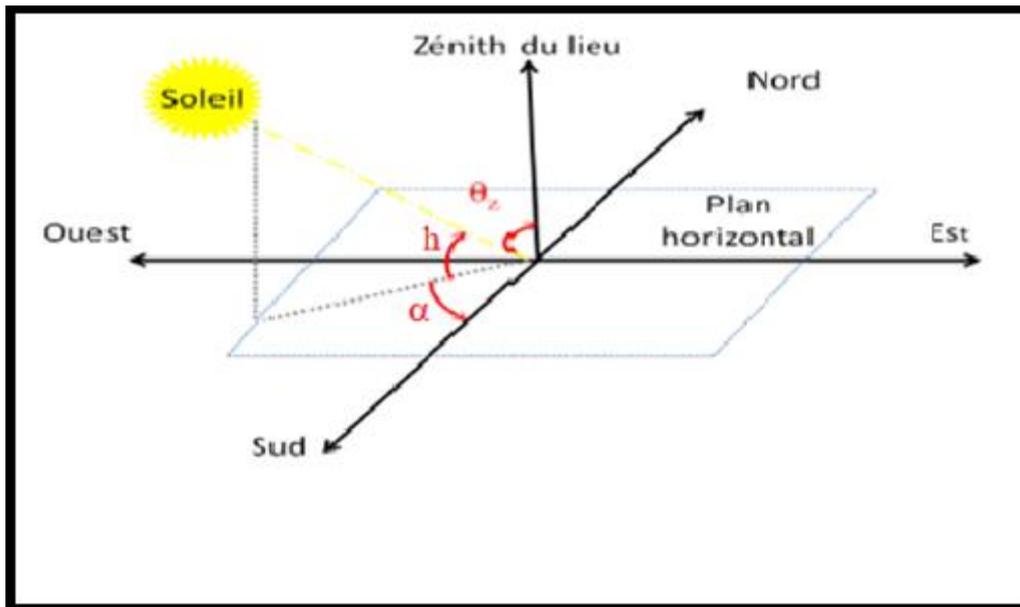


Figure I-6: les coordonnées horizontales

- Angle incidence (θ) :

C'est l'angle formé par la normale du plan et les rayons du soleil.

$$\cos(\theta) = \sin(h) \cos(i) + \cos(h) \sin(i) \cos(\alpha - \gamma) \quad (\text{I-20})$$

γ : L'orientation du capteur (plain sud = 0)

i : l'inclinaison du capteur.

I.4- La durée d'insolation

La durée d'insolation correspond à la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct reçu sur un plan normal dépasse un seuil fixé par convention à 120 W.m^{-2} . En absence permanente de nuages, la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour, qui s'appelle aussi durée astronomique ou théorique du jour. Elle est définie par :

$$S_0 = \frac{2\omega_c}{15} \quad (\text{I-21})$$

Avec :

ω_c : L'angle horaire au coucher de soleil ($^\circ$)

S_0 : Durée du jour (h).

I.6- Rayonnement solaire

Le soleil émet en permanence, dans toutes les directions de l'espace, des rayonnements électromagnétiques composés de «grains» de lumière appelés photons. Ces rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière C ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère. L'énergie, E_{ph} , de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ

I.6.1- Rayonnement extraterrestre

Le rayonnement solaire extraterrestre couvre un très large domaine de longueur d'ondes. Il ne dépend d'aucun paramètre météorologique, mais il est fonction de quelques paramètres astronomiques et géographique tels que : la latitude du lieu (φ), la déclinaison solaire (δ), et l'angle horaire au coucher du soleil (ω_0). Sur une surface horizontale, et pour le jour n , le rayonnement extraterrestre G_0 ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$) est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$G_0 = \frac{60 \cdot 24}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0.034 \cos\left(\frac{2\pi d}{365}\right) \right] [\omega_L \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_L)] \quad (\text{I-22})$$

G_{sc} : est la constante solaire égale à $0,082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{mn}^{-1}$.

d : est le numéro du jour à partir du premier Janvier.

I.6.2- Rayonnement solaire en atmosphère terrestre

Le rayonnement reçu sur l'atmosphère terrestre n'occupe qu'une faible portion du spectre d'ondes électromagnétiques solaires. Il est caractérisé par des longueurs d'ondes comprises entre $0,2$ et $2,5 \mu\text{m}$. Il inclut le domaine du visible (ondes lumineuses de $0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$).

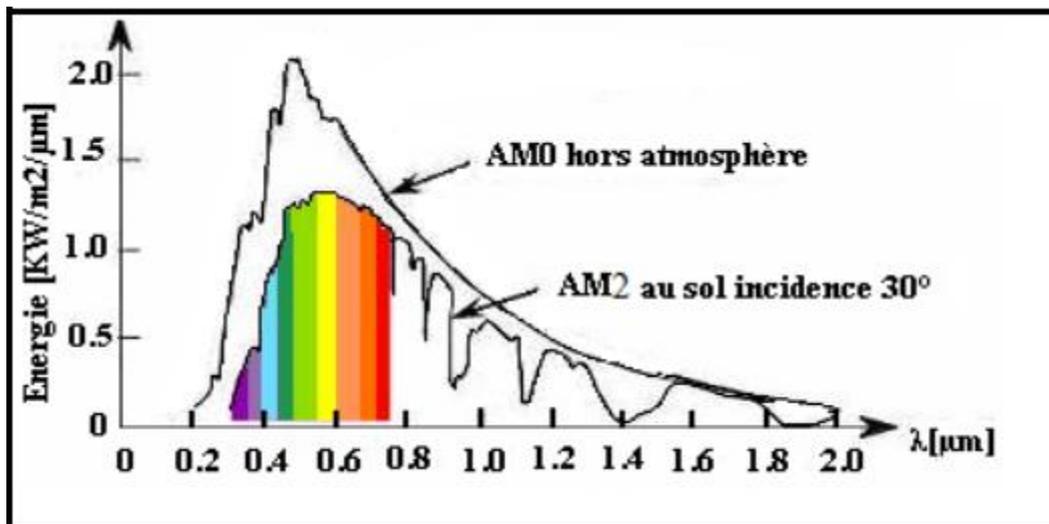


Figure I-7 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [17]

I.6.3- Indice de clarté

Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté. L'indice de clarté, K_T , est défini par :

$$K_T = \frac{G}{G_0} \quad (\text{I-23})$$

Où G est l'irradiation solaire reçue sur un plan horizontal.

La moyenne mensuelle de l'indice de clarté K_T varie selon les endroits et les saisons et varie généralement entre $0,3$ (pour des régions ou des saisons pluvieuses) et $0,8$ (pour des saisons ou des climats secs et ensoleillés).

I.7- La constante solaire :

La constante solaire exprime le flux énergétique moyen reçu par une surface unité placée orthogonalement aux rayons solaires au sommet de l'atmosphère terrestre. Cette valeur est soumise à des variations de quelques watts selon deux modes : une variabilité à long terme (période de 33 millions d'années) due au mouvement du système solaire dans la voie lactée et une variabilité à très court terme (un jour à quelques années) due à l'activité solaire.

Dans notre cas, la valeur moyenne qui a été retenue est $I_m = 1370 \text{ W/m}^2$. Par contre, la puissance solaire I_0 interceptée au sommet de l'atmosphère est variable au cours de l'année puisque la distance Terre-Soleil est elle-même variable en raison de la trajectoire elliptique de la Terre dans sa course autour du Soleil.

On appelle correction de distance la quantité suivante :

$$C_{t,s} = 1 + 0.034 \cos\left[\left(\frac{360}{365}\right)(d - 2)\right] \quad (\text{I-24})$$

La puissance I_0 est calculée à partir de la constante solaire corrigée :

$$I_0 = I_m * C_{t,s} \quad (\text{I-25})$$

Nous avons tracé dans la figure ci-dessous, le graphe de son évolution journalière dans l'année.

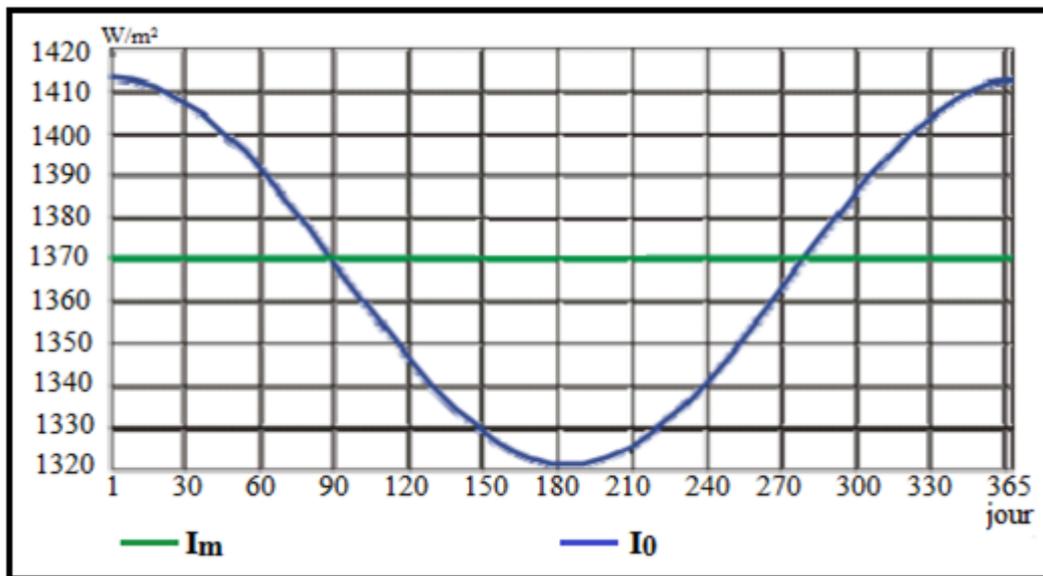


Figure I-8 : Evolution annuelle de la constante solaire [10]

I.8- Notions générales sur le rayonnement solaire au sol

I.8.1-Rayonnement solaire arrivant au sol :

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. En dehors de l'atmosphère terrestre, il donne un éclairement énergétique à peu près constant et égal à 1370 W/m^2 , appelé de ce fait constante solaire.

Ce rayonnement arrivant sur la Terre subit une altération lors de la traversée de l'atmosphère, et seulement une partie de cette énergie est disponible au sol. Cette énergie se décompose en deux parties principales :

Le rayonnement solaire direct (I^*) et le rayonnement solaire diffus (D^*). La somme de ces deux rayonnements est appelée rayonnement solaire global (G^*).

Puissance et énergie reçues par un récepteur plan :

La puissance ou l'énergie reçue par une surface est tributaire de plusieurs facteurs selon son orientation et son inclinaison. En revanche, elle se compose des mêmes éléments de base que sont les quantités directe, diffuse et réfléchie :

Les grandeurs directes : Reçues directement du soleil en traversant l'atmosphère sans qu'elles ne soient restituées ou réfléchies :

S_{dir} : Puissance reçue directe [W/m^2]

H_{dir} : Energie reçue directe [J/m^2]

Les grandeurs diffusées : Les nuages, les aérosols diffusent en partie le rayonnement.

S_{dif} : Puissance diffuse reçue [W/m^2]

H_{dif} : Energie diffuse reçue [J/m^2]

Les grandeurs réfléchies : Ce sont les quantités réfléchies par l'entourage du capteur ; les plus prépondérantes sont dues au sol (albédo) et au ciel :

S_{ref} : Puissance réfléchie reçue par la surface de captation inclinée [W/m^2]

H_{ref} : Energie réfléchie reçue par la surface de captation inclinée [J/m^2]

I.8.1.1- Rayonnement direct

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

Il y a deux types :

a- L'éclairement direct S_{dir}

- **Pour un plan horizontal :**

$$S_{dir} = I^* \sin(h) \quad (I-26)$$

$$I^* = 1370 \exp - \left[\frac{T_r}{0.9 + 9.4 \sin(h)} \right]$$

$$T_r = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1 + 2\beta) \ln(P_v)$$

$$\beta \text{ Est le coefficient de trouble atmosphérique } \left\{ \begin{array}{l} 0.05 \text{ zone rurale} \\ 0.1 \text{ zone urbaine} \\ 0.2 \text{ zone industrielle} \end{array} \right.$$

P_v : Pression de vapeur (mm Hg)

- **Pour une surface inclinée :**

$$S_{dir}(\gamma, i) = I \cos \theta \quad (I-27)$$

- b- Irradiation direct :**

$$H_{dir} = \int_l^c I_{dir} dt \quad (I-28)$$

I.8.1.2- Rayonnement diffus

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

- a- L'éclairement diffus S_{dif}**

- **pour une surface horizontale**

$$S_{dif} = [54.8 \sin h][T_r - 0.5 - \sqrt{\sin h}] \quad (I-29)$$

- **Pour un plan incliné :**

$$S_{dif}(i, \gamma) = \frac{1 + \cos i}{2} S_{dif} \quad (I-30)$$

- b -Irradiation diffuse H_{dif}**

$$H_{dif} = \int_l^c I_{dif} dt \quad (I-31)$$

I.8.1.3- Rayonnement réfléchi: C'est la partie réfléchi par le sol.

- **Pour un plan horizontal :** $R = 0$
- **Pour un plan incliné :**

$$R(i, \gamma) = (S_{dir} + S_{dif})\rho\left(\frac{1 + \cos i}{2}\right) \quad (I-32)$$

ρ (Albédo) : facteur de réflexion du sol.

I.8.1.4- Rayonnement global : C'est la somme des trois types de rayonnements, le direct, le diffus et l'albédo (réfléchi par le sol).

Pour un plan horizontal : $G^* = S_{dir} + S_{dif}$

Pour un plan incliné : $G^* = S_{dir} + S_{dif} + R$

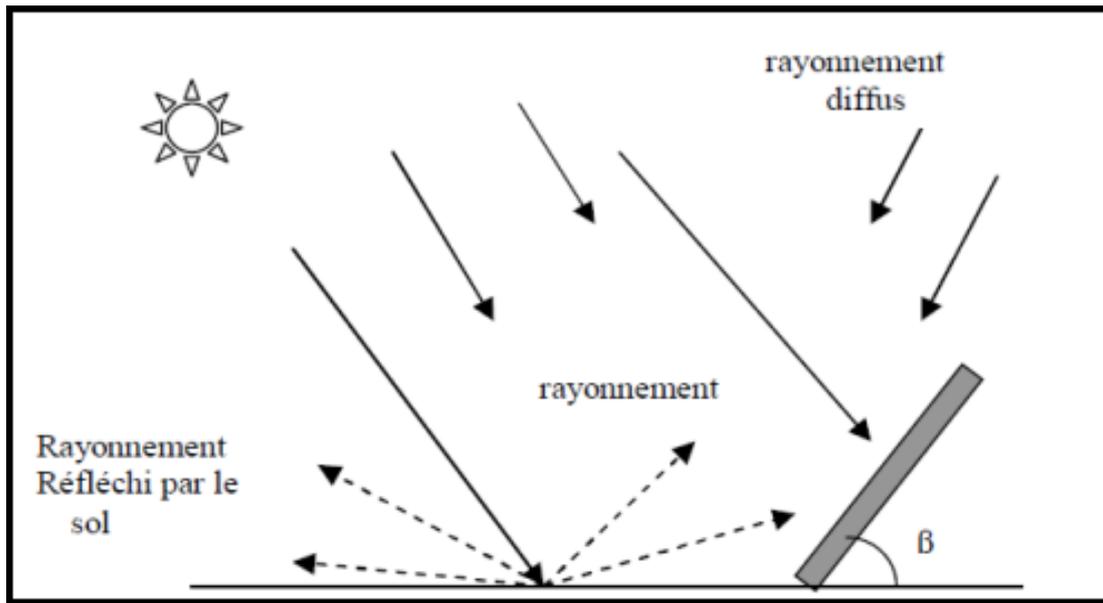


Figure I-9 : Composantes du rayonnement global sur une surface inclinée [8]

I.9- Rayonnement solaire en Algérie :

L'Algérie possède un gisement solaire important, de par son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1 kW/m².

L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de Juillet) dépasse les **6 kWh/m²/jour** et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de **2500 kWh/m²/an**

La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques du monde.

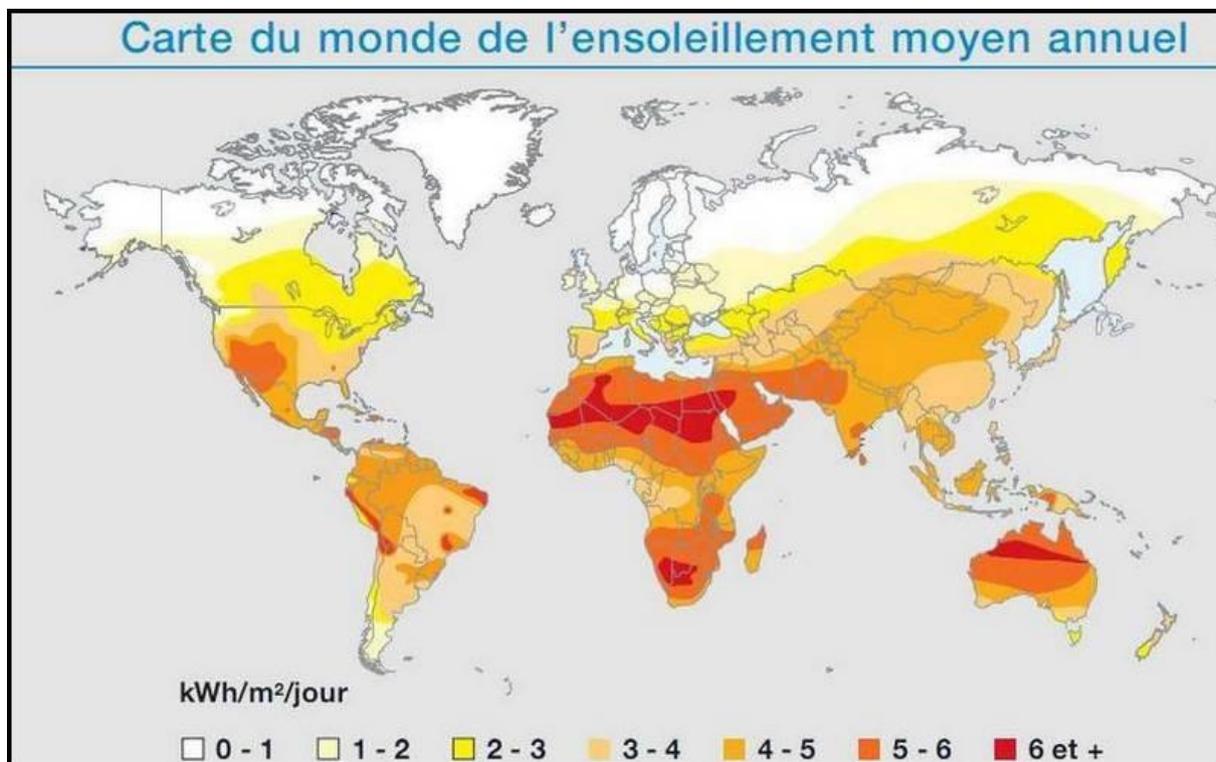


Figure I-10 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [1]

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle, et en moyenne mensuelle est donnée par les figures ci-dessous. Elles présentent les différents niveaux énergétiques qui donnent ainsi un découpage du pays en régions iso-énergétiques.

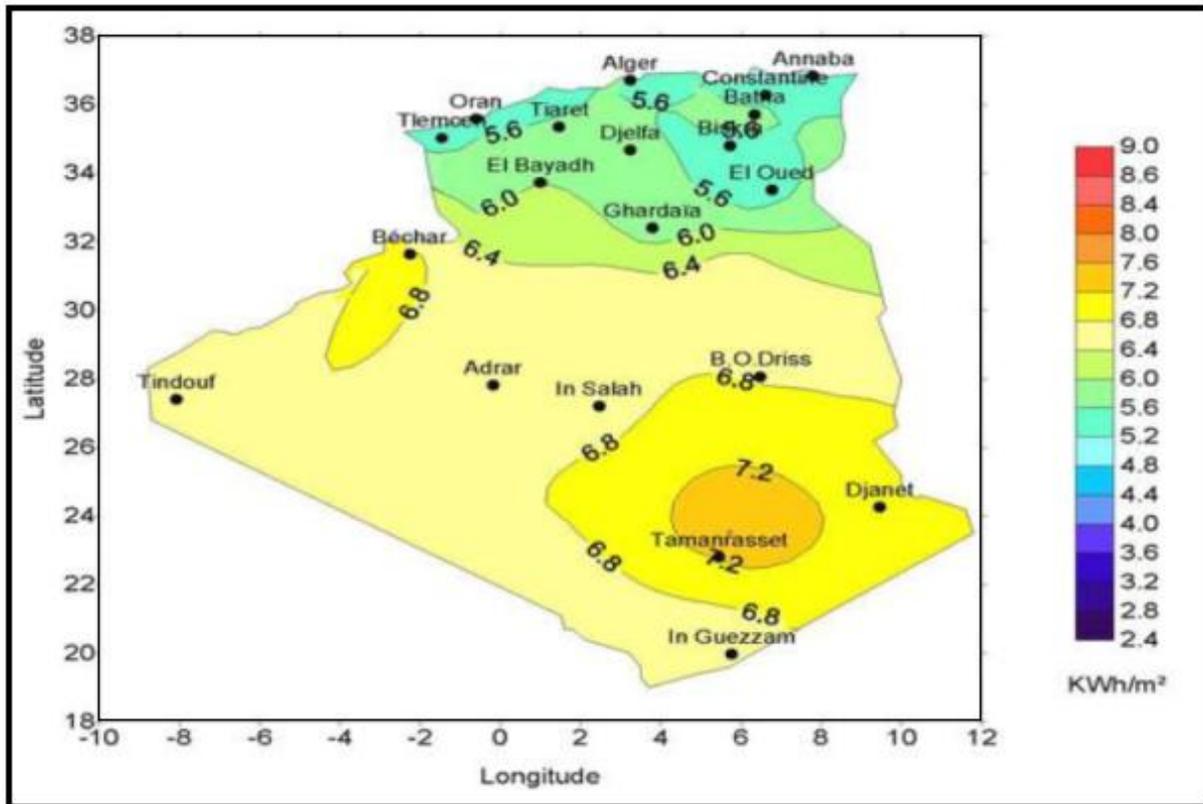


Figure I-11 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [31]

Conclusion :

D'après les cartes représentées ci-dessus, on constate que le nord d'Algérie bénéficie d'un rayonnement solaire prometteur pour les applications solaires à basse température (le cuiseur solaire par exemple).

Chapitre II : Généralités sur les cuiseurs solaires

Introduction

Il est connu que, partout dans le monde, la cuisson est une nécessité majeure pour les gens et elle représente une part importante de la consommation d'énergie. Cependant, il existe une forme d'énergie qui est toujours disponible et en quantité abondante dans bon nombre de pays, c'est l'énergie solaire.

Lorsqu'on parle d'énergie solaire, le débat tourne inévitablement soit autour du photovoltaïque (faire de l'électricité solaire) soit autour du solaire thermique (pour le chauffage de l'eau).

Aujourd'hui, bien peu de personnes savent qu'il est également possible de faire cuire ses aliments avec de l'énergie provenant directement du soleil, et ce pour beaucoup moins cher qu'une installation solaire habituelle.

II.1- Définition

Les cuiseurs solaires sont des dispositifs permettant de faire la cuisine sans aucune autre source d'énergie (bois ou énergie fossile) mais uniquement avec l'énergie solaire. Ils représentent une solution de choix, surtout dans les pays pauvres en ressources énergétiques conventionnelles.

L'énergie étant inépuisable et renouvelable, le cuiseur solaire va notamment permettre de solutionner les problèmes de bois dans les pays entièrement privés de ressources végétales et permettre également de faire la cuisine avec un impact environnemental nul. Seul problème, en absence du soleil et en fin de journée ces cuiseurs ne peuvent pas être utilisés.

II.2- Historique

La cuisson solaire est loin d'être moderne. En effet le cuiseur solaire a été pour la première fois inventé par le chercheur Suisse Horace-Bénédict de Saussure en 1767. Il a réussi à cuire des fruits dans un boîtier vitré. Par la suite un physicien français Augustin Bernard Mouchot, a décrit un cuiseur solaire dans son livre "La Chaleur Solaire" édité à Paris, en 1869 puis il invente le premier cuiseur solaire parabolique en 1877. W. Adams, un officier de l'armée britannique, a conçu un cuiseur solaire en Inde en 1878 consistant en un four octogonal, entouré de miroirs en verre pour concentrer la lumière du soleil et la diriger vers le four. Adams a rapporté qu'il a préparé dans son cuiseur les rations de sept soldats en deux heures, au mois de janvier. Cependant, l'idée du développement des cuiseurs solaires fut par la suite assez vite abandonnée, principalement pour des raisons d'encombrements et de faibles rendements.

Dans les années cinquante du siècle passé et par nécessité, il y a eu une reprise d'intérêt pour la cuisson solaire, surtout en Inde et en Chine. En Inde, le développement de la cuisson solaire a persisté pendant une longue période; la construction de cuiseurs solaires y était même subventionnée par l'état pendant un certain temps.

Après la crise du pétrole des années 70, les pays industrialisés se sont intéressés de nouveau à la cuisson solaire et ont intensifié les investigations fondamentales pour l'amélioration et le développement effectif de ce mode de cuisson.

En 1980, un mouvement s'est formé aux Etats Unis autour de Barbara Kerr qui est un pionnier de la cuisson solaire en Arizona et qui a développé un kit facilitant aux gens la construction de leur propre cuiseur solaire.

Ce mouvement s'est soldé par la création de l'organisation internationale "Solar Cookers International (SCI)" qui est devenu un forum pour les promoteurs de la cuisson solaire dans le monde. Actuellement, la cuisson solaire est très répandue à travers le monde, surtout dans les régions isolées, pauvres et en voie de développement où plusieurs organisations internationales entretiennent des programmes d'aide et de promotion de la cuisson solaire au profit des populations locales. Plusieurs modèles de cuiseurs solaires ont été construits et distribués dans le monde rural à travers la planète. En Afrique et dans la région subsaharienne, la vulgarisation de la cuisson solaire est soutenue par plusieurs organisations gouvernementales et non gouvernementales pour la lutte contre la déforestation et afin de répondre aux besoins des populations des régions dépourvues des ressources énergétiques conventionnelles comme le Tchad, le Mali, le Niger, le Burkina-Faso et autres...

En Algérie, la cuisson solaire est toujours méconnue par le grand public. En 2004, l'URER/MS lance un projet qui a permis d'introduire cette activité en milieu saharien et de s'inscrire dans le répertoire international des promoteurs de la cuisson solaire ('International Directory of Solar Cooking Promoters').

Beaucoup d'efforts restent à fournir et un projet de grande envergure est nécessaire pour développer et vulgariser cette application qui peut être très bénéfique au niveau des régions isolées. En effet, le cuiseur solaire ne constitue pas une solution de substitution à la cuisinière conventionnelle qui fonctionne au bois, au gaz ou à l'électricité. Mais tout simplement l'utilisation d'un cuiseur solaire, dans notre vie quotidienne, nous fait découvrir une autre façon de préparer la nourriture moyennant une forme d'énergie qui respecte l'environnement et assure un développement durable. Cette forme d'énergie n'est issue ni d'une mine, ni d'une raffinerie ou encore d'une centrale nucléaire. Elle est gratuite et disponible en tout lieu.

Certes, la cuisson solaire est lente et ne peut être pratiquée à tout moment surtout par ciel couvert ou à la tombée de la nuit, mais elle offre une alternative non polluante à l'utilisation des énergies fossiles. En effet, un cuiseur solaire utilisé peut éviter une grande quantité de gaz à effet de serre.

II.3- Principe de fonctionnement du cuiseur solaire

Le principe de fonctionnement du cuiseur solaire est simple : il convertit le rayonnement solaire en énergie calorifique nécessaire à la cuisson des aliments. Pour cela, cela consiste à :

- diriger au maximum les rayons solaires vers le récipient de cuisson.
- les convertir en énergie calorifique
- maintenir cette chaleur en isolant les parois.

La température de cuisson d'un cuiseur solaire est atteinte quand les gains en énergie solaire viennent à égaler les pertes de chaleur vers l'extérieur. On parle d'un juste équilibre entre les gains et les pertes de chaleur.

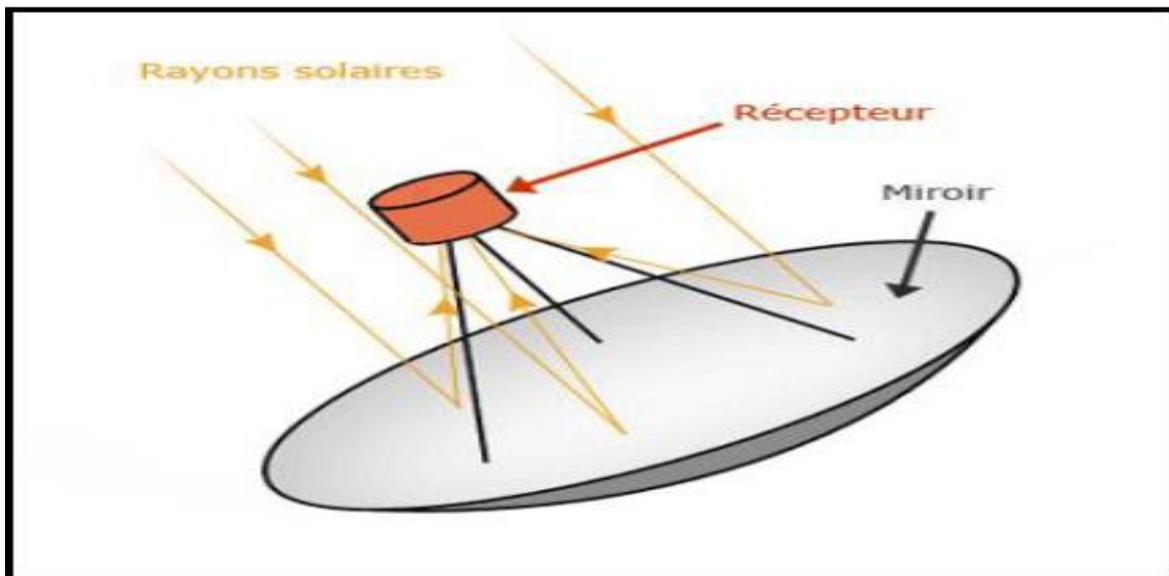


Figure II-1 : Principe de fonctionnement du cuiseur solaire

II.4- Principe de la réflexion

La réflexion d'un rayon lumineux sur une surface est depuis l'Antiquité un phénomène connu et appliqué.

II.4.1- Réflexion sur une surface plane

Considérons d'abord le cas de la réflexion d'un rayon sur une surface plane. Deux lois permettent de décrire géométriquement (donc sans tenir compte de la nature ondulatoire de la lumière) ce que devient un rayon après réflexion sur une surface plane :

Première loi : le rayon incident et la normale à la surface (droite perpendiculaire à la surface passant par le point de contact du rayon incident sur la surface) définissent un plan : le plan incident. Le rayon réfléchi appartient à ce même plan.

Deuxième loi : l'angle (appelé angle incident) entre le rayon incident et la normale est égal à l'angle (appelé angle de réflexion) entre la normale et le rayon réfléchi.

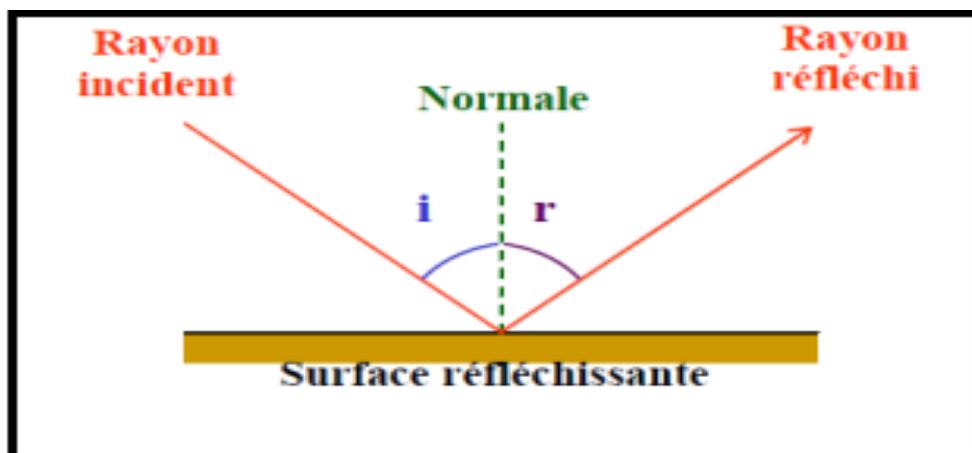


Figure II-2 : Réflexion sur une surface plane

II.5.2- Réflexion sur une surface courbe

Si la surface réfléchissante est courbe, celle-ci peut être décomposée en une multitude de plans infiniment petits. Ainsi, au point d'impact du rayon incident sur la surface réfléchissante, il faut considérer le plan tangent en ce point. On obtient ainsi la normale du plan tangent au point d'impact, et les deux lois de la réflexion sont alors d'application pour déterminer le rayon réfléchi.

Il existe deux types de miroirs courbes : les miroirs concaves et les miroirs convexes.

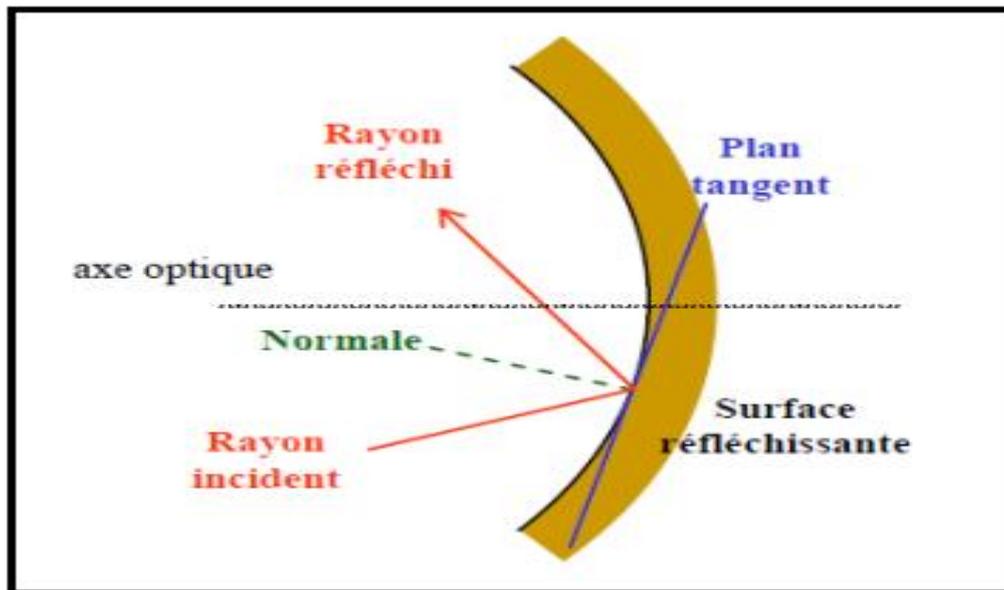


Figure II-3 : Réflexion sur une surface courbe

II.6- Les différents types de cuiseurs solaires :

Un aperçu des cuiseurs solaires dans le monde entier prouve qu'une large variété de cuiseurs a été conçue. Ces conceptions se rangent dans deux catégories principales : les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur et les cuiseurs pourvus d'un système de stockage de chaleur.

II.6.1- Les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur

Dans cette catégorie de cuiseurs, on en distingue deux types selon le mécanisme de transfert de chaleur au récipient de cuisson : les cuiseurs directs et les cuiseurs indirects. Le type direct emploie le rayonnement solaire directement dans le procédé de cuisson tandis que les cuiseurs solaires indirects emploient un fluide caloporteur pour transférer la chaleur du collecteur au récipient de cuisson.

II.6.1.1- Les cuiseurs directs :

-Type boîte

Appelé aussi four solaire, il est constitué essentiellement d'une boîte bien isolée et pourvue d'une lucarne en verre à travers laquelle les rayons du soleil peuvent pénétrer.

Pour diminuer les pertes de chaleur par convection, Il est recommandé dans certains cas d'utiliser pour les lucarnes un double vitrage. Quelquefois aussi, ces cuiseurs sont munis de réflecteurs extérieurs ou intérieurs pour augmenter la chaleur captée.

Ces appareils fonctionnent selon le principe de l'effet de serre. Les rayons solaires à courtes longueurs d'onde traversent les deux parois de verre puis se transforment en rayons thermiques à grandes longueurs d'onde en touchant les parois noires. L'énergie est emprisonnée ainsi à l'intérieur de la boîte et empêchée de s'évacuer par conduction grâce à l'isolation thermique. On peut alors y atteindre des températures assez élevées, allant jusqu'à un maximum de 170°C, pour assurer la cuisson de la nourriture contenue dans les récipients. La vitesse de cuisson dépend de la conception du cuiseur et de son efficacité thermique.



Cuiseurs solaires de type boîte :

- a) sans réflecteur ; b) avec un seul réflecteur ; c) avec deux réflecteurs ; d) avec trois réflecteurs ; e) avec quatre réflecteurs ; f) avec huit réflecteurs.

Figure II-4 : Les différents modèles du type boîte [35]

- Les cuiseurs à concentration :

Les cuiseurs solaires à concentration fonctionnent selon le principe de la concentration et de la réflexion des rayons solaires. Ils utilisent une surface réfléchissante dont la forme permet de concentrer en un même point la réverbération de l'énergie lumineuse.

De nombreux modèles existent :

- **Type parabolique :**

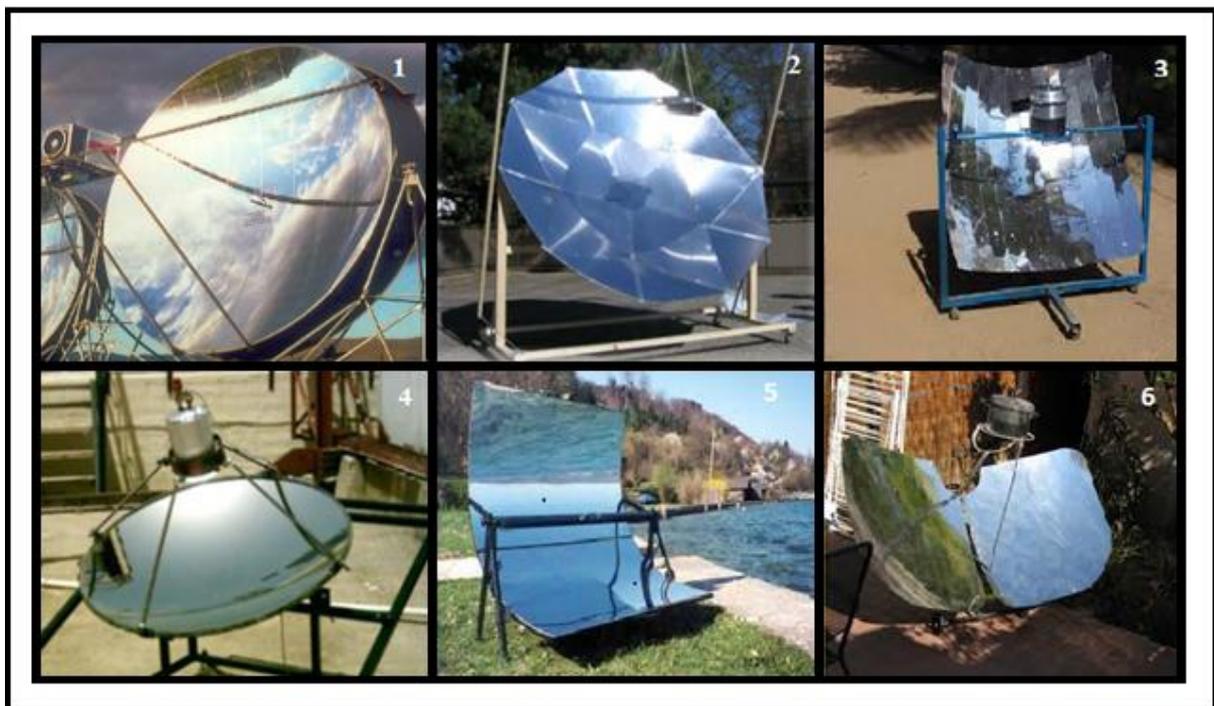
Ce sont des disques concaves qui focalisent par leurs miroirs ou leurs lames en aluminium très réfléchissantes, les rayons solaires de manière très précise sur le fait-tout. Ce dernier repose sur un dispositif prévu pour recevoir le ou les plats à cuire (selon le modèle et la grandeur des récipients). Les paraboles doivent être régulièrement réorientées pour obtenir un rendement optimum.

- **Cylindro-parabolique :**

En règle générale, le creux est aligné avec son axe focal horizontal Est-Ouest. L'aliment à cuire est disposé le long de cette ligne. L'auge est faite de sorte que son axe de symétrie pointe au soleil à midi ; cela impose au bac d'être incliné de haut en bas.

- **Type sphérique :**

Cette conception est la plus simple des concentrateurs car ils sont très faciles à réaliser et à employer ; la forme du réflecteur est sphérique et dirige la lumière le long d'une ligne perpendiculaire à la surface de la sphère. Une telle conception a été proposée pour la première fois par « Stam » en 1961. Le navire de cuisson peut être accroché au trépied pour atteindre le foyer. Voici les différents modèles de type à concentration :



1- parabolique, 2- parabolique orienté vers le haut, 3- forme carrée concave, 4- sphérique, 5- cylindro-parabolique, 6- à parois réfléchissantes en forme d'aile.

Figure II-5 : Les cuiseurs solaires à concentration [35]

- **Type à panneaux :**

Les cuiseurs à panneaux sont construits à partir de matériaux variés, suffisamment résistants et dont l'intérieur est recouvert d'une surface réfléchissante (miroir, aluminium...).

Sa configuration spatiale répond à des exigences géométriques et optiques précises de façon à permettre aux réflecteurs de bien jouer leur rôle. En effet, les réflecteurs sont orientés selon un certain angle de manière à focaliser les radiations solaires en un point où sera placé, sur une grille un récipient de couleur noire enfermé à l'intérieur d'un sac en plastique ou en verre, résistant à la chaleur qui permet de créer l'effet de serre.

Ce type de cuiseur permet de cuire une variété d'aliments et il peut atteindre 150 degré durant une journée bien ensoleillée.

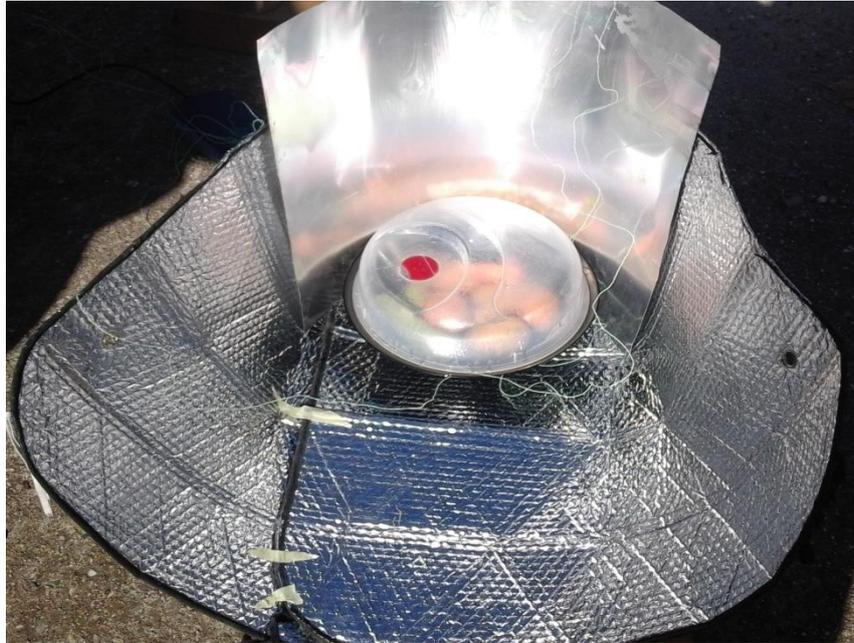
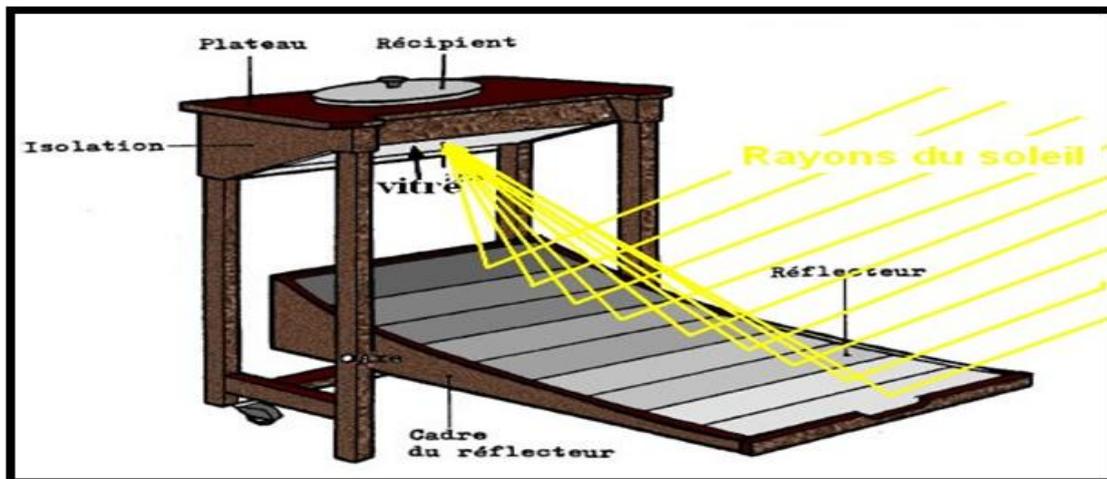


Figure II-6 : Un modèle de cuiseur solaire à panneaux

Dans le modèle représenté ci-après, les rayons solaires se réfléchissent sur les réflecteurs plans, disposés en arc de parabole, et viennent converger sur le vitrage ; la boîte isolée est inversée et le récipient de cuisson est encastré dans un trou pratiqué sur le plateau de la boîte. Les rayons solaires viennent frapper le fond noirci du récipient à cuisson. Pour mieux chauffer et réduire les temps de cuisson, les parois intérieures de la boîte sont munies de réflecteurs.



II.6.1.2- Type indirect :

Dans le type des cuiseurs solaires indirects, le récipient de cuisson reçoit indirectement de la chaleur, c'est à dire par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur. On peut distinguer trois configurations possibles :

- Cuiseur avec collecteurs solaires plans :

Ce sont des cuiseurs chauffés au moyen d'un collecteur plan et qui peuvent fonctionner en utilisant de l'huile ou de l'air comme fluide intermédiaire pour transférer la chaleur. Ces cuiseurs permettent d'accumuler de l'énergie. Leurs points faibles résident en le fait qu'ils sont volumineux, lourds, difficiles à transporter et plus chers que les autres types.

Leurs avantages sont : la facilité d'utilisation, la possibilité de poursuivre la cuisson lorsque le ciel se couvre, il n'est pas nécessaire de les réorienter continuellement, ils fonctionnent sans l'intervention de l'utilisateur en maintenant la chaleur des aliments durant de longues périodes, ils ne produisent pas d'éblouissement, ils sont stables et ils n'impliquent pas de risques de feu ou de brûlures.

Il existe aussi d'autres variétés de modèles, de type concentrateur, et qui possèdent des réflecteurs courbés et concentrent la lumière solaire en un long champ, où sera localisé l'appareil de chauffage.

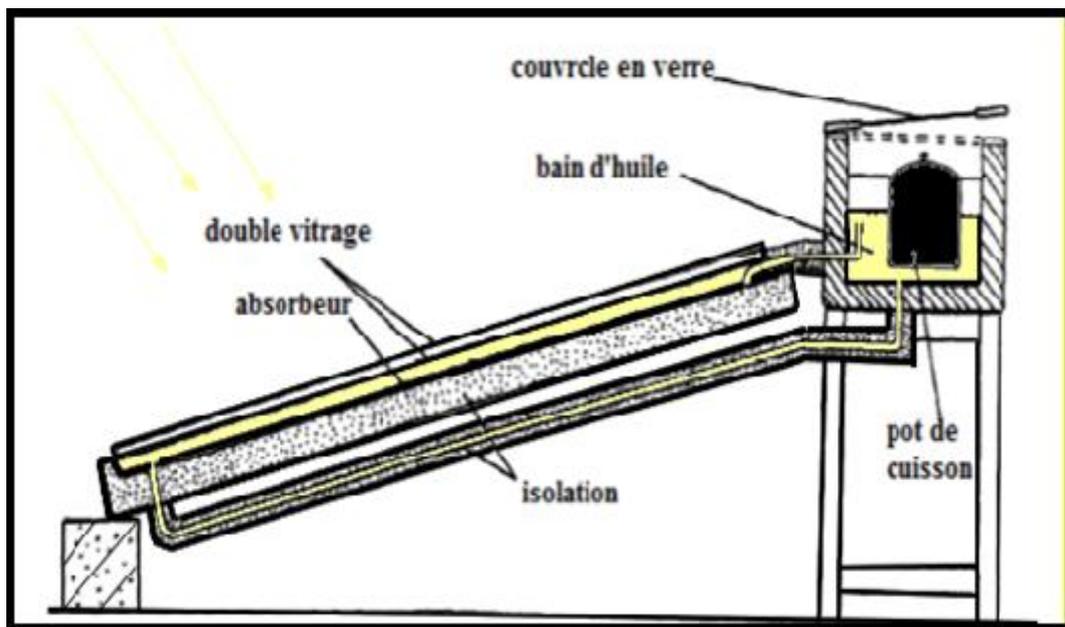


Figure II-7 : Cuiseur avec collecteurs solaires plans

- **cuiseur avec tube collecteur :**

Le collecteur est un tube central relié à la boîte isolée contenant le récipient de cuisson. Le tube contient généralement de l'huile et il est chauffé par un concentrateur (miroir cylindro-parabolique); cette huile chaude transfère alors la chaleur au navire de cuisson.

- **cuiseur avec collecteur à concentration :**

Des concentrateurs paraboliques dirigent les rayons solaires sur un système générateur de vapeur, laquelle est utilisée pour la cuisson des aliments.

Ce système de cuisson solaire a suscité un véritable succès commercial en Inde, où 106 toits surmontés de concentrateurs paraboliques génèrent de la vapeur pour cuire 30.000 repas quotidiennement, comme le montre l'image ci-dessous. La surface réfléchissante est placée de façon à focaliser les rayons solaires sur l'évaporateur, lequel est relié au récipient de cuisson placé à l'intérieur de la cuisine.

Un « bol solaire » de 15 m de diamètre, installé à Auroville en Inde, produit de la vapeur à 150 °C et permet de préparer 1000 repas quotidiennement.

II.6.2- Cuiseur solaire avec stockage de chaleur :

En vue de résoudre le problème de la cuisson en plein air ou bien de l'impossibilité de cuire les aliments après le coucher de soleil ou à cause de passages nuageux fréquents de la journée, les cuiseurs solaires sont pourvus de matériaux capables de stocker cette énergie tout au long de la journée et de la restituer au moment de la cuisson des aliments.

L'énergie thermique peut être stockée par l'augmentation de l'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente et thermo-chimique ou une combinaison de celles-ci.

I.6.2.1- Stockage de chaleur sensible :

Dans le cas de stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique stockée se traduit par l'augmentation de la température du matériau stockeur, en général un solide ou un liquide.

La figure montre le schéma d'un four utilisant de l'huile comme fluide caloporteur et du sable en tant que matériau de stockage. »

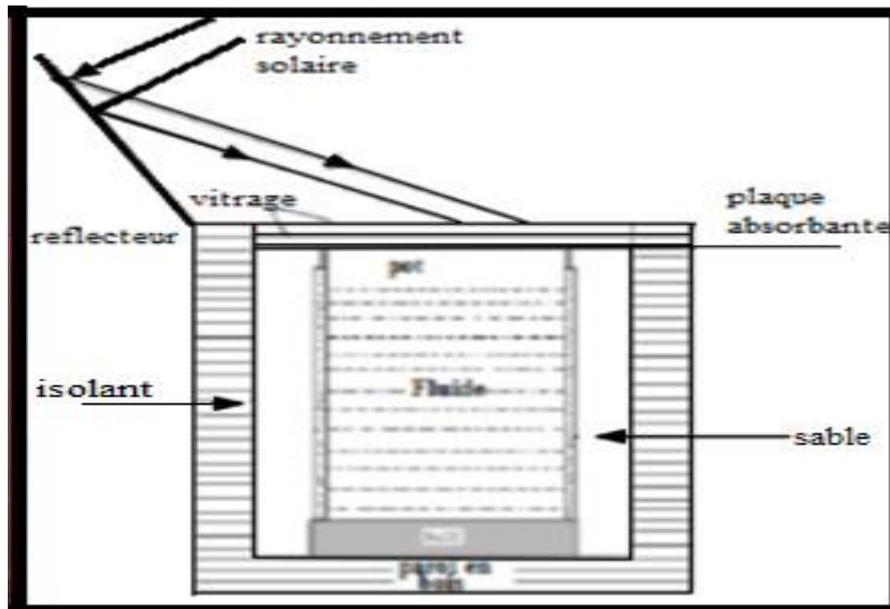


Figure II-8 : Cuiseur avec stockage de chaleur sensible [35]

II.6.2.2- Cuiseurs solaires avec stockage de chaleur latente :

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état d'un kilogramme de matière. L'utilisation d'un matériau à changement de phase (MCP) pour stocker de la chaleur sous forme de chaleur latente est intéressante car cela constitue un système de stockage compact et efficace, dû à une densité de stockage élevée et à une température de fonctionnement quasi constante.

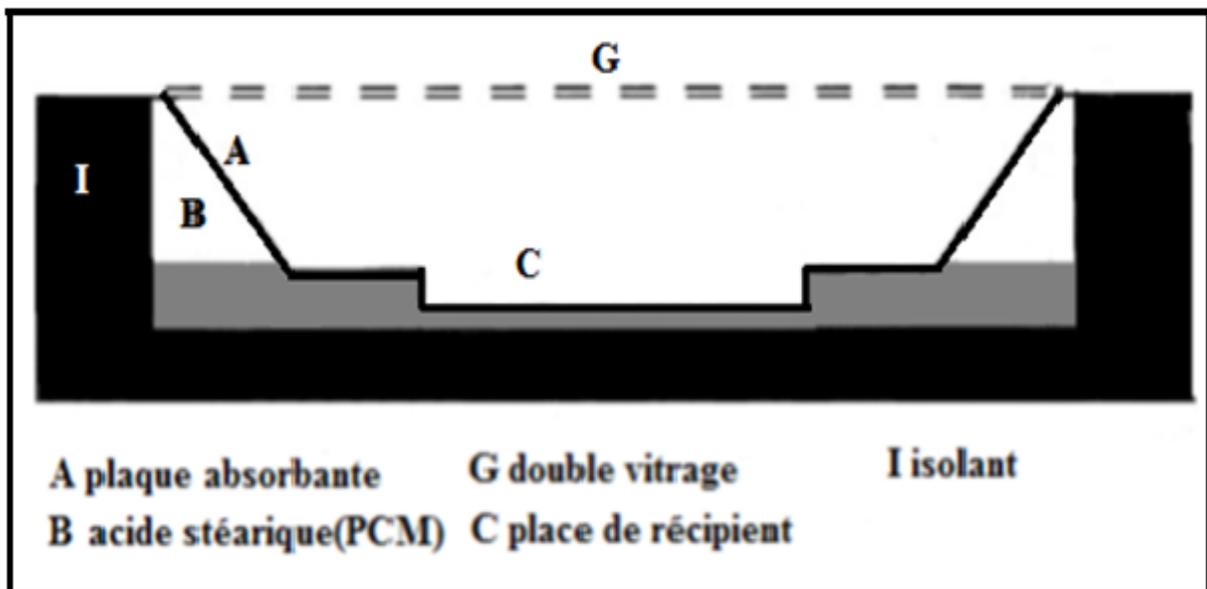


Figure II-9 : Cuiseurs solaires avec stockage de chaleur latente [35]

II.7- Four solaire d'Odeillo

II.7.1- Présentation :

Le four solaire d'Odeillo à 54 mètres de haut et 48 de large comprenant 63 héliostats, est un four fonctionnant à l'énergie solaire et mis en service en 1970. Sa puissance thermique est d'un mégawatt. Avec le four solaire de Parkent en Ouzbékistan, il est l'un des deux plus grands au monde.

Ce laboratoire doit sa renommée mondiale à son acquis scientifique unique dans le domaine des études par voie solaire des phénomènes à haute température et du comportement des matériaux soumis à des conditions extrêmes.

Le four solaire d'Odeillo a servi de modèles dans le monde entier, démontrant le potentiel de l'énergie solaire et ses multiples applications. Sur place, il est également possible de découvrir la cuisson au four solaire



Figure II-10 : Le four solaire d'Odeillo [38]

II.7.2- Le principe de fonctionnement :

Le principe utilisé est celui de la concentration des rayons par des miroirs réfléchissants. Les rayons solaires sont captés par 63 héliostats de 45 m² chacun, orientables, situés sur une pente, puis envoyés vers un grand miroir parabolique composé de 9500 miroirs plans de 45 cm de côté chacun. De là, ils convergent vers une cible circulaire au sommet d'une tour centrale; cette cible a à peine 40 cm de diamètre. Cela revient à concentrer l'énergie de 10 000 Soleils.

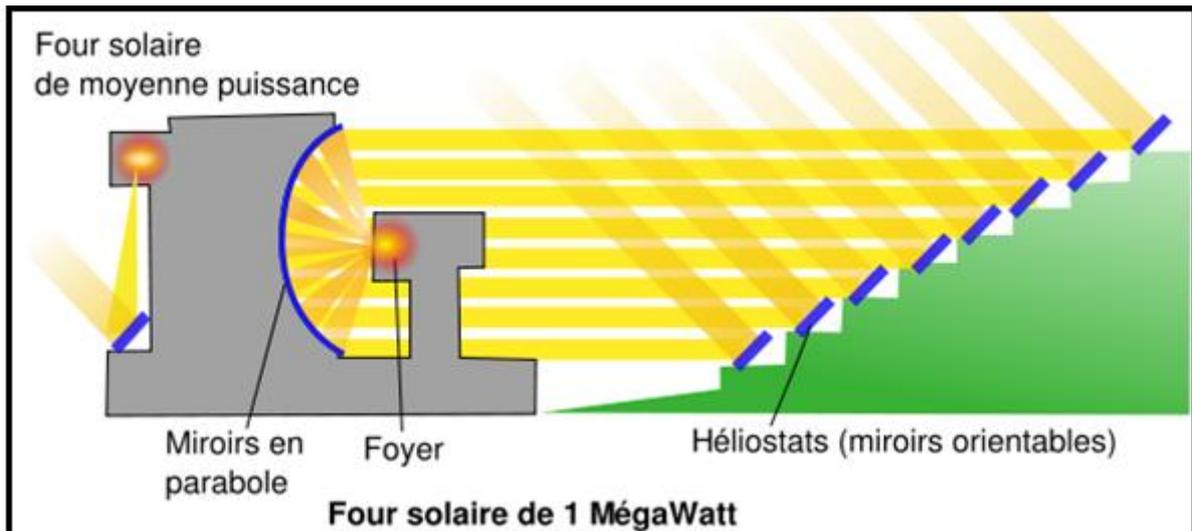


Figure II-11 : Principe de fonctionnement du four d'Odeillo [38]

- On peut obtenir en quelques secondes des températures supérieures à 3 500 °C, selon le procédé mis en œuvre au foyer de l'installation;
- L'énergie est « gratuite », et non polluante;
- Ce four permet d'obtenir de brusques changements de température, et donc d'étudier l'effet des chocs thermiques;
- Il n'y a aucun élément contaminant (gaz de combustion, pollution, résidus,...etc., puisque seul l'objet à étudier est chauffé uniquement par un rayonnement.
- Ce chauffage peut être réalisé en atmosphère contrôlée.

II.7.3- Domaine d'utilisation :

- Le four solaire d'Odeillo accueille une partie des équipes du laboratoire de recherche PROMES du CNRS (UPR8521), Co-habité avec l'Université de Perpignan sur les études thermiques à haute température, les systèmes caloporteurs, la conversion de l'énergie, le craquage de l'eau pour produire de l'hydrogène, le comportement des matériaux à haute température dans des environnements extrêmes...
- Les domaines de recherche sont aussi étendus aux industries aéronautiques, aérospatiales...
- On peut y faire des expériences dans des conditions de grande pureté chimique.

II.8- Les Avantages et inconvénients

II.8.1- Avantages

Il est fondamental de développer l'utilisation de l'énergie solaire aujourd'hui dans le monde pour la santé de nos enfants et de notre Terre et la cuisson solaire est une solution simple et efficace pour résoudre certains problèmes de santé et d'environnement :

Pour la santé :

- Purification de l'eau : Peu de gens le savent mais l'eau se purifie dès 65°C. Le cuiseur solaire atteignant 150°C en moyenne, les familles purifient l'eau qu'elles boivent. C'est inouï quand on sait que les taux de mortalité infantile, tant élevé dans certains pays du Sud, sont surtout dus aux diarrhées causées par l'eau crue non pasteurisée.
- Alimentation saine : Le cuiseur solaire conserve les saveurs et les richesses des aliments cuits. La concoction solaire est lente tandis que le feu à gaz tue les vitamines et brûle le fond de la casserole. La chaleur est répartie dans tout le cuiseur solaire, il n'est pas nécessaire de mettre beaucoup d'huile pour cuire. La cuisson est plus saine, plus riche et plus goûteuse.

Pour l'environnement :

- Réduction de la déforestation, du déboisement et de l'érosion des sols : plus de 80% du bois coupé dans le monde est utilisé pour la cuisson et 2 milliards de personnes sur terre utilisent le bois pour cuire. L'Afrique de l'Ouest, dont les ressources naturelles sont tant exploitées par l'occident, a survécu jusqu'à présent mais au prix de l'anéantissement de sa forêt. Le désert avance à grand pas, les sols sont pauvres, stériles, sans végétation. Utiliser le cuiseur solaire, c'est laisser, enfin, un peu de répit à la nature, aux sols, aux arbres et à la végétation. C'est permettre la reforestation de nombreuses régions du monde.
- Diminution de l'émission de gaz à effet de serre (CO₂) : Toute combustion, qu'elle soit de gaz, de bois, de pétrole etc., génère des gaz qui contribuent au réchauffement de la planète. Réduire notre consommation de combustible, c'est préserver l'environnement, et conserver des réserves énergétiques pour les générations futures.
- Revalorisation de la biomasse et des engrais naturels : Dans de nombreux pays, la bouse des animaux sert à cuire alors qu'elle est un si bon engrais pour la terre. Le cuiseur solaire permet de garder les herbes et la biomasse comme engrais.

Pour l'économie :

- Gain financier : En économisant du combustible, on économise de l'argent. L'énergie du soleil est gratuite. Et lorsque le soleil se cache, on utilise le cuiseur avec stockage de chaleur.

Pour la vie quotidienne :

- Sécurité : Face aux dangers de l'utilisation du gaz en cuisine (brûlure, feu, fuite...), le cuiseur solaire est une véritable innovation en matière de sécurité. De l'extérieur, le cuiseur n'est absolument pas chaud. Rien ne peut prendre feu, pas besoin de surveiller sans cesse la cuisson.

II.8.2- Inconvénients

- Le temps de cuisson est variable et va dépendre de l'ensoleillement.
- Les durées de cuisson, sont bien supérieures à celles des cuissons traditionnelles, il faut s'organiser et ne pas être pressé.
- La possibilité de cuisiner dehors dépend de l'ensoleillement, cela n'est possible ni tous les jours ou ni à toute heure.
- Ne permet ni friture, ni grillade qui réclament une température élevée.

Conclusion

Au cours de ce deuxième chapitre nous avons fait un recensement des cuiseurs solaires existants et nous avons procédé à l'analyse de la littérature spécifique consacrée à notre étude. Ainsi nous avons défini les différents types de cuiseurs solaires existants en soulignant dans certains cas les améliorations apportés par les travaux de recherches dans ce domaine.

Chapitre III : Etude théorique d'un concentrateur solaire parabolique

Pour ce projet, le type de concentrateur le plus intéressant d'un point de vue de ses propriétés est le concentrateur parabolique.

Rappels sur la parabole

III.1- La géométrie parabolique

III.1.1- Définition :

Une parabole est par définition l'ensemble des points situés à égale distance d'une droite fixe appelée directrice, et un point fixe F appelé foyer. L'intersection de la parabole et de son axe est le sommet qui est exactement intermédiaire entre le foyer et la directrice.

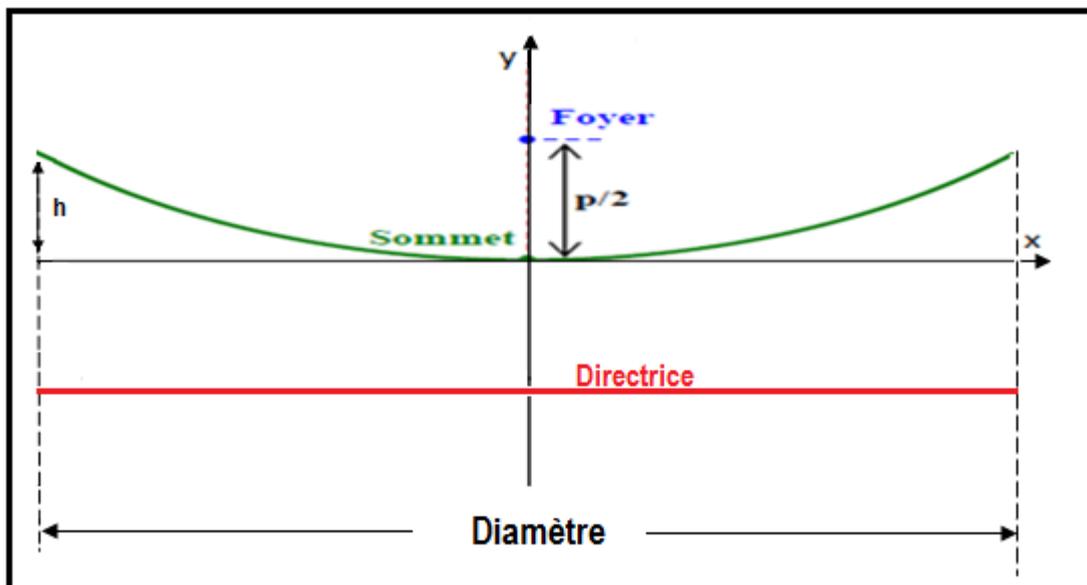


Figure III-1 : graphe montre les caractéristiques d'une parabole

III.1.2- Equation de la parabole :

Si la directrice d'une parabole a pour équation $y = -p/2$ et son foyer pour coordonnées $(0, p/2)$, alors la parabole aura pour équation :

$$y = \frac{x^2}{2p}$$

III.1.3- Equation réduite d'une parabole :

On choisit un repère orthonormé (S, \vec{i}, \vec{j}) , d'origine S le sommet de la parabole, d'axe des ordonnées (Δ) l'axe focal, tel que le point F a pour coordonnées $(0, p/2)$. Dans ce repère, l'ordonnée de F est strictement positive et le point K a pour coordonnées $(0, -p/2)$.

Soient M(x, y) un point du plan et H(-x, -p/2) son projeté orthogonal sur (D).

Soit $M \in (P)$: $MF^2 = MH^2 \Leftrightarrow x^2 + (y - \frac{p}{2})^2 = (y + \frac{p}{2})^2$

Après simplification la parabole a pour équation : $y = \frac{x^2}{2p}$ (III-1)

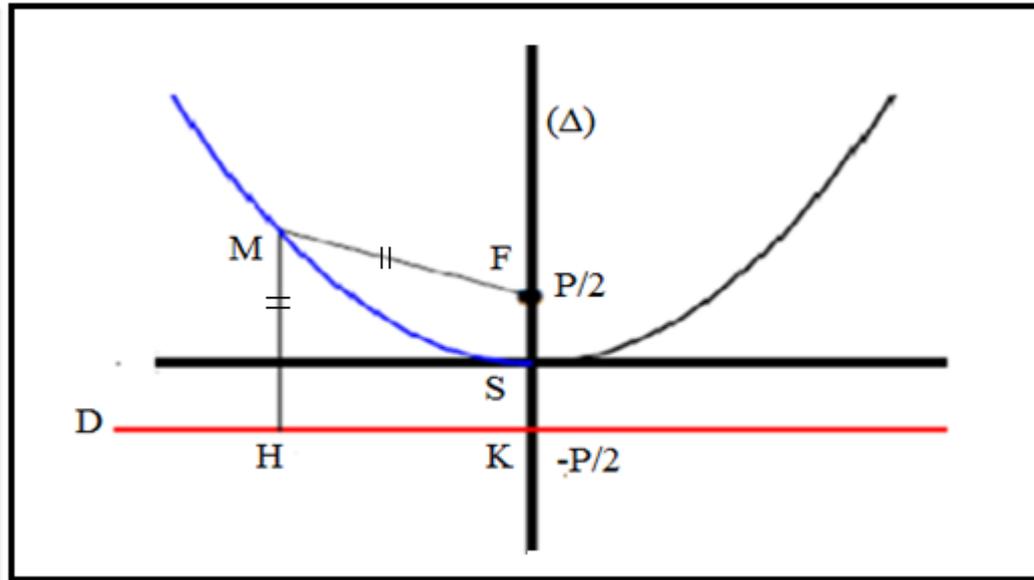


Figure III-2 : Graphe d'une parabole d'équation $y = \frac{x^2}{2p}$

III.1.4- Caractéristiques d'une parabole

Deux paramètres permettent de décrire complètement une parabole :

- Le coefficient p qui intervient dans l'équation de la parabole génératrice du paraboléide. Lorsque p augmente, la parabole devient plus « plate », et inversement, lorsque p diminue, la parabole devient plus profonde. Ce paramètre règle donc la profondeur de la parabole.
- Le diamètre D permet, une fois p déterminé, de fixer les dimensions de la parabole. Vu de haut, la parabole présente une ouverture circulaire dont le diamètre est D .

a) Profondeur d'une parabole

La taille de la courbe parabolique (ou la profondeur) P_f peut être définie comme la distance maximale du sommet à une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole, elle est définie à partir de l'équation III-1

$$P_f = \frac{D^2}{16f} \quad (III-2)$$

Avec

D : diamètre de la parabole

f : est la distance focale = $\frac{p}{2}$

b) Surface d'une parabole

C'est l'espace inclus entre une parabole et une ligne à travers son ouverture, elle est indiquée

$$\text{par : } S_x = \frac{2}{3} \pi \sqrt{2f} \left[(2pf + 2f)^{\frac{3}{2}} - 2f^{\frac{3}{2}} \right] \quad (III-3)$$

c) Longueur d'une parabole

La longueur d'arc d'une parabole peut être trouvée en intégrant une surface différentielle de cette courbe, en appliquant les limites $X = P_f$ et $Y = D/2$, on trouve :

$$Lp = \left[\frac{D}{2} \sqrt{\left[\frac{4P_f}{D} \right] + 1} + 2 \ln \left[\frac{4P_f}{D} + \sqrt{\left[\frac{4P_f}{D} \right]^2 + 1} \right] \right] \quad (\text{III-4})$$

d) surface d'ouverture de la parabole :

La surface d'ouverture d'une parabole est la surface du disque supérieur de la parabole elle se calcule par la formule suivante :

$$A_{par} = \pi \frac{D^2}{4} \quad (\text{III-5})$$

e) Angle d'ouverture d'une parabole Ψ

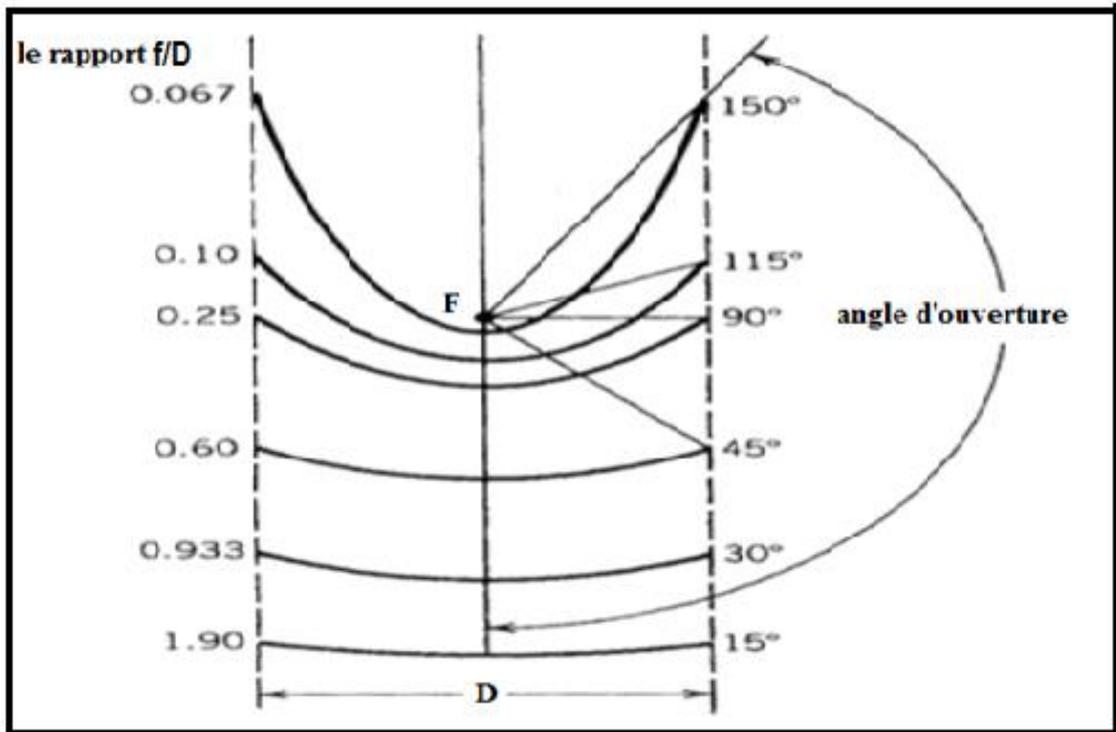


Figure III-3 : Angle d'ouverture de la parabole en fonction de f [8]

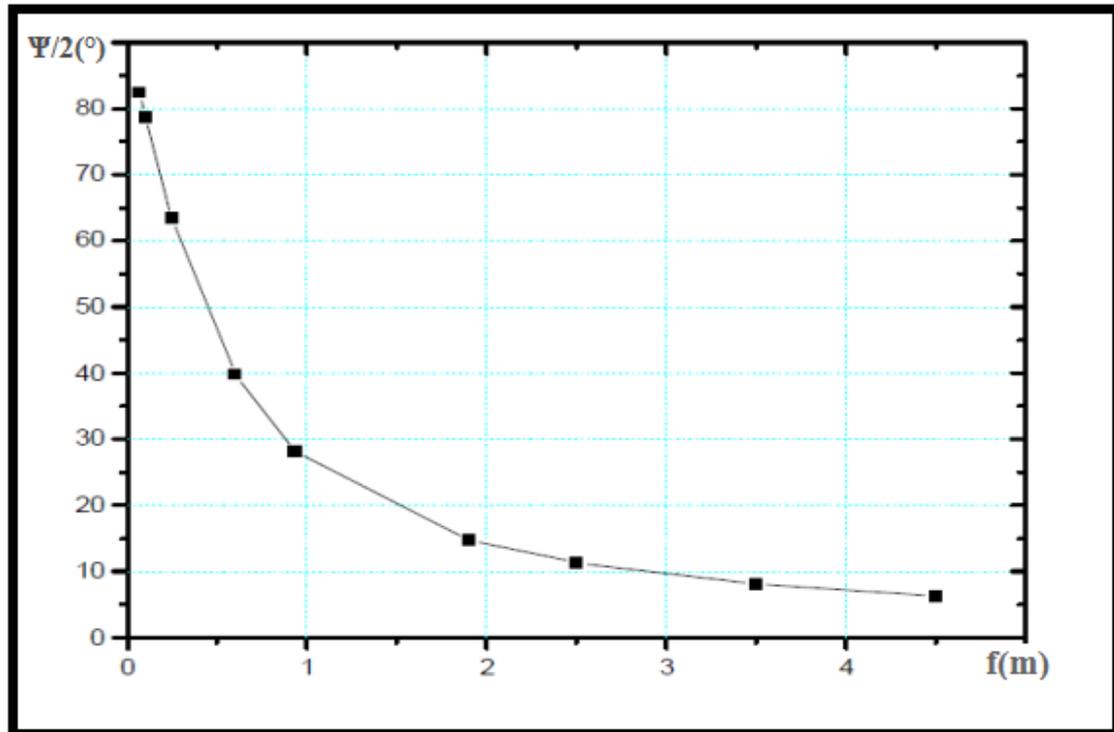


Figure III-4 : Angle d'ouverture d'une parabole en fonction de la distance focale [8]

On peut voir qu'une parabole avec un petit angle d'ouverture est relativement plate. L'augmentation de l'angle d'ouverture de la parabole fait diminuer la distance focale.

III.1.5- Système optique d'une surface parabolique

L'idée d'utiliser une surface parabolique vient du fait qu'elle est stigmatique pour les points à l'infini situé sur son axe.

D'après les lois de réflexion, tout rayon lumineux parallèle à l'axe de la parabole est réfléchi par la parabole suivant une droite passant par le foyer

Voyons maintenant les propriétés de réflexion d'une parabole. Si on place une lampe au foyer d'une parabole, on peut remarquer que les rayons réfléchis sont parallèles à l'axe optique. Inversement, des rayons incidents parallèles à l'axe optique sont réfléchis en un point qui correspond au foyer géométrique de la parabole.

Si la courbe de la parabole a pour équation $y = \frac{x^2}{2p}$ les rayons réfléchis coupent l'axe optique au point $(0, p/2)$. Ce point est le foyer du miroir.

Par contre, des rayons parallèles entre eux, mais non parallèles à l'axe optique, ne convergent pas en un point.

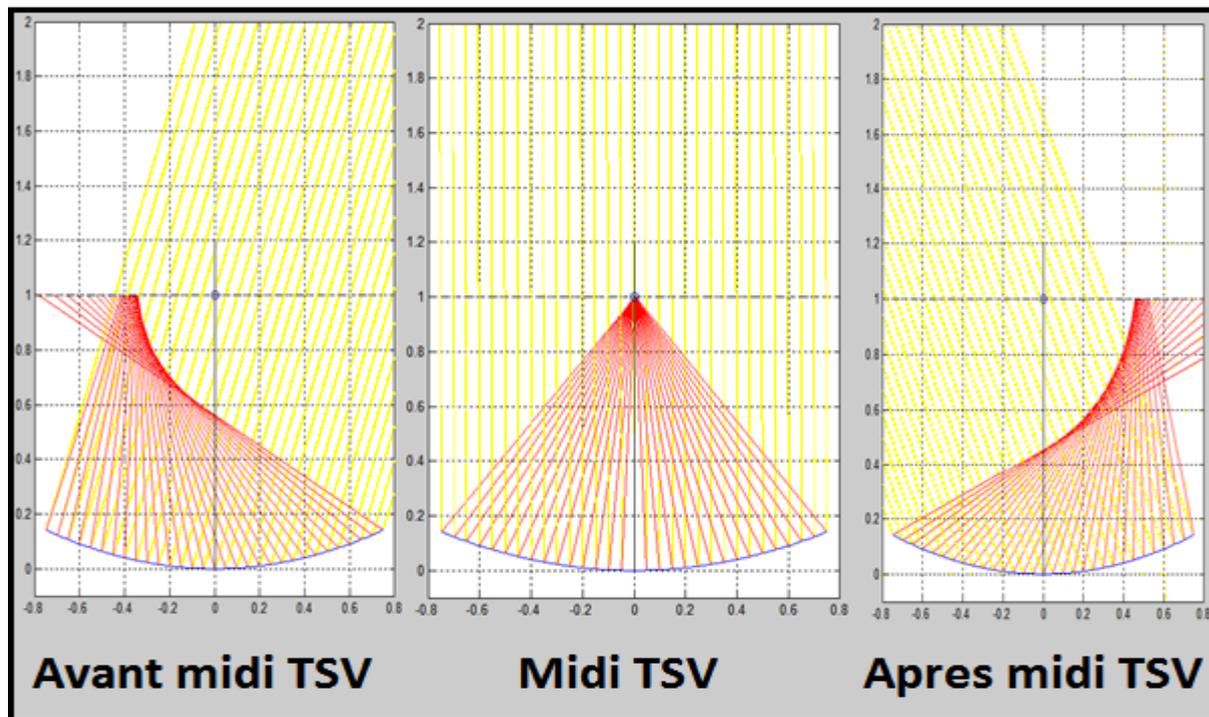


Figure III-5 : Réflexion des rayons solaires sur une parabole parfaite
« Obtenue avec MATLAB »

III.2- Les composants d'un concentrateur solaire parabolique

Le concentrateur solaire parabolique est composé de deux éléments :

III.2.1- Réflecteur :

Le réflecteur est un miroir de surface parabolique concave, possédant une propriété réfléchissante grâce à un dépôt métallique.

Retenons une propriété importante de ces miroirs : quand un faisceau lumineux arrive parallèlement à l'axe, tous les rayons réfléchis convergent en un point unique F situé sur l'axe, appelé foyer du miroir.

Choix du métal :

Pour notre parabole, il faut utiliser un métal qui réfléchit le mieux les rayons du soleil. La réflexion d'un métal est caractérisée par son coefficient de réflexion, défini comme le rapport entre l'intensité réfléchie et l'intensité incidente. Le coefficient de réflexion, noté φ_{ref} , est donc un nombre adimensionnel compris entre 0 et 1. Le coefficient de réflexion dépend de la longueur d'onde du rayon incident et de l'angle d'incidence. Lorsque l'angle incident augmente, le coefficient de réflexion augmente également.

A la limite, lorsque l'angle incident tend vers 90° , φ_{ref} tend vers 1.

Nous avons vu que l'énergie solaire qui arrive sur Terre provient principalement des Ultraviolets (UV-A), de la lumière visible et des Infrarouges.

Il faut donc choisir un métal qui est caractérisé par un coefficient de réflexion élevé pour des longueurs d'ondes comprises entre 280 et 1400 nm.

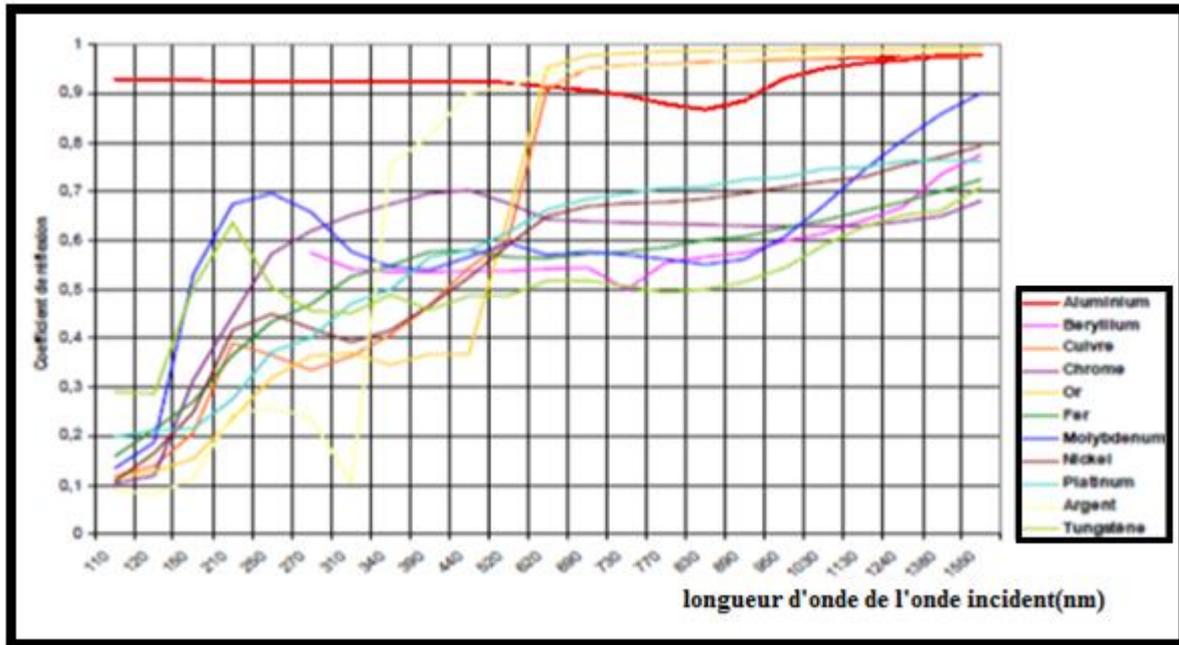


Figure III-6 : Variation du coefficient de réflexion de quelques métaux en fonction de la longueur d'onde de l'onde incidente perpendiculaire à la surface [26]

Grâce à cette figure, on peut remarquer qu'entre 100 et 600 nm, l'aluminium a le meilleur coefficient de réflexion (environ 0,92). Après 600 nm, l'or, l'argent et le cuivre ont un coefficient de réflexion plus élevé. Cependant, l'aluminium conserve un coefficient de réflexion avoisinant 0,9. En conclusion, l'aluminium est le meilleur métal du point de vue de la réflexion des rayons de longueurs d'onde comprises entre 100 et 1400 nm. Ce métal n'est de plus pas trop cher, contrairement à l'or ou à l'argent.

III.2.2- Récepteur (absorbeur)

Le récepteur doit absorber autant de flux solaire concentré possible, et le convertir en énergie thermique, cette chaleur est transférée dans un fluide d'un certain type (liquide ou gaz).

Le récepteur ne doit pas être trop grand pour ne pas faire de l'ombre au réflecteur et ne doit pas être trop petit pour pouvoir capter la totalité des rayons concentrés au foyer.

La surface du récepteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne conductivité et diffusion thermique.
- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Une bonne résistance chimique vis à vis du fluide utilisé.
- Un facteur d'émission dans l'infrarouge aussi faible que possible.
- Une bonne inertie thermique.

Il est important que le récepteur soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre : 360 W/m.K, aluminium : 200 W/m.K, acier 60 W/m.K). Plus le coefficient de conduction est faible et plus l'absorbeur doit être épais, ce qui augmente le prix et l'inertie de l'absorbeur.

Dimension du récepteur

Nous avons vu que la parabole réfléchit tous les rayons lumineux parallèles à son axe en un point foyer, cela ne vaut pas pour des applications solaires, et en raison de la taille angulaire finie du disque solaire on peut assumer que le diamètre apparent du disque solaire ε égal à 0.0093 rad.

Quand l'angle d'ouverture d'une parabole en parfait état est aligné vers le soleil, la réflexion des rayons forme une image circulaire (tache solaire) centrée au point focal sous forme d'ellipse.

Le petit rayon s_f et le grand rayon r_f de l'ellipse sont indiqués comme suit :

$$s_f = \frac{f \varepsilon}{(1 + \cos \Psi/2)} \quad (\text{III-6})$$

$$r_f = \frac{f \varepsilon}{(1 + \cos \Psi/2) \cos \Psi/2} \quad (\text{III-7})$$

ε : C'est l'angle sous lequel on voit le soleil à partir de la terre

$$\varepsilon = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ rads}$$

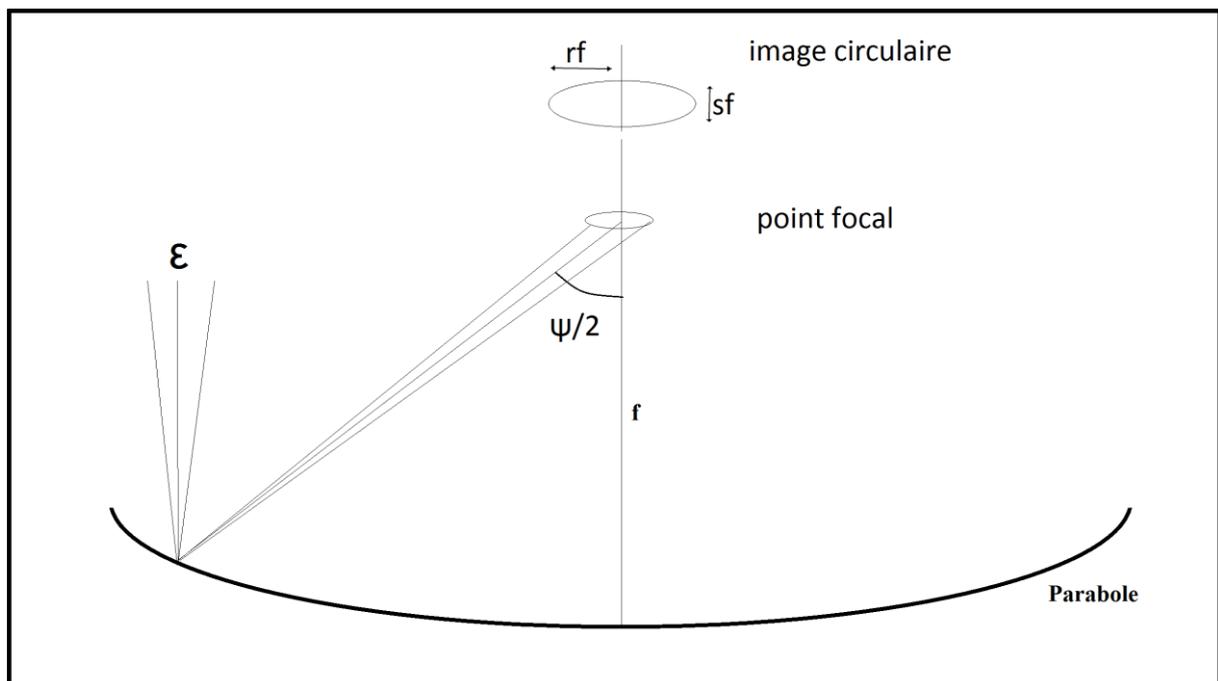


Figure III-7: La réflexion des rayons forme une image circulaire

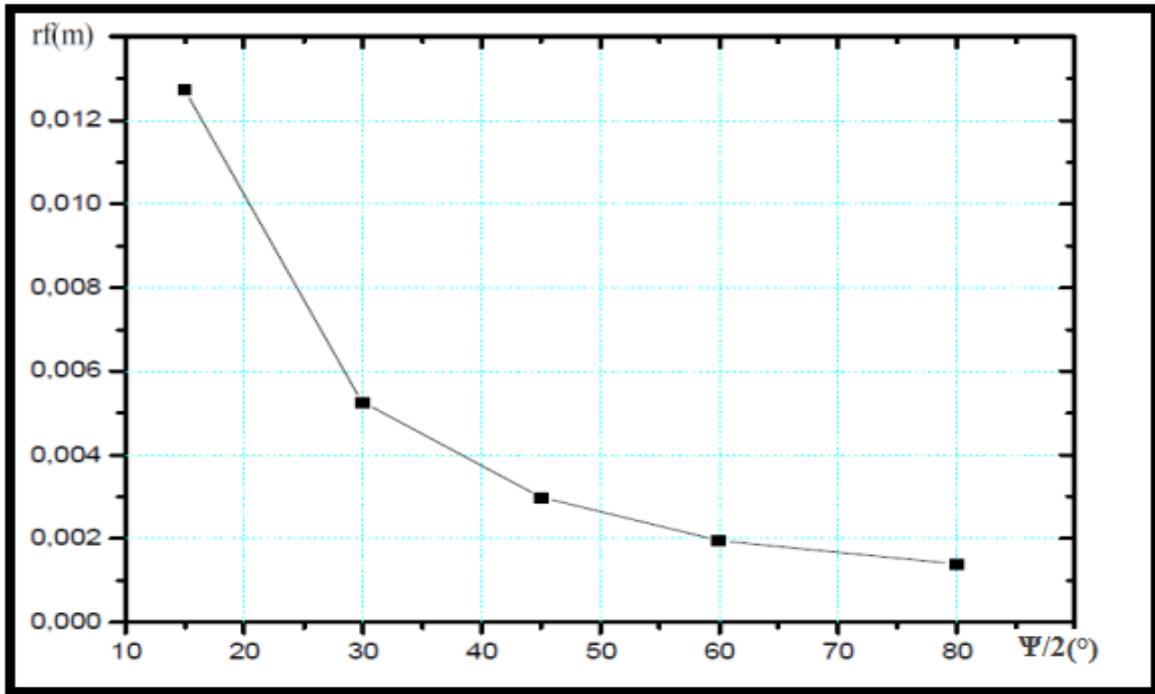


Figure III-8 : Diamètre de l'image circulaire en fonction de l'angle d'ouverture de la parabole D=1m [8]

On remarque que le diamètre de la tache solaire diminue qu'on l'angle de l'ouverture de la parabole augmente.

III.3- La concentration solaire

Ce paramètre indique la quantité de concentration d'énergie réalisée par un collecteur donné. Les deux définitions normales de la concentration solaire sont la concentration géométrique (surface) et la concentration système optique (flux).

III.3.1- Concentration géométrique

C'est le rapport de la surface de l'ouverture de la parabole A_{par} à la surface éclairé du récepteur (surface de la base du cylindre) A_{base}

$$C_g = \frac{A_{par}}{A_{base}}$$

En se référant à la figure ci-dessous, on pose :

$$FJ=Y \quad \text{et} \quad FA=\rho_0$$

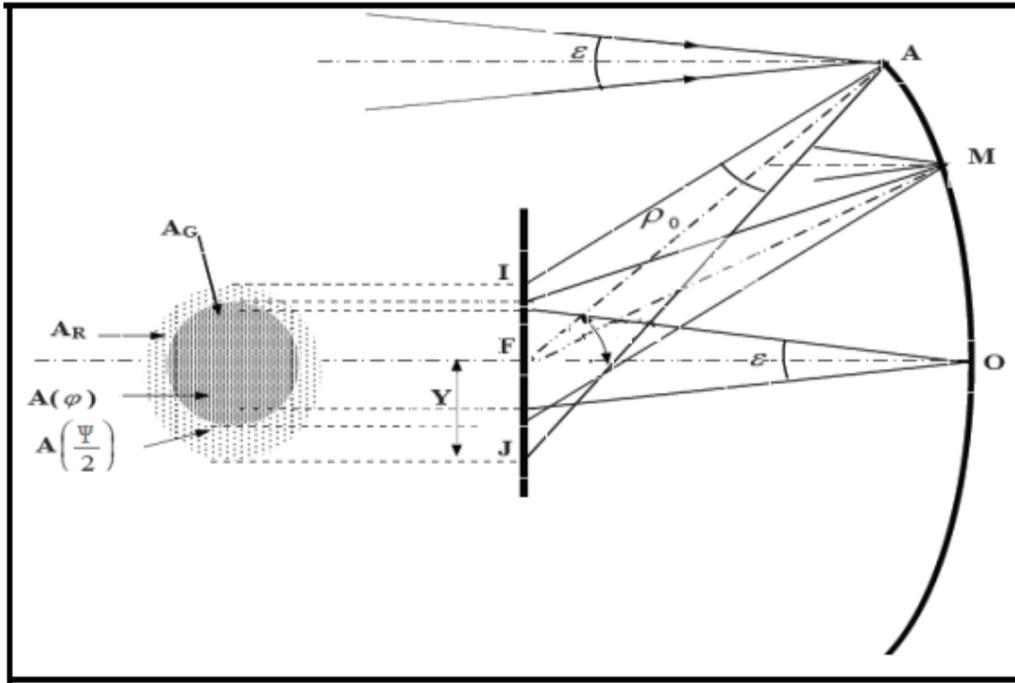


Figure III-9 : Coupe méridienne d'une demi-parabole montrant les projections dans le plan focal de l'image du soleil [2]

On a donc :

$$A_{ref} = \pi \rho_0^2 \sin^2\left(\frac{\Psi}{2}\right)$$

Et $A_{rec} = \pi Y^2$

L'angle ϵ est très petit donc $\sin(\epsilon) \approx \epsilon$

D'après la figure ci-dessus on trouve :

$$Y \approx \frac{\rho_0}{\cos\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \frac{\epsilon}{2}$$

Donc :

$$C_g = \frac{\sin^2\left(\frac{\Psi}{2}\right)}{\left(2 \cos\left(\frac{\Psi}{2}\right)\right)^2 \epsilon}$$

$$C_g = \left(\frac{2 \cos\left(\frac{\Psi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)}{\epsilon}\right)^2$$

Après simplification la formule peut s'écrire sous forme :

$$C_g = \left(\frac{\sin\Psi}{\epsilon}\right)^2 \tag{III-8}$$

III.3.2- Concentration optique

Est égale au rapport de l'éclairement moyen sur la surface de l'absorbeur à l'éclairement de l'ouverture.

$$c_{en} = \frac{Q_{(rec)}}{S_{dir(par)}}$$

Qu'on peut écrire sous forme :

$$c_{en} = \left(\frac{2}{\varepsilon} \sin \frac{\Psi}{2}\right)^2 \quad (\text{III-9})$$

$Q_{(rec)}$: Flux reçu à l'ouverture du récepteur.

$S_{dir(par)}$: Éclairement reçu à l'ouverture du réflecteur.

III.4- Bilan thermique sur le concentrateur parabolique:

III.4.1- Le Réflecteur

Soit S_{dir} (en W/m^2) le flux solaire qui arrive sur le concentrateur. Le miroir parabolique du concentrateur capte une partie des rayons dont la puissance (en W) est donnée par le produit du flux S_{dir} avec la surface A_{par} de l'ouverture de la parabole. Pour être rigoureux, il faut retrancher à A_{par} la surface A_{base} de l'ouverture du récepteur (fond de récepteur) qui bloque une faible partie des rayons, qui ne sont donc pas concentrés par le miroir. Ces rayons sont ensuite réfléchis par l'aluminium.

A ce niveau, il y a une perte de la puissance puisque 10 % des rayons sont absorbés par le métal (le coefficient de réflexion de l'aluminium est égal à 0,9).

La puissance réfléchi sur le récepteur est donc égale à :

$$Q_{ref} = S_{dir}(A_{par} - A_{base})\rho_{ref}$$

Soit :

$$Q_{ref} = S_{dir}\rho_{ref}A_{ref} \quad (\text{III-10})$$

Avec :

A_{par} : Surface de la parabole

A_{base} : Surface du récepteur

A_{ref} : Surface rayonné

S_{dir} : Éclairement solaire arrivant sur le concentrateur (W/m^2)

ρ_{ref} : Coefficient de réflexion de l'aluminium

III.4.2- Le récepteur

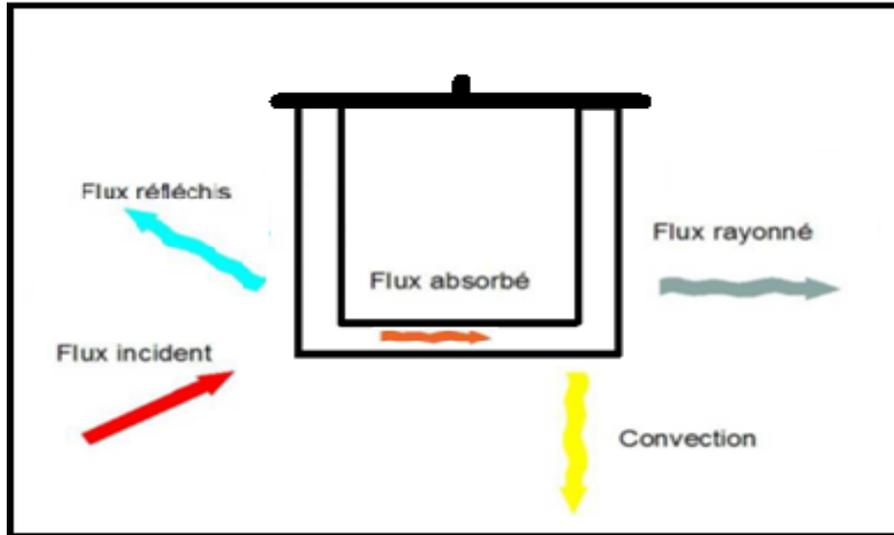


Figure III-10 : Bilan thermique sur un récepteur

Pour réaliser un bilan énergétique sur un récepteur sous forme cylindrique, on isole pour cela la surface qui absorbe le rayonnement solaire concentré par le réflecteur.

Le bilan énergétique de la surface absorbante de concentration solaire peut être écrit sous forme :

a) Le flux utile :

$$Q_u = (c_r m_r + c_f m_f) \Delta T \quad (\text{III-11})$$

m_f : La masse du fluide

c_f : La chaleur massique du fluide

m_r : La masse du récepteur

c_r : La chaleur massique du récepteur

On a aussi :

$$Q_u = Q_{abs} - Q_{per} \quad (\text{III-12})$$

b) Le flux absorbé :

$$Q_{abs} = \tau_{rec} \alpha_{rec} Q_{ref}$$

$$Q_{abs} = \tau_{rec} \alpha_{rec} \rho_{ref} A_{ref} S_{dir}$$

$$Q_{abs} = \eta_{opt} A_{ref} S_{dir} \quad (\text{III-13})$$

Avec :

$$\eta_{opt} = \tau_{rec} \alpha_{rec} \rho_{ref}$$

α_{rec} : Le facteur d'absorption de la surface de récepteur

τ_{rec} : Le facteur de transmission de récepteur

c) Puissance correspondant aux pertes thermiques Q_{per}

Une fois que l'énergie solaire est passée vers la surface d'ouverture du récepteur, elle relève sa température au-dessus de la température ambiante. Cette variation de température provoque ainsi un processus des pertes de chaleur, ce sont des pertes par convection, par rayonnement et par évaporation de l'eau.

$$Q_{per} = Q_{cv} + Q_{ray} + Q_{evap} \quad (III-14)$$

- Pertes par évaporation de l'eau

Les pertes par évaporation sont importantes lorsque la masse d'eau contenue dans le récepteur est importante, elles se calculent par la formule suivante :

$$Q_{evap} = m * C_p * \Delta T + m * L_v$$

- Pertes par convection

La mauvaise connaissance du phénomène de la convection est encore posée pour une plaque plane. Elle est dépendante de la vitesse du vent et sa direction par rapport au site. Ces pertes sont proportionnelles à la surface de l'absorbeur et la différence entre la température de récepteur et la température ambiante.

$$Q_{cv} = h_{cv} A_{rec} (T_{rec} - T_{am}) \quad (III-16)$$

Il existe deux types de convection, forcée et naturelle :

- Convection forcée :

Le coefficient d'échange de chaleur est donné par :

$$h_{cvforcé} = \frac{N_u \lambda_{air}}{D_{rec}} \quad (III-17)$$

Le nombre de Nusselt donné par la corrélation suivante :

$$N_u = 0.664 R_e^{0.5} P_r^{0.33} \quad (III-18)$$

$$\text{Et : } R_e = \frac{V_{vent} D_{rec}}{\nu_{air}} \quad (\text{III-19})$$

$$P_r = \frac{\mu_{air} C_{p_{air}}}{\lambda_{air}} \quad (\text{III-20})$$

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air

D_{rec} : Diamètre du récepteur

V_{vent} : Vitesse du vent

ν_{air} : Viscosité cinématique de l'air

$C_{p_{air}}$: Chaleur spécifique de l'air

μ_{air} : Viscosité dynamique de l'air

- Convection naturelle :

Pour le cas d'un cylindre vertical :

$$h_{cv \text{ naturel}} = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{H} \right)^{0.25} \quad (\text{III-21})$$

H est la hauteur du récepteur

En général, on prend :

$$h_{cv} = 5.7 + (3.8 * V_{vent}) \quad (\text{III-22})$$

h_{cv} : est le coefficient de transfert de chaleur par convection mixte (naturel et forcé)

- Pertes par rayonnement

Les pertes de chaleur par rayonnement sont importantes pour des récepteurs fonctionnant seulement aux températures légèrement au-dessus de la température ambiante, et deviennent dominantes pour des collecteurs fonctionnant à température élevée.

$$Q_{ray} = \epsilon_{rec} \sigma A_{rec} (T_{rec}^4 - T_{ciel}^4) \quad (\text{III-23})$$

ϵ_{rec} : Facteur émissivité de l'absorbeur.

σ : Constante Stefan-Boltzmann qui égal a $(5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

T_{ciel} : Température du ciel elle ce calcul par la formule de Swinbank (1963) :

$$T_{ciel} = 0.0552 T_{am}^{1.5} \quad (\text{III-24})$$

On peut écrire l'équation sous la forme suivante :

$$Q_{ray} = A_{rec} h_{ray} (T_{rec} - T_{ciel}) \quad (\text{III-25})$$

Avec :

$$h_{ray} = \sigma \epsilon_{rec} (T_{rec}^2 + T_{ciel}^2) (T_{rec} + T_{ciel})$$

On combine les équations précédentes et on aura une expression simple du flux utile :

$$Q_u = \eta_{opt} S_{dir} A_{ref} - [A_{rec} (h_{cv}(T_{rec} - T_{am}) + h_{ray}(T_{rec} - T_{ciel}))] \quad (III-26)$$

III.5- Expression de la température de récepteur

Le flux perdu est égal à :

$$Q_{Per} = Q_{cv} + Q_{ray} + Q_{evap}$$

$$Q_{Per} = h_{cv} A_{rec} (T_{rec} - T_{am}) + A_{rec} h_{ray} (T_{rec} - T_{ciel}) + m Lv$$

$$Q_{Per} = A_{rec} (T_{rec} (h_{cv} + h_{rey}) - h_{cv} T_{am} - h_{rey} T_{ciel}) + m Lv$$

On a aussi :

$$Q_{Per} = Q_{abs} - Q_u$$

$$Q_{abs} = A_{rec} (T_{rec} (h_{cv} + h_{ray}) - h_{cv} T_{am} - h_{ray} T_{ciel}) + m Lv$$

Donc :

$$T_{rec} = \frac{(Q_{abs} - Q_u) + (h_{cv} T_{am} + h_{ray} T_{ciel}) A_{rec}}{A_{rec} (h_{cv} + h_{ray})}$$

A l'équilibre on aura le flux absorbé égal au flux perdu donc l'équation devienne :

$$T_{rec} = \frac{(Q_{abs} - m Lv) + (h_{cv} T_{am} + h_{ray} T_{ciel}) A_{rec}}{A_{rec} (h_{cv} + h_{ray})} \quad (III-27)$$

III.6- Efficacité du concentrateur

La mesure des performances d'un concentrateur solaire est une opération importante et nécessaire pour la compréhension du fonctionnement du système.

Cette efficacité se définit comme le rapport de l'énergie thermique absorbée par le récepteur et l'énergie reçue à l'ouverture du réflecteur ; elle se calcule par la formule suivante :

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{ref}}$$

$$\eta = \frac{\eta_{opt}}{\rho_{ref}} - \frac{A_{rec} [h_{cv} (T_{rec} - T_{am}) + h_{ray} (T_{rec} - T_{ciel}) + m Lv]}{S_{dir} \rho_{ref} A_{ref}} \quad (III-28)$$

III.7- Exemple d'application théorique

Résultat obtenue par le programme MATLAB

Ce calcul est effectué pour la ville de TIZI-OUZOU à la journée de 19-11-2015

- Les données météorologiques et les coordonnées géographiques sont les suivantes :

Temps légal : 12 h 30min

Humidité relative : 50 %

Température ambiante : 23 °C

vitesse du vent : 0.5 m/s

Longitude du lieu : 4.05°

La latitude du lieu : 36.7°

- Et les paramètres géométriques du concentrateur sont :

Diamètre de la parabole : 1 m

Diamètre du récepteur : 0.25 m

Distance focal : 0.5 m

Hauteur de récepteur : 0.2 m

- Les propriétés des matériaux proposés :

Le coefficient de réflexion de la parabole : 0.9

Le coefficient d'absorption du récepteur : 0.75

Emissivité du récepteur : 0.04

- Les résultats obtenus sont les suivants :

Numéro du jour : 323 jours

Déclinaison de la terre : -19.8211°

Angle horaire du lever : -74.4153°

Angle horaire du coucher : 74.4153°

Temps solaire vrai du lever : 7.0390 h

Temps solaire vrai du coucher : 16.9610 h

Correction du temps : 14.8394 min

Temps légal du lever : 7.5217 h

Temps légal du coucher : 17.4437 h

Temps solaire vrai : 12.00 h

Durée du jour : 9.9220 h

Angle horaire : -0.0402°

Hauteur du soleil : 33.4789°

Inclinaison parfaite du capteur : 56.5211°

Azimute : -0.0453°

Angle d'incidence : -0.0378°

Diamètre foyer : 4.2928e-004 m

Pression de vapeur : 11.5385 mm Hg

Eclairement directe arrivent sur une surface horizontal : **378.6073 w/m²**

Eclairement directe arrivent sur la parabole : **686.3429 w/m²**

Surface d'ouverture de la parabole : 0.7854 m²

Surface d'ouverture du récepteur : 0.0707 m²

Surface réfléchissante : 0.7147 m²
 Surface latérale du récepteur : 0.1885 m²
 Surface total du récepteur : 0.3299 m²
 Profondeur de la parabole : 0.1250 m
 Longueur de l'arc parabolique : 1.5748 m
 Surface de l'arc parabolique : 0,9981 m²
 Angle d'ouverture de la parabole : 106,2602°
 Coefficient de la réflexion : 0,9000
 Concentration géométrique : 3,2809

Flux réfléchi : **443,5 W**
 Flux absorbé : **332,3 W**
 Température du ciel : 5.7579 °C
 Température du récepteur à l'équilibre : 148 °C
 Flux perdu : 332 W
 Flux utile : 0.08 W
 Le rendement du concentrateur : 0 (flux utile est nul)
 Le tableau ci-dessous donne les températures théoriques de 10 heures à 16 heure pour la journée du 19-11-2015.

Temps (h)	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
Température (°C)	130	144	148	144	133	110	70

Tableau III.1: Températures obtenues par le calcul théorique pour la journée 19-11-2015

Remarque :

Ces températures ont été obtenues en supposant que le récepteur est en équilibre thermique, donc le flux absorbé par le récepteur vient compenser les pertes par convection et rayonnement

Conclusion

Le développement théorique d'un modèle nous permet de calculer la température au niveau de la surface captatrice. Le rendement du concentrateur ainsi que le flux solaire direct que reçoit le récepteur, en tenant compte de certaines hypothèses et connaissant les paramètres suivants :

- le flux à l'ouverture du réflecteur.
- la concentration géométrique
- le rendement optique.

L'amélioration du rendement à une température donnée peut alors être obtenu, soit par action sur la conception du capteur par augmentation du facteur de concentration, soit par action sur les propriétés optiques des matériaux composant la couverture et la surface du récepteur de

façon à conserver ou augmenter l'absorption de l'énergie solaire incidente et simultanément diminuer ses pertes radiatives à la température de fonctionnement.

Chapitre IV : la cuisson solaire

IV.1- La cuisson solaire

Depuis la nuit des temps, et encore pour la plus part des gens d'aujourd'hui, la cuisson se fait grâce au bois et aux énergies fossiles. Elle demande beaucoup d'attention pour éviter que les aliments ne brûlent pas, ne collent pas aux parois et consomment moins d'énergie. Il existe une autre méthode de cuisson appelée la cuisson solaire.

C'est quoi la cuisson solaire ?

La cuisson solaire nous permet de cuire des aliments grâce à l'énergie du soleil qui sera récupérée directement à partir du rayonnement solaire qui arrive sur terre en utilisant un cuiseur solaire construit pour cuire ces aliments.

Suivant l'endroit où on vit sur la planète et comment on vous cuisine, le cuiseur solaire peut nous faire gagner du temps, de l'argent et de l'énergie et cela sans risque pour l'environnement. Tous les aliments peuvent être préparés, cuisinés dans les différents modèles de cuiseur solaire. Il existe deux modèles principaux de cuiseurs solaires : i) des cuiseurs permettant d'atteindre des températures moyennes de 120 à 150 °C, pour cuire, rôtir, bouillir des aliments et ii) d'autres types de cuiseurs solaires atteignant des températures très hautes qui dépassent 200 °C permettant aussi de frire ou griller des aliments.

La cuisson solaire est différente par rapport aux autres cuissons. Elle est plus lente, mais cette différence est positive car la cuisson lente préserve le goût, les nutriments et elle rend les viandes plus tendres.

Des études récentes révèlent que les plats cuits dans des intervalles de temps larges à des températures modérées sont plus sains.

IV.2- Facteurs essentiels pour la cuisson solaire

IV.2.1- Emplacement du cuiseur solaire

Le cuiseur solaire doit être placé à l'extérieur, dans un endroit ensoleillé, 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.

IV.2.2- Moment d'utilisation du cuiseur solaire

Le cuiseur solaire doit être utilisé quand la longueur de l'ombre sur le sol est plus petite que la taille réelle du cuisinier. Le soleil doit donc être assez haut dans le ciel pour permettre la cuisson. La cuisson solaire ne doit se faire ni tôt le matin ni après le coucher du soleil. Par conséquent, l'idéal est de cuisiner entre 9 et 15 heures.

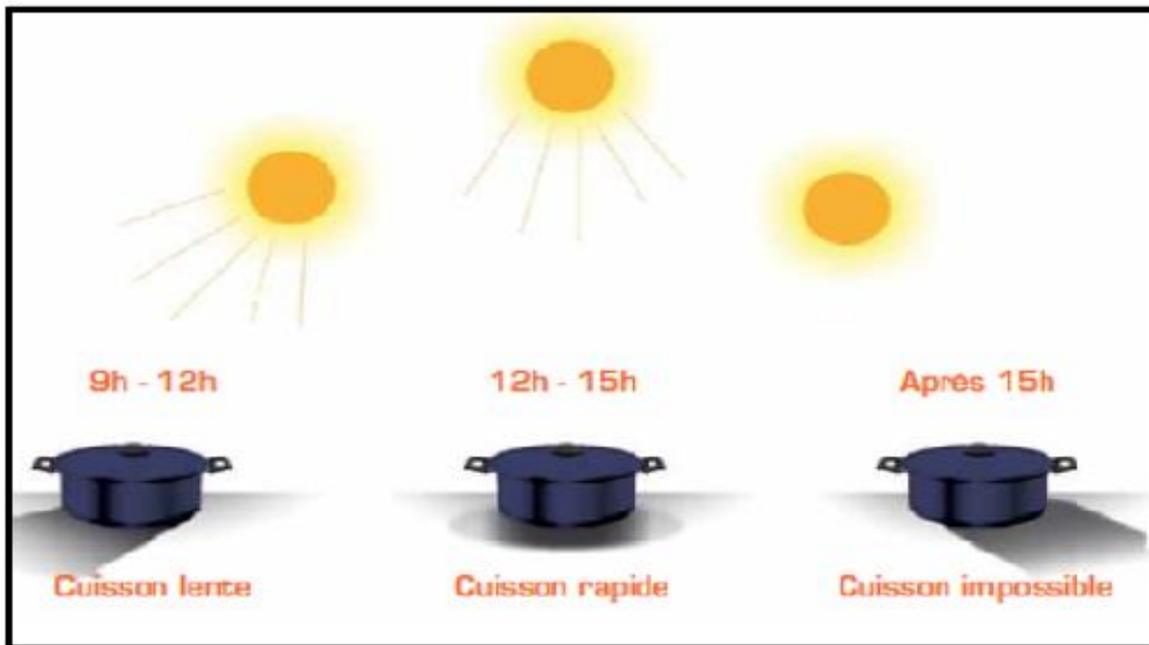


Figure IV-1 : Moment d'utilisation du cuiseur solaire [28]

IV.2.3- Types de récepteurs utilisés pour la cuisson des aliments

Il est préférable d'utiliser des récepteurs de couleur foncée qui absorbent mieux la chaleur, tandis que les couleurs claires réfléchissent les rayons du soleil.

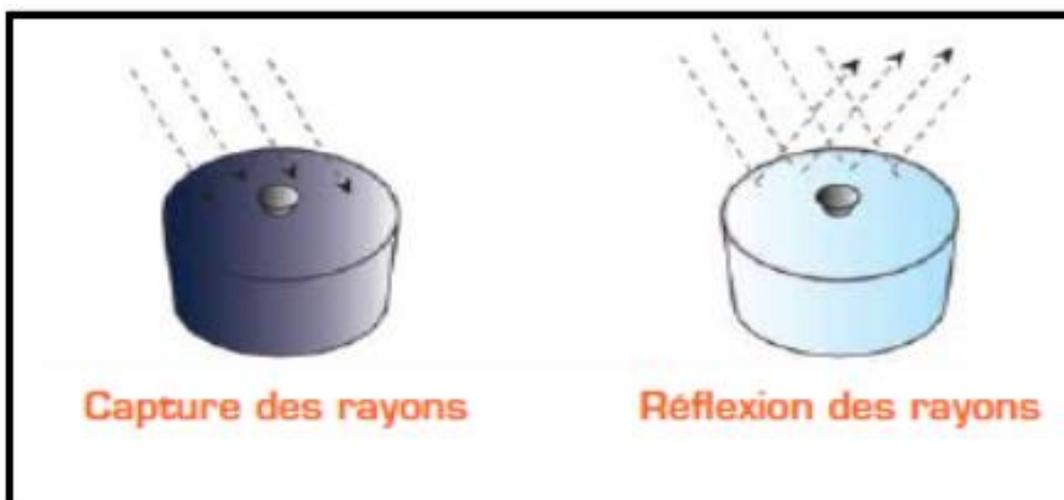


Figure IV-2 : Types de récepteurs utilisés pour la cuisson des aliments [28]

IV.2.4- Durée de la cuisson

La durée de la cuisson solaire dépend de la période de l'année, du moment de la journée, du degré d'ensoleillement, du type de récepteurs utilisé, du plat à faire cuire et de la quantité de nourriture à préparer. Les facteurs essentiels pour la cuisson solaire sont représentés dans la figure suivante :

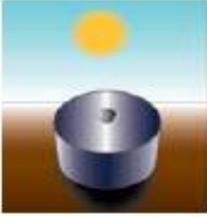
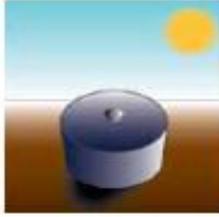
	Cuisson rapide	Cuisson lente
Période de la journée		
Intensité du soleil		
Force du vent		
Epaisseur du récipient		
Quantité et taille de la nourriture		
Quantité d'eau		

Figure IV-3 : Les facteurs essentiels pour la cuisson [28]

IV.2.5- Cuisson alimentaire en fonction des températures

Dans des conditions normales, les cuiseurs solaires simples peuvent atteindre une température de 120 °C. Pour éviter la prolifération des bactéries, il est nécessaire de cuire les aliments à une température supérieure à 60 °C. Entre 82 °C et 91 °C, les aliments cuisent sans brûler, et ne perdent pas leurs nutriments. Les aliments cuisinés peuvent rester sans aucun risque dans le cuiseur jusqu'au repas.

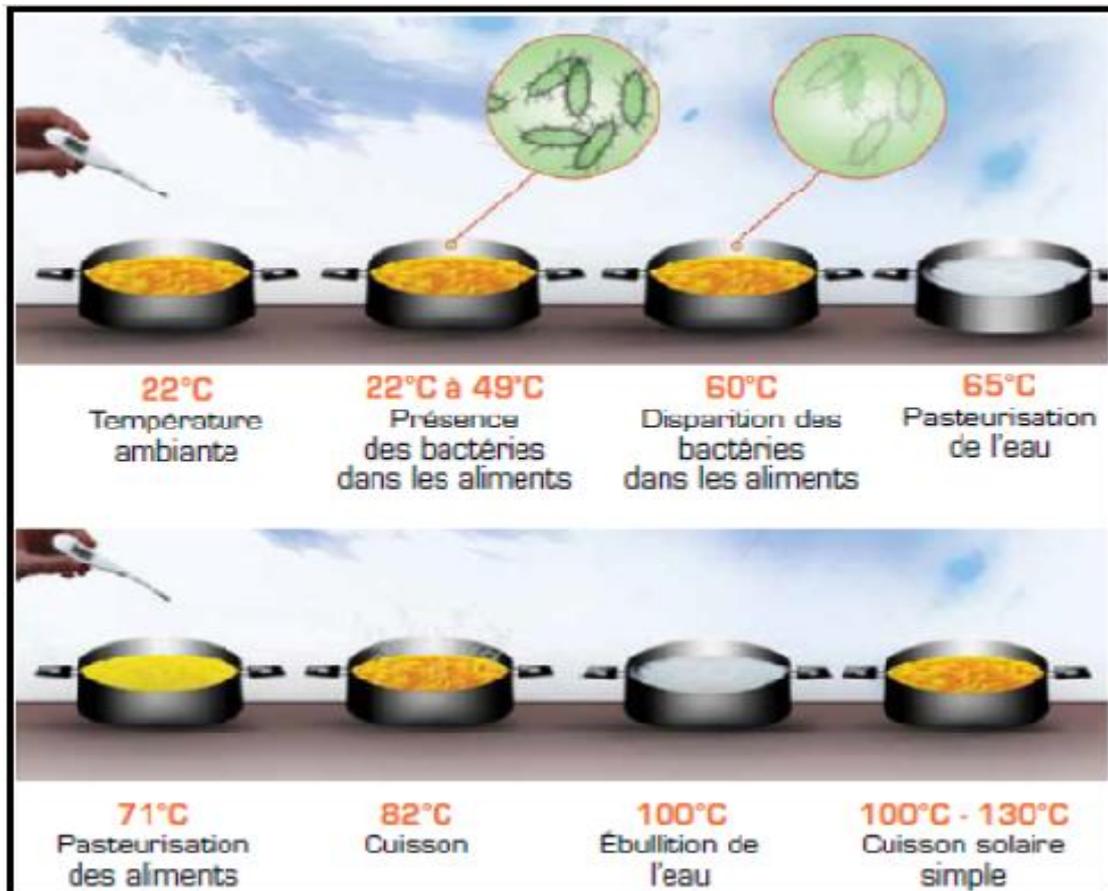


Figure IV-4 : Cuisson alimentaire en fonction des températures [28]

La durée de cuisson des aliments varie selon le type d'aliments. Comme dans la cuisine traditionnelle, les viandes et les soupes doivent être cuites plus longtemps.

En général, la cuisson solaire dure deux fois plus longtemps que la cuisson traditionnelle. Les durées approximatives de cuisson solaire par temps ensoleillé sont présentées dans la figure ci-dessous, ces durées sont données pour deux kilos de nourriture.

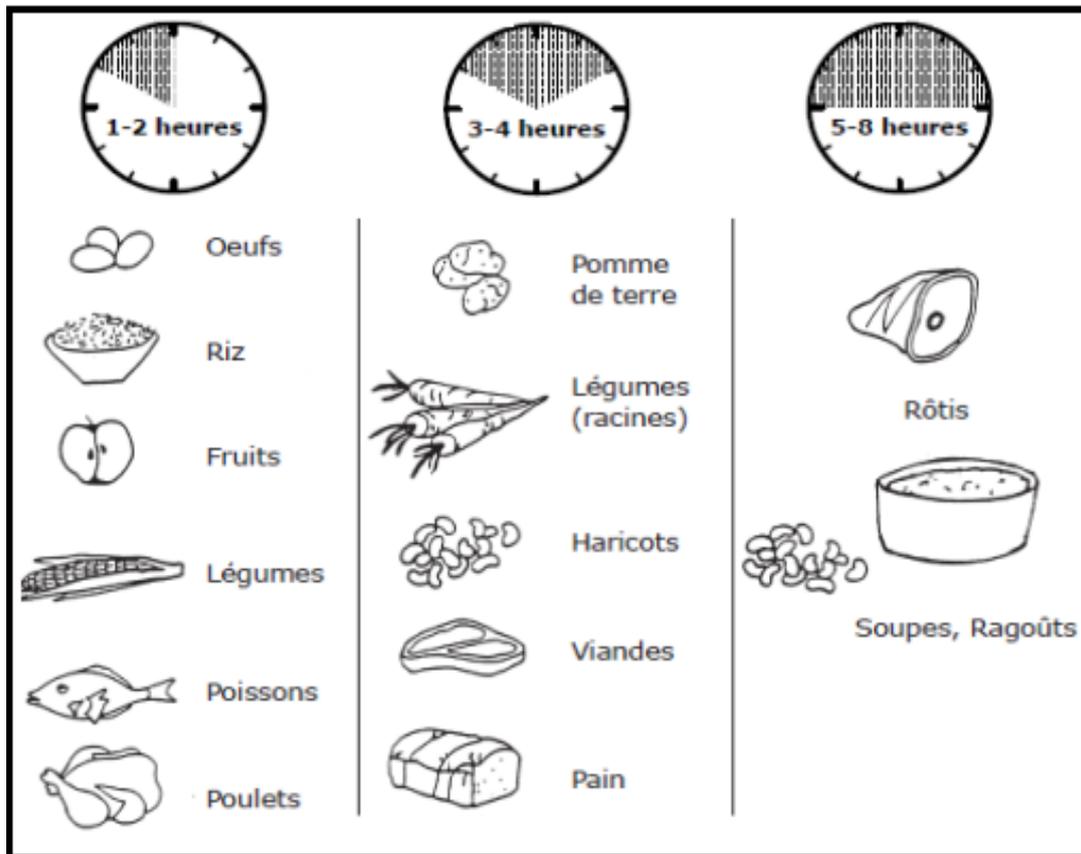
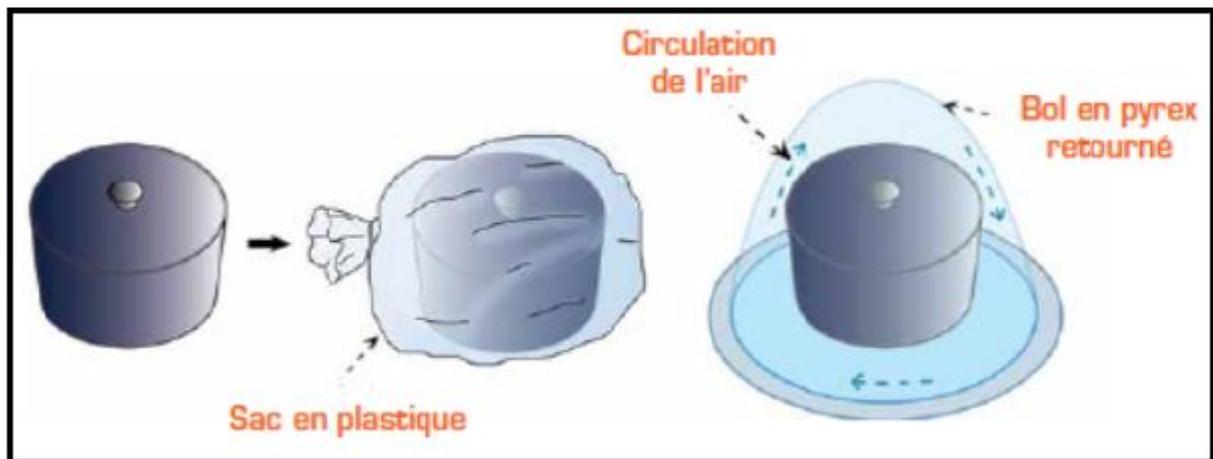


Figure IV-5 : La durée de cuisson de deux kilo de quelques aliments [28]

IV.3- Comment préparer un plat avec un cuiseur solaire

- Pour éviter toute contamination des aliments lors de l'utilisation de cuiseurs solaire, il est indispensable de respecter les règles d'hygiène qui consiste à nettoyer les surfaces qui seront en contact avec les aliments et se laver les mains avec du savon avant de toucher les aliments
- Mettre les aliments dans un récepteur de couleur foncée pour absorber tous les rayons incidents et mettre un couvercle pour éviter l'évaporation d'eau.
- Pour augmenter l'efficacité de cuiseur, on peut mettre l'ensemble dans un attrape-chaaleur transparent qui laisse passer les rayons solaires et empêche la chaleur de sortir à l'extérieur. Utiliser soit un sac en plastique résistant à la chaleur soit un grand bol en verre retourné.



[28]

- Placer le récepteur au foyer du cuiseur solaire.
- Avant de commencer la cuisson, installer le cuiseur dans un endroit bien ensoleillé, l'ensoleillement doit être maximal et continu, ajuster le réflecteur et bien l'orienter vers le soleil d'une façon que son ombre soit directement derrière lui et plus petit que sa taille et non sur le côté pour mieux capter le rayonnement. Réorienter le cuiseur une fois par heure pour obtenir un angle correct et une réflexion des rayons du soleil sur le récepteur, car l'angle idéal permet la réflexion d'un maximum de rayons du soleil sur le récepteur
- Laisser cuire le repas sans remuer la nourriture pendant la cuisson et éviter d'ouvrir le sac pendant la cuisson, car cela entraîne une perte de chaleur.
- Lorsque la cuisson est terminée, porter des lunettes de soleil pour éviter la réflexion du soleil et utiliser des gants de cuisine ou des torchons pour éviter les brûlures.
- Se placer devant le cuiseur dos au soleil afin de créer une ombre pour empêcher les rayons du soleil de passer au réflecteur et éviter de recevoir les rayons réfléchis en plein visage.
- Faire attention à la vapeur qui se dégage lors de l'ouverture du plastique, car elle est très chaude et peut entraîner des brûlures.

CHAPITRE V : Réalisation d'un prototype et discussion des résultats

Introduction

Dans ce chapitre, nous représenterons les différentes étapes de réalisation d'un concentrateur parabolique conçue conformément au modèle théorique étudié au chapitre(III).

Notre expérience a été réalisée au niveau du hall de technologie du département de Génie Mécanique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

V.1- Description générale du montage réalisé

a) La parabole

Deux paramètres doivent être choisis pour décrire entièrement un concentrateur parabolique : le diamètre et la distance focale.

Il est évident que plus le diamètre de la parabole est grand; plus le flux solaire capté est grand, et donc plus l'énergie concentrée au foyer sera importante.

Le seul élément qui limite l'augmentation du diamètre est d'ordre tout à fait pratique. Une parabole trop grande est plus difficile à construire, coûte plus cher et pèse plus lourd.

D'après les résultats théoriques nous avons donc choisi un diamètre de 1 mètre, ce qui nous semble être un bon compromis entre la quantité d'énergie nécessaire qui doit être concentrée et le confort pratique et on choisit une distance focale de 0.5 mètre pour que le foyer ne soit pas plus haut afin de faciliter la manipulation du récepteur et pour être accessible à l'utilisateur. Les caractéristiques géométriques de la parabole sont données dans le tableau ci-dessous :

Diamètre de la parabole	D = 1 m
La distance focale de la parabole	f = 0.5 m
Profondeur de la parabole	P _f = 0.125 m
Surface d'ouverture de la parabole	A _{par} = 0.785 m ²
Angle d'ouverture de la parabole	θ = 106°

La construction de la parabole est réalisée en trois étapes :

- Le squelette

Le squelette est composé de 16 tiges métalliques de 50 cm de longueur que nous avons soigneusement courbées selon l'équation de la parabole $y = \frac{x^2}{2p}$; toutes les tiges se rejoignent au sommet du paraboloïde et elles sont soudées sur un anneau métallique pour maintenir leur forme.

La surface d'ouverture de la parabole est formée par une fine taule flexible et très légère qui nous a permis de former un cercle de 1 mètre de diamètre sur lequel on a posé le squelette

après avoir réalisé des perçages sur son périmètre pour bien le maintenir à l'aide de rivets comme le montre la figure ci-dessous.



Figure V-1 : le squelette de la parabole

- Les baguettes en plastique

Sur les tiges métalliques on a placé des baguettes en plastique flexible de 40 cm sur lesquelles on va pouvoir coller le papier aluminium à l'aide d'un adhésif. Grâce à ces baguettes, le papier aluminium peut prendre la forme de la parabole à chaque fois qu'il est posé sur le squelette pour l'utilisation et on peut ensuite le retirer une fois la cuisson terminée.



Figure V-2 : Mise en place des baguettes en plastique sur le squelette

- **Les triangles en aluminium**

Sur les baguettes en plastique nous avons posé un papier adhésif double face afin de coller le papier aluminium et de bien les étirer et éviter d'avoir des plis car cela pourrait nuire au rendement. Cette opération demande beaucoup d'attention et de précision car les feuilles peuvent facilement se déchirer, se plier ou se froisser.



Figure V-3 : Mise en place des triangles en aluminium sur le squelette

Après avoir collé tous les triangles sur les baguettes on aboutit à la structure suivante :



Figure V-4 : Image d'un réflecteur parabolique

b) La monture

Une fois que la parabole est réalisée, il faut construire une monture sur laquelle celle-ci va se poser.

La monture que nous avons finalement réalisée se compose d'une base fixe formée par deux pieds (1), qui sont reliés entre eux par une tige métallique (2), fixée par 2 boulons de chaque côté afin de les maintenir en place et de stabiliser la structure. Sur la base, on a soudé deux tubes (3) dans le but de réaliser une liaison en rotation avec la parabole. Sur cette dernière nous avons fixé solidement deux bras (4) qui peuvent pivoter en entraînant la parabole, ce qui va permettre d'ajuster son inclinaison selon la hauteur du soleil dans le ciel. Sur ces deux bras nous avons aussi placé une tige (5) sur laquelle est placé le récepteur (6). Cette tige peut se glisser sur les deux bras (4) afin de bien ajuster le récepteur au niveau du foyer et capter un maximum de rayonnement concentré.

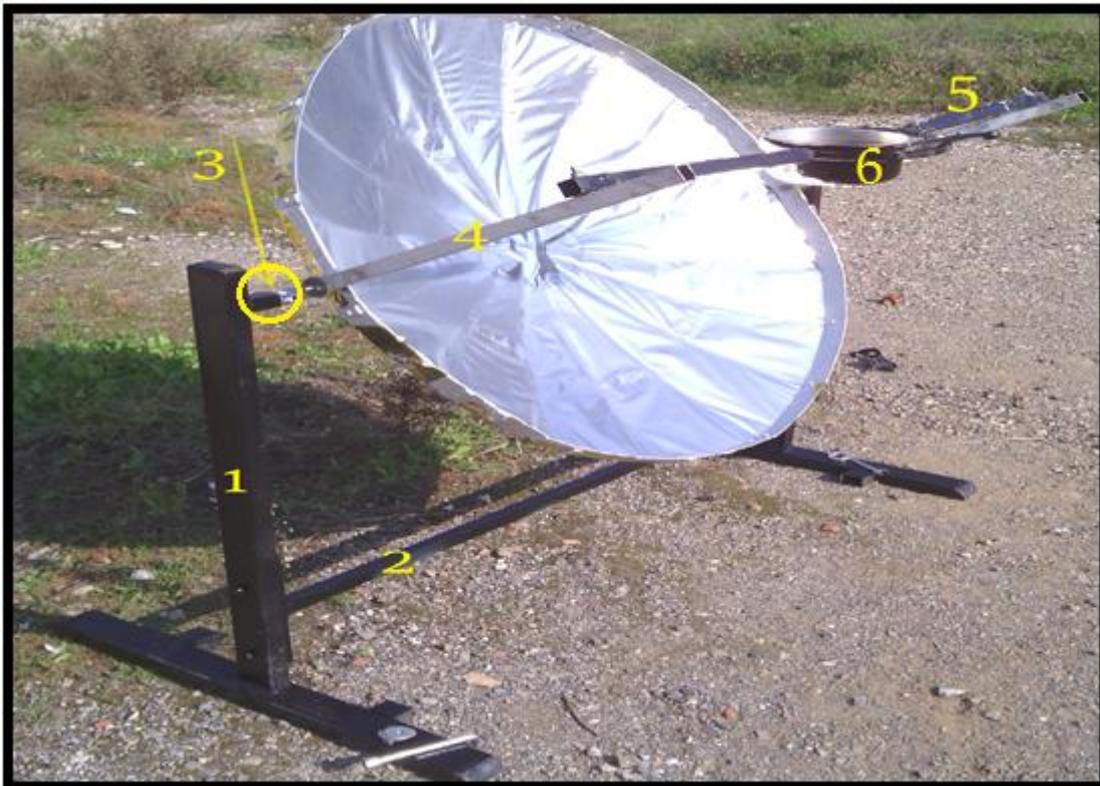


Figure V-5 : L'ensemble parabole posée sur sa monture

c) Le récepteur

Notre récepteur est une simple marmite en aluminium qui a une bonne conductivité thermique et d'une faible épaisseur, elle est peinte en noir afin d'augmenter sa capacité à absorber le

rayonnement solaire, à laquelle il fallait aussi mettre un couvercle pour réduire les pertes de chaleur convection et par évaporation de l'eau.



Figure V.6 Une marmite en aluminium peinte en noir

V.3-Résultats et discussions

Pour connaître l'efficacité du concentrateur on a effectué quelques essais pour des conditions métrologiques et des périodes différentes.

- 1^{er} essai (18-11-2015)

Juste après avoir terminé la réalisation et assemblé tous les éléments du concentrateur, on a directement effectué un test sans aucun appareil de mesure.

A 14 heures on a mis un litre d'eau dans le récepteur sans couvercle sachant qu'à ce moment-là le ciel était couvert de quelques nuages.

Après 17 minutes de temps écoulé, nous avons aperçu des bulles de vapeur d'eau sur le fond du récepteur, on a conclu que l'eau a atteint sa température d'ébullition à pression atmosphérique (soit 100 °C).



Figure V-7 : chauffage d'un litre d'eau avec le concentrateur réalisé

- 2^{eme} essai (19-11-2015 à 14 heures) :

A 14 heures on a mis deux œufs, deux carottes, deux pomme de terre et deux courgettes dans un sac thermique en plastique et on a mis l'ensemble dans le récepteur sans mettre d'eau à l'intérieur après une heure et demi de cuisson on a remarqué que les aliments étaient cuits, nous avons donc placé un thermocouple pour effectuer des mesures à différents endroits comme le montre le schéma suivant :

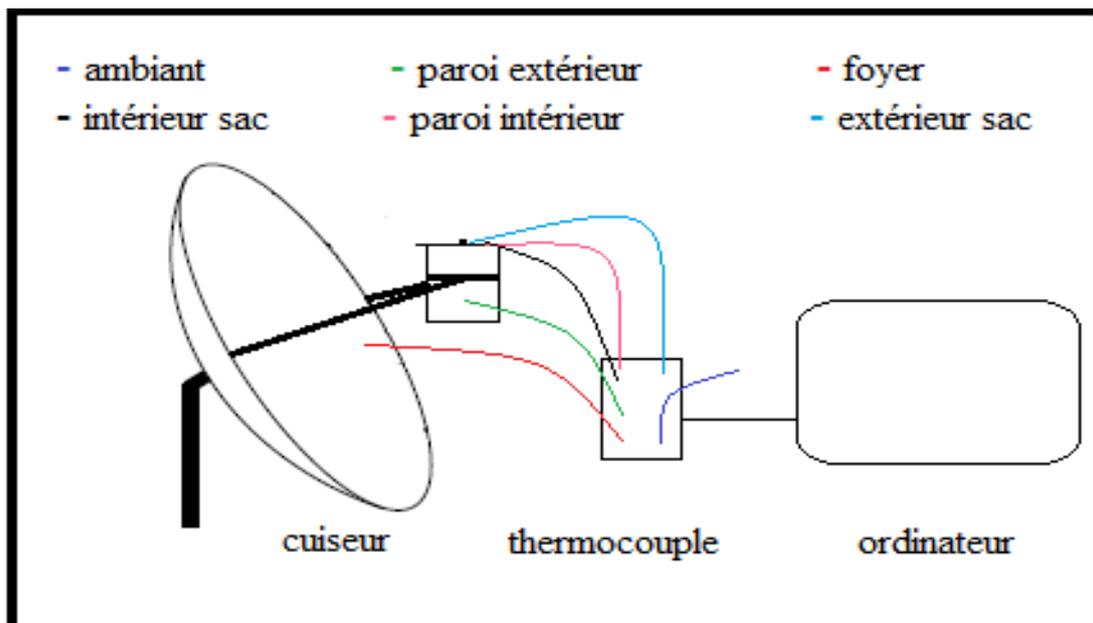


Figure V.8 : Schéma d'acquisition de donnée avec un thermocouple

Le thermocouple mesure les températures des différents endroits avec un pas d'une seconde pendant une période de huit minutes. Les résultats obtenus après chaque trente secondes sont donnés par le tableau ci-dessous :

Temps (S)	Température ambiante	Température Au foyer	Température paroi extérieure	Température paroi intérieure	Température intérieur du sac	Température extérieur du sac
0	22.01	25.14	101.54	95.83	73.69	45.52
30	20.93	24.53	99.9	95.47	73.7	42.79
60	21.23	24.22	98.07	95.11	73.52	44.64
90	21.78	24.58	98.88	96.09	73.62	44.43
120	22.22	24.93	100.16	97.00	73.6	45.32
150	22.6	25.2	97.99	96.2	73.52	47.92
180	21.7	25.21	99.31	97.07	73.52	44.45
210	22.49	25.02	101.65	97.00	73.53	48.88
240	22.40	25.46	99.95	96.31	73.06	48.37
270	22.48	25.14	96.93	93.99	73.09	49.49
300	22.63	25.03	94.13	92.72	73.03	49.66
330	22.2	24.97	87.05	85.96	72.17	41.73
360	22.11	24.72	80.56	85.16	72.41	41.19
390	22.8	25.33	85.86	89.4	72.65	47.51
420	22.66	25.16	86.93	89.75	72.46	48.96
450	22.98	25.31	91.66	90.69	72.58	46.31
480	21.95	25.24	93.09	91.72	72.62	46.67

Tableau V.1 : Les différentes températures mesurées 2eme essai

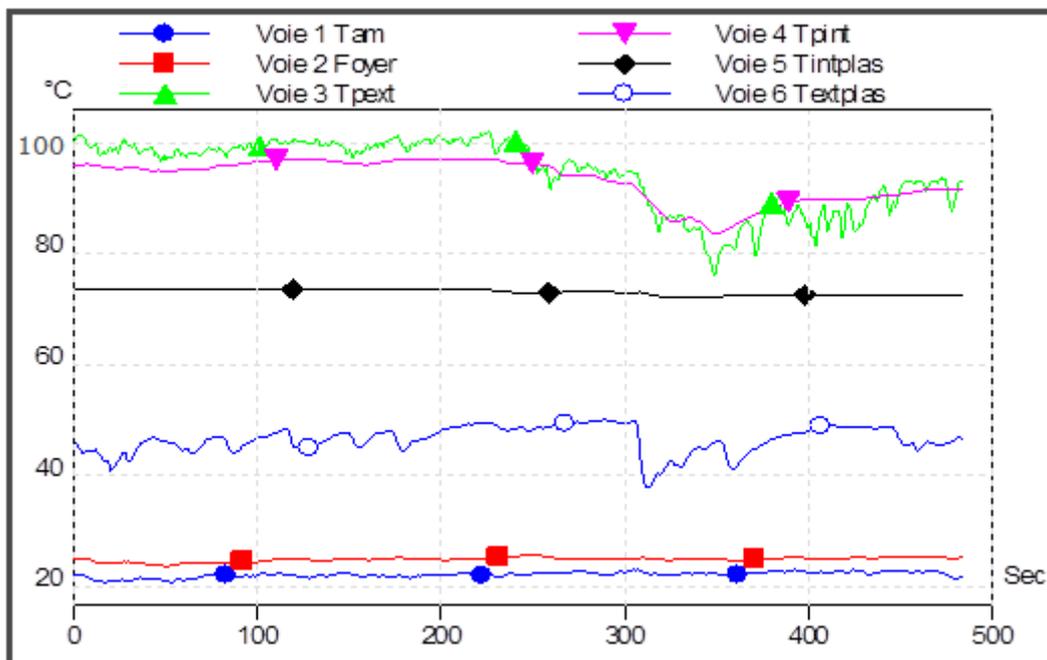


Figure V.9 : L'évolution des températures mesurées du 2eme essai

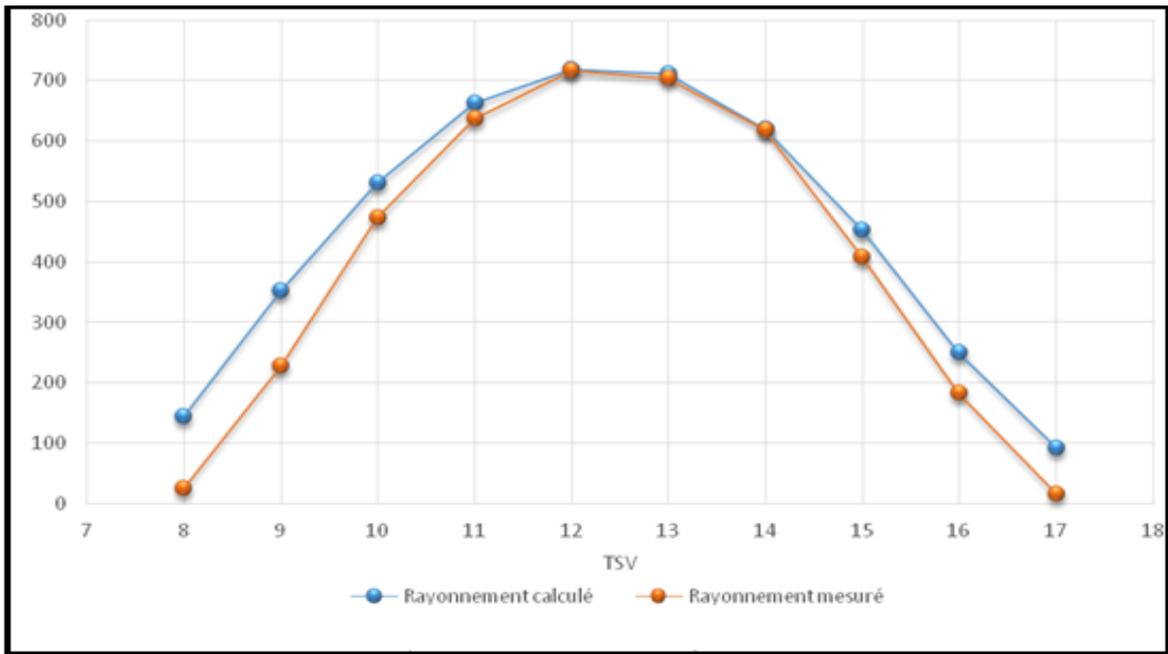


Figure V.10 : L'évolution de l'éclairement mesuré et théorique au cours de la journée référence (3)

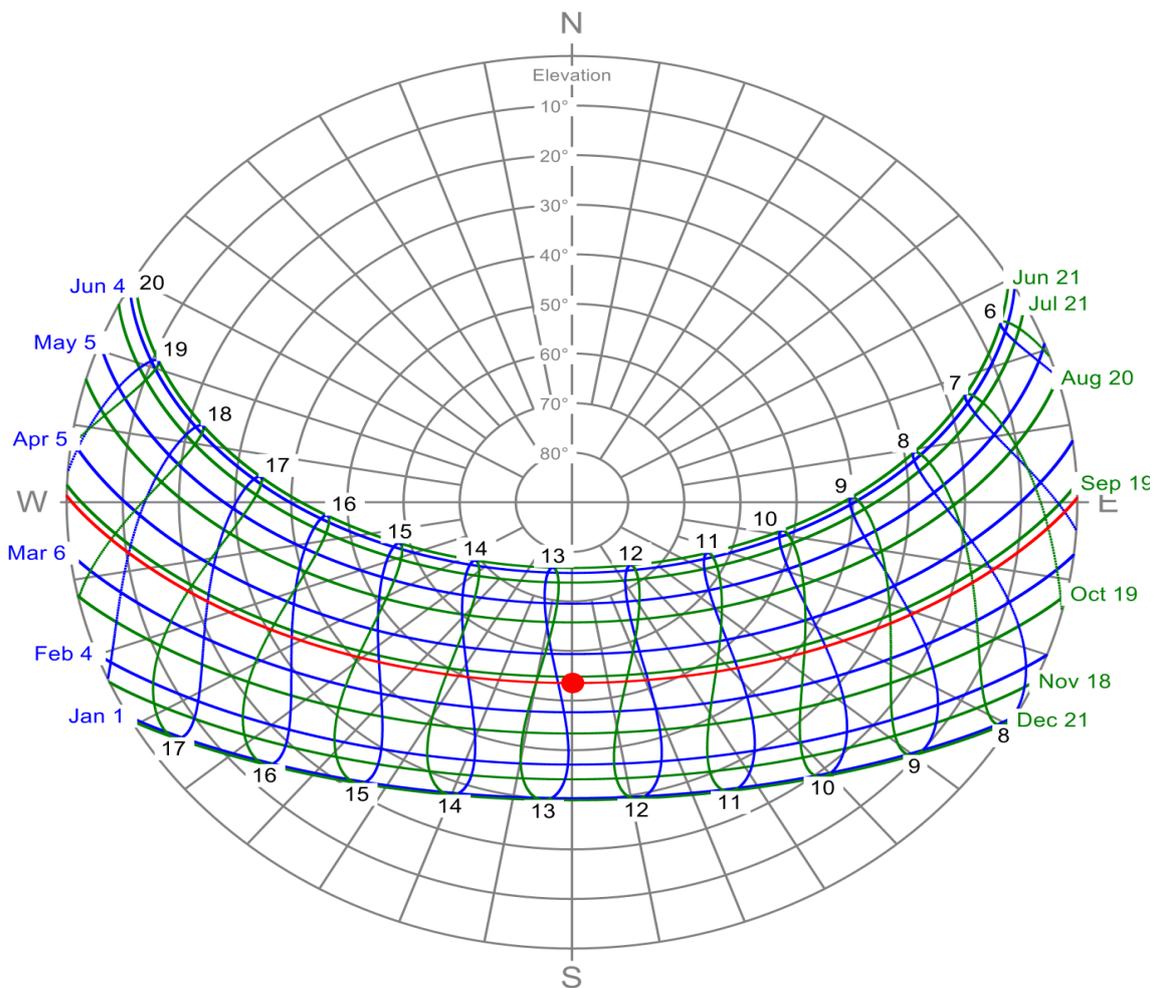


Figure V.11 : Diagramme solaire pour la ville de Tizi Ouzou obtenu avec « SOLAR BEAM »

Discussion des résultats obtenus dans le 2^{ème} essai :

Si on compare les résultats du tableau (V.1) par rapport à ceux du tableau (III.1) on remarque qu'il y a une différence. Ce qui peut s'expliquer par le fait que dans le calcul théorique nous avons supposé que l'aluminium avait un coefficient de réflexion de 0.9, ce qui n'est pas le cas pour l'aluminium utilisé pour notre concentrateur. De plus, l'orientation de la parabole dans l'exemple théorique est automatique sur les deux axes mais dans l'expérience l'inclinaison de la parabole reste fixe et on la réoriente horizontalement toutes les 30 minutes. Cela n'est pas très précis car on le fait manuellement et tout cela va réduire la totalité des rayons à capter et de ce fait va influencer sur la température au niveau du récepteur.

- 3^{ème} essai (21-11-2015) jour nuageux avec du vent :

Cette fois on a tenté une expérience en mettant 3 pommes de terre, 3 œufs, 2 courgettes, 2 carottes dans le récepteur et on a ajouté 1 litre d'eau à l'intérieur. Ce jour-là, il y avait beaucoup de nuages et la vitesse du vent était de 10 m/s environ, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Temps (S)	Température ambiante	Température foyer	Température Paroi ext	Température Paroi int	Température int sac	Température ext sac
0	23.51	25.17	53.43	53.88	36.06	36.88
30	23.64	25.77	47.98	49.26	36.18	38.70
60	23.53	27.30	56.46	56.58	36.31	36.76
90	23.58	26.57	57.88	58.23	36.55	39.48
120	23.57	26.13	56.63	57.33	36.82	38.98
150	23.77	27.28	59.34	59.83	37.10	41.30
180	23.66	26.83	58.05	59.16	37.34	37.43
210	23.55	27.07	55.27	56.36	37.62	39.91
240	23.64	26.74	55.76	56.94	37.90	36.52
270	23.63	26.63	53.76	54.91	38.15	38.88
300	23.60	26.12	52.68	54.05	38.38	41.07
330	23.75	26.03	46.02	47.61	38.62	39.13
360	23.59	26.48	49.50	50.09	38.80	37.07
390	23.60	26.04	51.30	52.54	38.96	38.17
420	23.74	26.18	52.51	53.97	39.12	38.40
450	23.90	26.59	51.31	52.47	39.29	37.11
480	23.80	26.33	52.27	54.13	39.51	39.10

Tableau V.2 : Les différentes températures mesurées 3eme essai

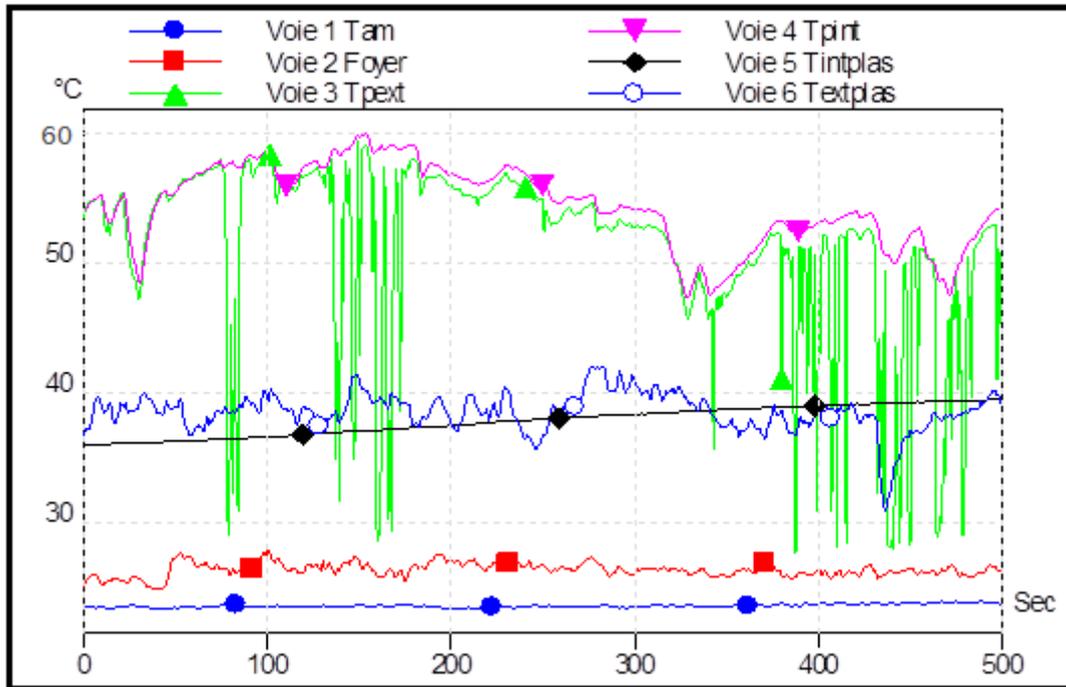


Figure V.12 : L'évolution des températures mesurées du 3eme essai

Discussion des résultats obtenus :

La température à la paroi extérieure du récepteur n'arrive pas à dépasser les 60 °C. Cela s'explique par le fait que l'eau du récepteur absorbe une grande quantité de chaleur pour s'échauffer. De plus, le vent était fort ce jour-là, ce qui a accéléré la convection avec le milieu extérieur. Les pertes par convection sont trop élevées, ce qui a fait baisser de la température de la paroi extérieure.

Le capteur placé sur la paroi extérieur du récepteur s'est décroché plusieurs fois pendant le test à cause du vent, ce qui a engendré des fluctuations sur le graph (vert) qui indique sa température

- 4^{eme} essai (28-11-2015) jour ensoleillé pas du vent :

On a refait le test avec les mêmes quantités que le 3eme essai, à 13 heures et demi, nous avons commencé l'opération et à prendre des mesures durant une heure et demi, les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Temps (min)	Température ambiante	température Foyer	Paroi extérieure	Paroi intérieure	Température aliments	Ambiante récepteur
0	14.41	21.86	25.96	25.64	21.50	26.23
1	14.84	21.63	47.69	56.14	22.17	36.76
2	14.72	21.82	57.15	65.41	22.54	41.17
5	14.83	20.62	64.44	71.86	24.70	53.90
8	14.44	21.45	69.09	76.82	28.34	56.02
13	14.72	23.73	94.15	83.56	35.31	56.28
18	14.66	23.93	103.07	92.05	42.56	63.89

25	14.97	22.67	119.63	111.08	65.47	78.53
30	15.14	26.06	110.8	112.65	71.43	80.73
35	15.81	27.83	121.62	113.91	75.36	85.36
40	15.31	24.17	121.57	116.39	78.94	88.05
45	15.44	25.27	116.14	116.85	82.07	89.31
50	14.58	24.17	123.94	117.58	87.34	92.88
55	15.10	24.82	122.37	118.39	89.56	22.61
60	15.91	25.14	131.06	117.00	89.94	24.47
65	16.44	23.93	134.04	118.30	89.81	25.58
70	16.97	26.60	133.11	117.52	90.89	24.46
75	17.47	25.38	135.45	118.29	91.24	26.81

Tableau V.3 : Les différentes températures mesurées 4eme essai

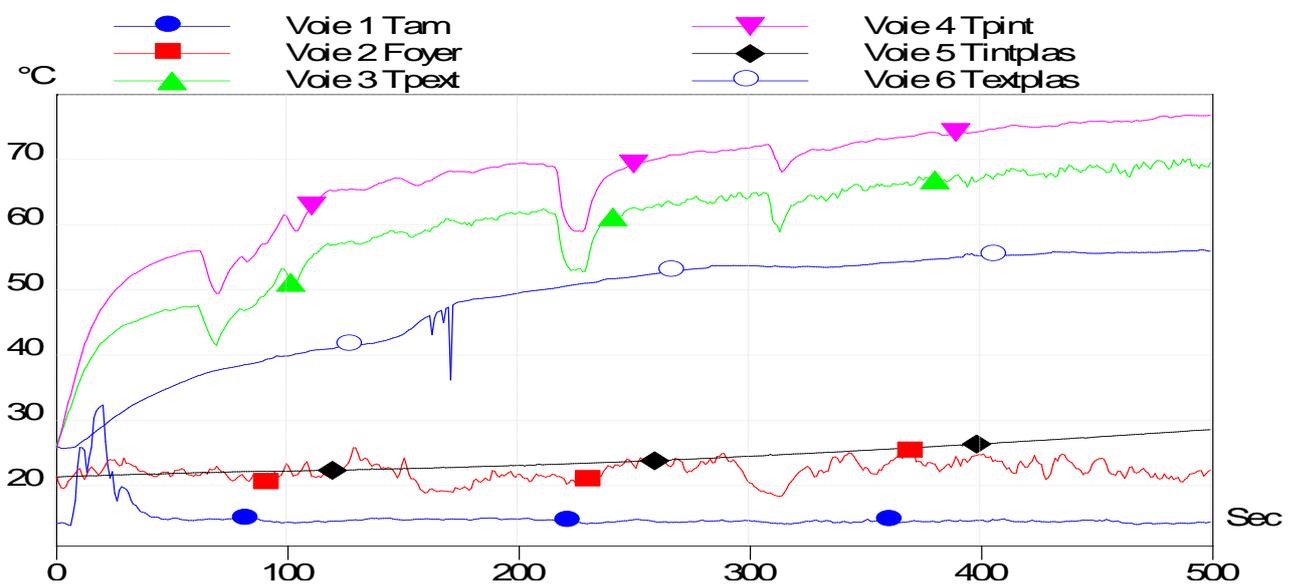


Figure V.13 : L'évolution des températures au début du 4eme essai

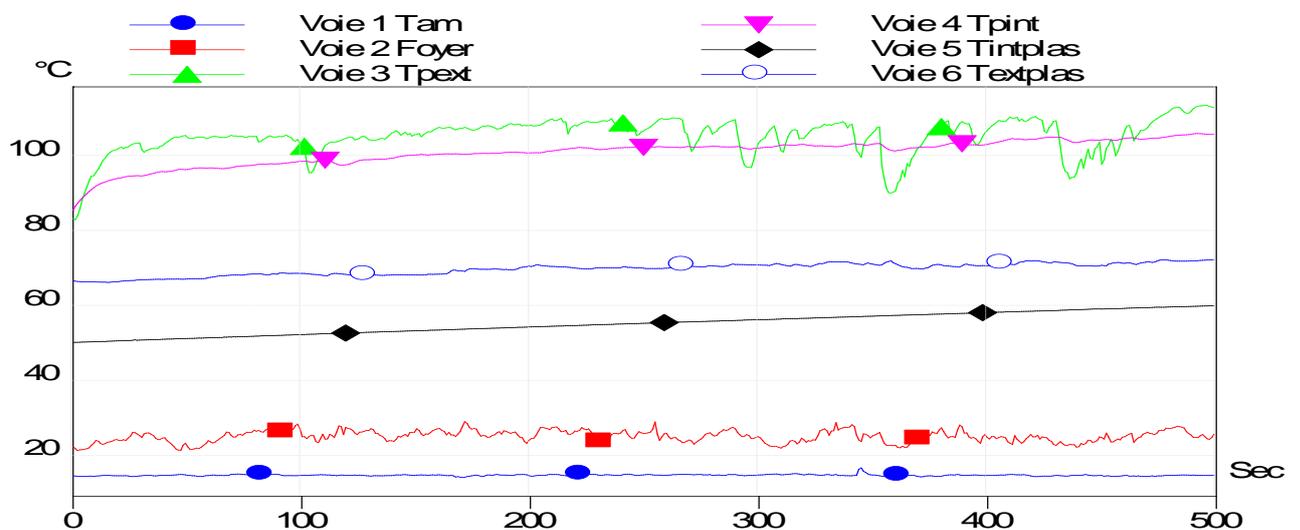


Figure V.14 : L'évolution des températures après 16 minutes

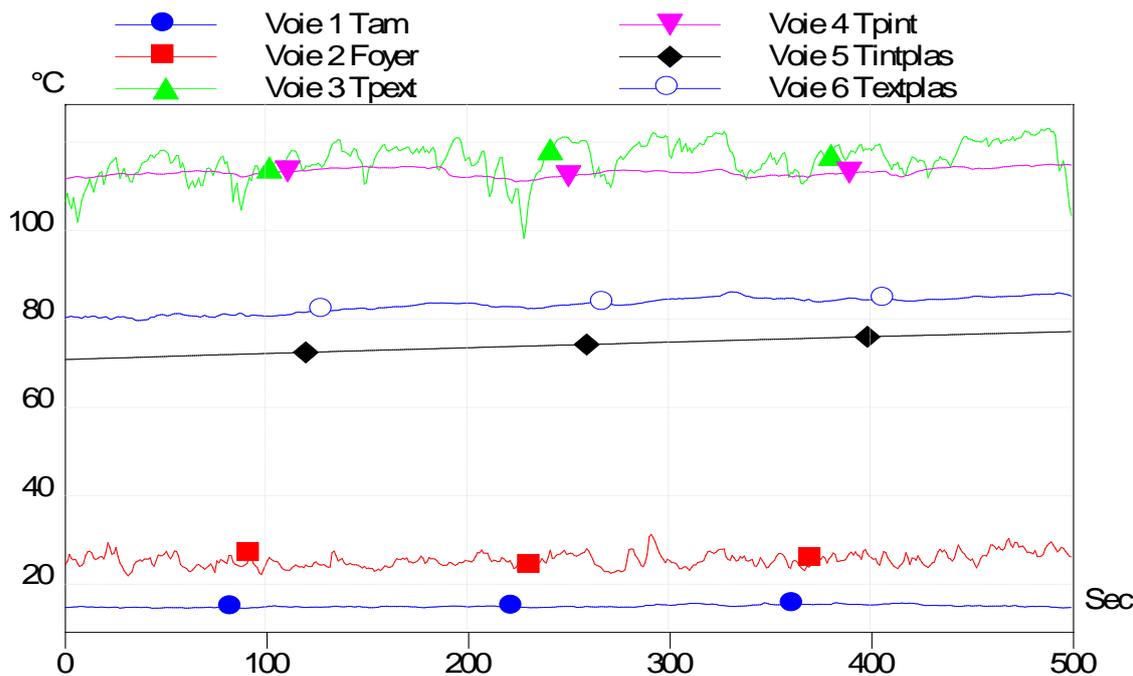


Figure V.15 : L'évolution des températures après 32 minutes

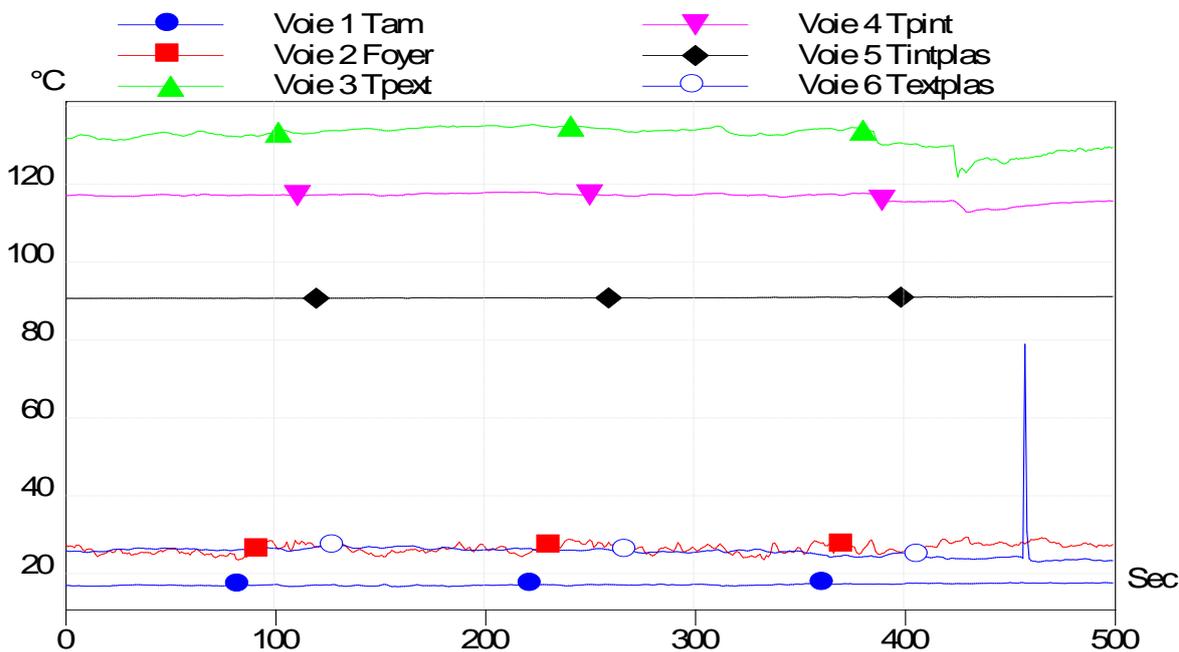


Figure V.16 : L'évolution des températures après 72 minutes

Discussion des résultats obtenus :

On remarque que les températures de paroi (intérieur et extérieur) augmentent rapidement au début puis lentement après une heure de cuisson et se stabilisent aux environs de 125 °C à 135 °C, pendant que la température des aliments atteint son maximum à 90°C

Après 90 minutes de cuisson on a retiré les aliments du récepteur, ils étaient cuits comme le-
montre la figure ci-dessous :

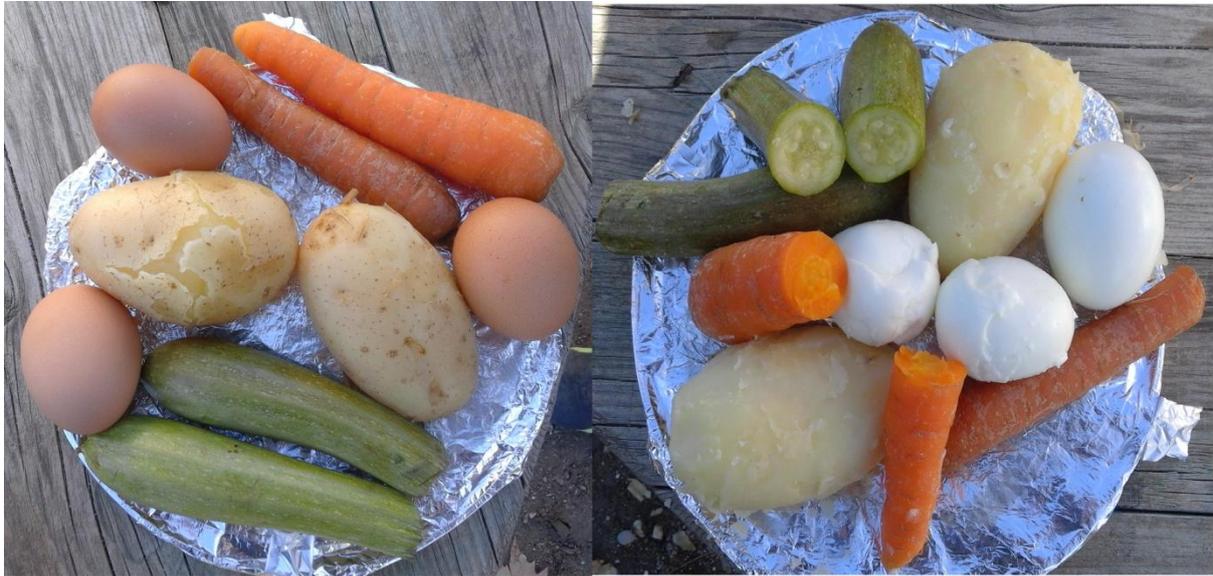


Figure V.17 : les aliments après 90 minutes de cuisson

Conclusion

D'après les essais effectués au cours de ce chapitre les résultats expérimentaux obtenus ne sont pas très éloignés de ceux calculés théoriquement, et cela est dû à des erreurs optiques du concentrateur, la vitesse du vent qui varie durant les expériences, la valeur théorique de l'éclairement est supérieure à la valeur réelle.

Conclusion générale

L'étude que nous avons menée porte sur un concentrateur parabolique, elle nous a permis de connaître le fonctionnement de ce système et de prévoir la température atteinte au niveau de la surface captatrice de récepteur.

Nous avons montré que cette température au niveau de l'absorbeur dépend de plusieurs facteurs dont les plus importants sont :

- La variation de l'éclairement solaire qui varie au cours de la journée et au cours de l'année.
- La géométrie du réflecteur (diamètre, distance focal, angle d'ouverture).
- La nature de la matière réfléchissante du réflecteur (Argent, Aluminium,...)
- La nature du récepteur (acier, cuivre,...), sa géométrie (cylindrique, conique,..) ainsi que ses dimensions.
- La sélectivité de la surface absorbante.

Par contre, l'absence d'appareillage pour mesurer le rayonnement direct (pyrhéliomètre) ne nous a pas permis d'avoir des données de l'éclairement solaire direct, ce qui nous a amené à l'estimer par un modèle théorique. Cette estimation s'est répercutée sur la précision de calcul de la température au niveau du récepteur.

L'utilisation de ce concentrateur pour la cuisson des aliments au niveau du récepteur est intéressante vue la température d'équilibre atteinte au bout d'un temps très court, le rendement du concentrateur devenant faible après un certain temps de chauffage, il faut procéder au changement du contenu du récepteur, ce qui nous permet de conclure que ce type de modèle ne peut être utilisé de façon continue toute la journée. Le temps d'utilisation de ce modèle dépend de la nature de l'application qu'on veut réaliser.

Les domaines d'application de ce système sont multiples, il est destiné à la cuisine solaire ainsi que pour la pasteurisation des alimentations (lait par exemple) la production d'eau chaude sanitaire contenue dans le récepteur, la stérilisation d'instruments médicaux.

Pour améliorer le concentrateur solaire proposé dans cette étude, il est recommandé de lui adjoindre à un système de poursuite automatique du soleil et au lieu du papier aluminium il serait préférable d'utiliser des plaques en aluminium afin d'augmenter le taux de réflexion et d'utiliser également un récepteur de chaleur avec une meilleure conductivité thermique tel que le cuivre.

Enfin nous pensons que l'expérience est à considérer comme étant largement positive en ce qui concerne la compréhension du modèle et la connaissance de la méthode de construction des capteurs solaires paraboliques à moyennes températures.

Le programme informatique développé pour cette étude peut être également utilisé pour n'importe quel système optique à concentration. Toutefois, quelques modifications doivent être apportées à ce programme afin de l'adapter au concentrateur utilisé en introduisant les paramètres physiques adéquats.

Références bibliographiques

- [1] Vincent DESCOMBES, dossier solaire les notions de bases
- [2] **J. Bernard**, Energie solaire Calculs et optimisation. Edition ellipses, 2004.
- [3] **Capderou Michel** Atlas solaire de l'Algérie Tome 2 : Aspect énergétique
- [4] **C. Zidani, F. Benyarou**, Simulation de la position apparente du soleil et estimation des Energies Solaires incidentes sur un Capteur Plan pour la Ville de Tlemcen en Algérie. Rev. Energ. Ren, Vol.6, pp 69-76, 2003.
- [5] **J. M. Chassériaux**, Conversion thermique du rayonnement solaire, bordas Paris.1984.
- [6] **S. Bonned. Et A. Alaphilippe**, Conversion thermodynamique de l'énergie solaire dans des installations de faible ou de moyenne puissance. Energ. Ren : 11ème journées Internationales de thermique. pp.73-80. 2003.
- [7] Concentration du rayonnement solaire, Cahiers de l'AFEDES, n°3 novembre 1973, S.A Editions Européennes de Thermique et industrie, Paris.
- [8] **Zeghib ilhem**, Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire parabolique université mentouri - constantine
- [9] **Mahdi khaled**, Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique
- [10] **Benkhelifa Abdelaziz** «Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur» Master en Génie des procédés.
- [11] **Jacques Pereebois**, Energie solaires, perspectives économiques, Edition du centre National de la recherche scientifique ,1975 .
- [12] **Paul De Neyer**, Energie solaire thermique, Guide des Energies Renouvelables, Mai 2003.
- [13] **J. Breu** 2006 , INSA de Lyon.
- [14] **Housseyn Karoua**, Etude des performances thermique d'un capteur solaire avec effet de concentration de type fresnel
- [15] **R. BERNARD** la cuisson solaire. Energies Renouvelables, Silence Hors série n°4, 1993)
- [16] **Vudichai Neeranartvong**, Etude d'un concentrateur solaire a simple réflexion. Thèse de Docteur-Ingenieur, Institut national polytechnique de Toulouse. Juillet 1983.
- [17] **S. M. Ait cheikh**, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », thèse de Doctorat d'Etat en électronique, Ecole Nationale Polytechnique, soutenue en Décembre 2007.

- [18] **Ziyadou Ahmed** « Etude et conception d'un distillateur solaire à effet de serre » Doctorat en physique, université d'Antananarivo faculté des sciences.
- [19] **M. Boubekri, A. Chaker, I. Zeghib** « Contribution numérique à l'étude du rayonnement solaire incident sur un capteur plan pour le site de Constantine ». Laboratoire de physique Energétique, Université Mentouri, Constantine (25000), ALGERIE.
- [20] **M. Audibert**, la concentration du rayonnement solaire. International center for theoretical physics ' 3ème séminaire sur l'énergie solaire, 6-17 Septembre 1982.
- [21] **M. Kayouche**, système de poursuite du soleil, bilan énergétique et optimisation de réglage. Thèse de Magister. Université de Constantine, 1996.
- [22] **Alain Ferriere et Gilles Flamant**, Captation, Transformation et conversion de l'énergie Solaire par la technologie à concentration. Thème7, Solaire thermique 2002.
- [23] **R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz**, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, 1979
- [24] **A. A. SFEIR, G. GUARRACINO**, Ingénierie des systèmes solaires, application à l'habitat. Technique et documentation 1981.
- [25] **Hay, J. E., Davies, J.A.**, Calculation of The Solar Radiation Incident on An Inclined Surface, Proceedings First Canadian Solar Radiation Workshop, pp. 59-72, (1980).
- [26] **Optical Society of America. 1995.** Handbook of Optics : Devices, Measurements & Properties (volume II)
- [27] **M. Srinivasan, L. V. Kulkarni**, A simple technique of fabrication of parabolic concentrators. Solar energy, volume 22, pp 463-465. Novembre 1978.
- [28] **Christelle Souriau et David Amelin** Fabrication de cuiseurs et séchoirs solaires
- [29] **A. Mefti, M. Y. Bouroubi et A. Khellaf**, Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire De l'Algérie, Rev. Energ. Ren. Vol. 2 (1999) 69-85.
- [30] **Hermime Nora**, Contribution à l'étude du comportement thermique d'un cuiseur solaire boîte installé dans le Nord de l'Algérie
- Sites d'internet consultés**
- [31] <http://www.cder.dz>
- [32] www.solare-bruecke.org
- [33] www.NASA.Org
- [34] <http://www.promes.cnrs.fr/MOYENS/Station/pyrheliometre.htm>
- [35] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/06/Cuiseur_solaire.JPG
- [36] <http://www.promes.cnrs.fr/MOYENS/Station/pyranometre.htm>
- [37] <http://solarcooking.org>
- [38] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0a/Four-solaire-odeillo-02.jpg>

Annexe

Programme MATLAB élaboré pour les calculs théoriques

```
clc
clear all
close all
nj= input (' jour = ');           % jour
m= input (' mois = ');           % mois
n=nj+31*(m-1) ;
if m<3
    d=n
end
if m>=3
    d=n-fix((0.4*m)+2.3)          % numéro du jour dans l'année
end
TL=input (' temps legal heure = '); % le temps légal
HR= input('humidité relative = '); % humidité relative
Tam= input ('température ambiante = '); % température ambiante
Vvent=input('vitesse du vent='); % vitesse du vent
% les données géographiques du lieu:
LST=0;                            % greenwich
L=4.05;                             % longitude du lieu
la=36.7;                             % latitude du lieu
DELTA=1;                             % décalage horaire administratif
% calcul des coordonnées célestes:
% 1) déclinaison
D=23.45*(sind((360*(284+d))/365))
% 2) angle de lever du soleil
omegal=-acosd(-tand(D)*tand(la))
% 3) angle de coucher du soleil
omegac=acosd(-tand(D)*tand(la))
% 4) TSV du lever
TSVL=12+(omegal/15)
% 5) TSV du coucher
TSVc=12+(omegac/15)
% 6) correction du temps:
w=(360/366)*d;
ET=- (0.002-0.4197*cosd(w)+3.2265*cosd(2*w)+0.0903*cosd(3*w)+7.3509*sind(w)+
9.3912* sind(2*w)+0.3361*sind(3*w))
% temps solaire vrai:
TSV=(TL-DELTA)+(((L)*4+ET)/60)
% temps légal du lever et du coucher:
TLL=TSVL+DELTA-(((L)*4+ET)/60)
```

```

TLC=TSVc+DELTA-(((L)*4+ET)/60)
% MIDI TSV:
MIDITSV=12+DELTA-(((L)*4+ET)/60)
% Durée du jour:
Ddj=abs(2*omegal)/15
% angle horaire
omega=(TSV-12)*15
% hauteur du soleil
h=asind(cosd(D) *cosd(omega)*cosd(la)+sind(D)*sind(la))
% iclinison parfaite du concentrateur:
in= 90-h
% azimut du soleil
alphaS= asind(cosd(D)* sind(omega)/cosd(h));
W0=acosd(tand(D)/tand(la))
if ((abs(omega))<W0)
    C1=1;
end
if((abs(omega))>W0)
    C1=-1;
end

if (la*(la-D))>0
    C2=1;
end
if(la*(la-D))<0
    C2=-1;
end
if(omega>=0)
    C3=1;
end
if(omega<0)
    C3=-1;
end
% azimute
alpha=((C1*C2*alphaS)+(C3*((1-(C1*C2))/2)*180))
if TSV<12
    m=-1;
end
if TSV>12
    m=1;
end
% angle d'incidence
teta=(acosd(sind(h)*cosd(in)+cosd(h)*sind(in)))*(m)

```

```

%tracer le graphe:
Diametre=1.2; %Diamètre de la parabole (en m)
p=1.2; %Paramètre de la parabole (2py=x^2)
tetar=teta*(pi/180); %Pour avoir l'angle en radian
Focale=p/2; %Distance focale de la parabole
Profondeur=(1/(2*p))*((Diametre/2)^2); %Profondeur de la parabole
% Tracé de la parabole, son axe et de son foyer
x=-Diametre/2:0.01:Diametre/2;
y=(1/(2*p))*(x.^2);
plot(x,y)
grid on
hold on
axis equal
axis([-0.8 0.8 -0.1 2])
% Tracé des rayons
j=1;
for x2=-Diametre/2:0.05:Diametre/2
% Rayons incidents
y2=(1/(2*p))*(x2.^2);
y1=p;
x1=x2+(abs(y1-y2))*tan(tetar);
X1=[x2 x1];
Y1=[y2 y1];
plot(X1,Y1,'y')
% Rayons réfléchis en rouge
b=atan(x2/p); % angle entre la tan en un point de la parabole et l'axe x
i=tetar+b; % angle incident
r=-i; % angle réfléchi
aprim=r-b; %angle entre les rayons réf du soleil et l'axe de la parabole
y3=p/2;
x3=x2+(y3-y2)*tan(aprim);
XX(j)=x3;
j=j+1;
X2=[x2 x3];
Y2=[y2 y3];
plot(X2,Y2,'r')
end
% Tracé de l'axe optique du foyer et du plan focal
plot(0,p/2,'o') % Foyer
plot([0 0],[0 p/2+0.2],'k') % Axe de la parabole
plot([-Diametre/2 Diametre/2],[p/2 p/2],'k-') % Plan focal
% Calcul du diamètre du foyer (tache sur le plan focal)
Diametre_foyer=abs(max(XX')-min(XX'));

```

```

% Affichage des paramètres
Diametre_parabole=Diametre
Distance_focale=Focale
Diametre_foyer
% gtext('Plan focal')
% gtext('Axe optique')
% gtext('Foyer')
%Eclairage directe sur un plan horizontal:
pvsat=611*(exp((17.25*Tam)/(237.8+Tam)));           %pression de vapeur saturante
pvpas=(HR*pvsat)/100;                             %pression de vapeur en pascal
pv=pvpas*0.0075                                    %pression de vapeur en mmHg
B=0.05;                                             %zone rurale
Tl=2.4+(14.6*B)+0.4*(1+2*B)*log(pv);
I0= 1370 * exp(-(Tl/(0.9 + 9.4 * sind(h))))
SH=I0*sind(h)
%Eclairage direct sur un plan incliné
SI=I0*cosd(teta)
%données géométriques du concentrateur:
Dpar=1;           %Diamètre de la parabole
Drec=0.3;         %Diamètre de la casserole
HAU=0.2;         % hauteur du récepteur
focal=0.5;       %distance focale
% Calcul des surfaces
Apar=pi*((Dpar/2)^2)           %Ouverture de la parabole
Arec=pi*((Drec/2)^2)          %Surface du fond du récepteur
Aref=Apar-Arec                %surface réfléchissant
Alat=pi*Drec*HAU              %surface latérale du récepteur
Atotal=(2*Arec)+Alat          %surface total du récepteur
pf=(Dpar^2)/(16*focal)        %profondeur de la parabole
% la longueur de l'arc
Larc=((Dpar/2)*(sqrt((4*pr/Dpar)+1)))+(2*log(((4*pr/Dpar)+sqrt(((4*pr/Dpar)^2)+1))))
%surface de l'arc parabolique
Aarc= (2/3)*pi*sqrt(2*focal)*(((2*pr)+(2*focal))^3/2)-(2*focal)^3/2
%angle d'ouverture de la parabole FI:
demiFI=atand((Dpar/2)/(focal-pr))
FI=2*demiFI
%propriétés des matériaux utilisé:
ALPHArec=0.75;                %absorbivité du récepteur
ROref=0.9                     %réflexion de la parabole
EPSI=0.04;                   %emissivité infrarouge du récepteur
%concentration geometrique
Cg=(sind(FI)/(0.53))^2
%concentration energetique

```

```

C=((2/(0.53))*(sind(FI/2)))^2
%cocentration ideal
Ci=((4/(0.53))*tand(FI/4))^2
% flux reflichi
Qref=SI*ROref*Aref
%flux absorbé
Qabs=ALPHArec*Qref
%flux utile
Tamk=Tam+273;
hcv=5.7+(3.8*Vvent);      %coefficient de tranfert par convection mixte
SIGMA=5.67*10^-8;      %constante de Stéphane Boltzman
%température du ciel
Tciel=0.0522*(Tam^1.5)
Tcielk=Tciel+273;
Tr0=input('température d equilibre = ')
Tr0k=Tr0+273;
Hr0=5.67*10^(-8)*0.04*((Tr0k)^2+(Tcielk)^2)*(Tcielk+Tr0k)
Qcv=hcv*Atotal*(Tr0k-Tamk)
Qrayo=Hr0*Atotal*(Tr0k-Tcielk)
%flux perdu
Qperdu=Qrayo+Qcv
%flux util
Qutil=Qabs-Qperdu
Teq=(Qabs+((hcv*Tamk)+(Tcielk*Hr0))*Atotal)/((hcv+Hr0)*Atotal);
Teqc=Teq-273
Tr1=input('temperature d equilibre 2 = ')
Tr1k=Tr1+273;
Hr1=5.67*10^(-8)*0.04*((Tr1k)^2+(Tcielk)^2)*(Tcielk+Tr1k)
Teq2=(Qabs+((hcv*Tamk)+(Tcielk*Hr1))*Atotal)/((hcv+Hr1)*Atotal);
Teq2C=Teq2-273
Tr2=input('temperature d equilibre 3 = ')
Tr2k=Tr2+273;
Hr2=5.67*10^(-8)*0.04*((Tr2k)^2+(Tcielk)^2)*(Tcielk+Tr2k)
Teq3=(Qabs+((hcv*Tamk)+(Tcielk*Hr2))*Atotal)/((hcv+Hr2)*Atotal);
Teq3C=Teq3-273
Qcv=hcv*Atotal*(Teq3-Tamk)
Hr3= SIGMA*EPSI*(Teq3^2+Tcielk^2)*(Teq3+Tcielk)
Qray=Hr3*Atotal*(Teq3-Tcielk)
%flux perdu
Qperdu=Qray+Qcv
%flux util  Qutil=Qabs-Qperdu

```