

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



*Université de Ghardaïa*

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'automatique et électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Energie Renouvelable*

**Spécialité :** *Énergies Renouvelables en Electrotechniques*

**Par : BOUHAMIDA Mohammed Abdeldjalil**

**HENICHI Ismail**

**Thème**

***Etude et conception d'un cuiseur solaire a  
réflecteurs compose (cpc) avec tubes sous vide***

**Soutenu publiquement le 30/09/2020**

**Devant le jury :**

<b>AKERMI Faouzi</b>	Maître de Assistant A	Univ de Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>BOUAROUR Kamel</b>	Maître de Conférences A	Univ de Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>KHATTARA Abdelouahab</b>	Maître de Conférences B	Univ de Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>GAMA Amor</b>	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
<b>YETTOU Fatiha</b>	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	<b>Co-encadreur</b>

**Année universitaire 2019/2020**

# *Dédicaces*

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père  
DR BOUHAMIDA SLIMANE, ma mère DR KHELALFA  
DALILA,

Chers parents, qui ont toujours su raviver en moi cette flamme  
d'espoir et je leurs dis :

Merci de m'avoir donnée une bonne éducation.

Merci de m'avoir soutenu et encouragé durant mes études.

Merci d'avoir partagé mes joies et mes peines.

Merci de croire en moi, de m'avoir fait confiance.

Merci pour tout ce que vous m'avez appris et apporté.

Merci pour tout.

*Mohammed Abdeldjalil*

# *Dédicaces*

Je dédier ce travail de fin d'étude à mes chers parents et  
ma famille pour tous leurs efforts en ma vie

Dédicace à ma tante Fatma et sa famille à Metlili

Dédicace à Zolikha, Mariem et Nazha

Aussi a mes chers amis Houcin, Oussama, Abd-aldjalile

Pour tous leurs efforts et patience pour ma réussite et mon  
excellence dans mes études

Dédicace à tous mes collaborateurs en MLN : Abdel-  
Mounem, Abdel-Raouf, Soufiane, Samir, Farouk, Chouaib,  
Abdel-Basit, Farid, Abdel-Aziz, Djamel, Ismail Baamara

*Ismail Henichi*

## ***REMERCIEMENT***

Avant tout, on remercie le BON DIEU le tout puissant qui nous a donné cette volonté, ce courage, et cette patience pour pouvoir parcourir tout ce chemin avec succès durant mes années d'études.

Nos premiers remerciements vont à nos encadreurs de mémoire Monsieur le Docteur GAMA Amor et Madame Docteur YETTOU Fatiha, qui nous a permis d'effectuer nos travaux au sein de l'URAER, merci pour leurs précieux conseils et leurs compétences techniques, leurs encouragements, leurs orientations. Merci pour votre gentillesse, et votre aide qui nous a permis de finaliser ce travail. Merci pour votre contribution que nous a permis d'accomplir ce mémoire.

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

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble de mes professeurs tout le long de ces années d'études.

Nos remerciements vont aussi à messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

## ملخص

بتزايد عدد سكان الكوكب، يتزايد أيضا الطلب على الطاقة وإستنزاف مواردها، وتتزايد إحتياجاته والتي من بينها الطبخ، في الجزائر، الاحتطاب من أجل الطبخ يتسبب في نفاذ الثروة الغابية وبالتالي التصحر و إختلال في النظام البيئي، من جهة أخرى إستخدام الطاقة التقليدية (الغاز الطبيعي) يؤدي الى مشاكل بيئية خطيرة ، هذا المشروع يتمثل في دراسة و تصميم و محاكاة لمطبخ شمسي بلواقط من نوع أنبوب مفرغ من الهواء، ومدعم بعواكس متحركة لتتبع حركة الشمس من أجل نتائج أفضل ومن أجل حلول مثلى لمشاكل سابقة في مجال الطبخ الشمسي والتي من بينها ضعف المردود والذي ينجم عن الحرارة غير الكافية.

**كلمات مفتاحية:** مطبخ شمسي، إشعاع شمسي، طاقة شمسية، أنبوب لاقط مفرغ، عواكس متحركة.

## RÉSUMÉ

Avec l'augmentation de la population de la planète, la demande d'énergie augmente et également l'épuisement de ses ressources, la cuisson est parmi les besoins de l'homme qui accroissent. En Algérie, l'exploitation du bois pour la cuisson entraîne l'épuisement des richesses forestières et donc la perturbation de l'écosystème, d'autre part l'utilisation de l'énergie traditionnelle (gaz naturel) menant à des problèmes environnementaux, ce projet consiste à étudier, concevoir et simuler un cuiseur solaire avec capteur tube sous vide, soutenue par des réflecteurs mobiles pour suivre le mouvement du soleil pour de meilleurs résultats et pour des solutions optimales aux problèmes précédents dans le domaine de la cuisson solaire, qui incluent un faible rendement ce qui est causé par une chaleur insuffisante.

**Mots clés :** cuiseur solaire, rayonnement solaire, énergie solaire, capteur tube sous vide, réflecteurs mobiles.

## ABSTRACT

With the increase in the planet's population, the demand for energy and the depletion of its resources also increase, cooking is among the increasing human needs. In Algeria, logging for cooking entails the depletion of forest resources and therefore the disruption of the ecosystem, on the other hand the use of traditional energy (natural gas) leading to environmental problems, this project is to study, design and simulate a solar cooker with evacuated tube sensor, supported by movable reflectors to follow the movement of the sun for best results and for optimal solutions to previous problems in the field of solar cooking, which include a low efficiency which is caused by insufficient heat.

**Keywords:** solar cooker, solar radiation, solar energy, evacuated tube collector, movable reflectors

**LISTE DES FIGURES**

Figure I. 1 : Deux prototypes de cuiseurs solaires réalisés et testés à l’URAER Ghardaïa. <sup>[18]</sup> .....13

Figure I. 2 : Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs. <sup>[22]</sup> .....15

Figure I. 3 : Un cuiseur à panneaux.....15

Figure I. 4 : Un cuiseur boîte. ....16

Figure I. 5 : Un cuiseur parabolique. ....17

Figure I. 6 : Cuiseurs solaires à stockage de chaleur sensible avec support de stockage : (a) l’huile à moteur, (b) l’huile végétale. <sup>[18]</sup>.....18

Figure I. 7 : Schéma d’un cuiseur solaire à stockage de chaleur latente de type boîte avec PCM <sup>[18]</sup>.  
.....19

Figure I. 8 : Schéma de cuiseurs solaires à stockage latente avec PCM intégré en mode indirect utilisant : (a) des capteurs plans, (b) des capteurs sous vides. <sup>[18]</sup> .....20

Figure I. 9 : (a) Cuiseur cylindro-parabolique ; (b) système de poursuite solaire, réalisé par AL-Soud et al. <sup>[26]</sup> .....21

Figure I. 10 : (a) cuiseur parabolique ; (b) système de poursuite solaire réalisé par Abu-Malouh et al. <sup>[27]</sup> .....22

Figure I. 11 : (a) Cuiseur séchoir- pyramide <sup>[28]</sup>, (b) cuiseur chauffe-eau <sup>[29]</sup>.....22

Figure I. 12 : Cuiseurs boîte fabriqué et testé par Nahar <sup>[38]</sup> : (a) avec un seul réflecteur ; (b) avec deux réflecteurs .....23

Figure I. 13 : Schéma du cuiseur boîte avec réflecteurs : (a) exposés par la face supérieure.....24

Figure I. 14 : Schéma du cuiseur boîte avec double exposition étudié par Amer.....25

Figure I. 15 : Un cuiseur parabolique. ....25

Figure I. 16 : (a) Cuiseur cylindro-parabolique étudié par Richard Petela <sup>[41]</sup>, (b) schéma du cuiseur cylindro-parabolique testé par Ozturk <sup>[42]</sup>.....26

Figure II. 1 Carte du monde d’irradiation normale directe DNI <sup>[10]</sup>.....30

Figure II. 2 : Ressources énergétiques solaires : potentiel de l’Algérie <sup>[11]</sup>.....31

Figure II. 3 : Analyse spectrale du rayonnement solaire <sup>[13]</sup>.....32

Figure II. 4 : Les différentes composantes du rayonnement solaire sur un plan horizontal. <sup>[14]</sup>.....33

Figure II. 5 : Pyrhéliomètre pour la mesure de l’éclairement direct normal. ....34

Figure II. 6 : Pyranomètre pour la mesure de rayonnement global et diffus. ....35

Figure II. 7 : Albédo mètre pour la mesure de rayonnement solaire réfléchi. <sup>[15]</sup> .....	35
Figure II. 8 : Héliographe pour la mesure de l'insolation.....	36
Figure II. 9 : Coordonnées terrestres <sup>[44]</sup> .....	37
Figure II. 10 : variation de la déclinaison solaire en fonction du jour de l'année. ....	40
Figure II. 11 : Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil.....	41
Figure II. 12 : Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.....	42
Figure II. 13 : Analyse spectrale du rayonnement solaire. ....	43
Figure II. 14 : Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire. ....	46
Figure III. 1 Le cuiseur solaire de type capteur sous vide avec réflecteurs.....	51
Figure III. 2 : La configurations de la source lumineuse et le choix des options du mapping de l'éclairage concentré.....	54
Figure III. 3 :insertions des réflecteurs. ....	55
Figure III. 4 : La simulation du comportement optique des rayons solaires reçus et réfléchis par les réflecteurs de cuiseur. ....	56
Figure III. 5 : Résultats de la simulation optique de cuiseurs de type capteur sou vide avec un réflecteur. ....	57

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau III. 1 : Les dimensionnent de différentes parties de cuiseur solaire.....51

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
t	Temps	Heure
N	Numéro du jour	[-]
Np	Angle journalier	rad
$\varphi$	Latitude du lieu	rad
$\lambda$	Longitude du lieu	rad
<b>z</b>	Altitude du lieu	m
$\omega$	Angle horaire	rad
$\delta$	Déclinaison solaire	rad
$\gamma_s$	Hauteur du soleil	rad
$\theta_z$	Angle zénithal	rad
$\theta_{az}$	Azimut du soleil	rad
$\theta_i$	Angle d'incidence des rayons solaires	rad
$\theta_{vp}$	Angle entre la surface verticale contenant la normal sur le plan et la verticale passant par le centre du disque solaire	rad
$\gamma_p$	Inclinaison du plan	rad
$\theta_p$	Orientation du plan	rad
TL	Facteur de trouble de Linke	[-]
TLc	Facteur de trouble de Linke corrigé par pression atmosphérique	[-]
$B_A$	Coefficient d'Angstrom	[-]
$W_v$	Hauteur d'eau condensable	cm
$m_A$	Masse d'air optique	[-]
$\delta_R$	Épaisseur totale optique de Rayleigh	[-]
p	Pression atmosphérique	Pa
$P_0$	Pression atmosphérique au niveau de la mer	Pa
$\varepsilon$	Facteur d'excentricité	[-]
$I_0$	Constante solaire	W/m <sup>2</sup>
$G_0$	Eclairement extraterrestre	W/m <sup>2</sup>
$IB_h(\gamma_s, TL)$	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$ID^h(\gamma_s, TL)$	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$IG^h(\gamma_s, TL)$	Eclairement global incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$IN(\gamma_s, TL)$	Eclairement direct normal	W/m <sup>2</sup>
$IB^i(\gamma_s, TL)$	Eclairement direct incident sur un plan quelconque	W/m <sup>2</sup>
$ID^i(\gamma_s, TL)$	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque	W/m <sup>2</sup>
$IG^i(\gamma_s, TL)$	Eclairement global incident sur un plan quelconque	W/m <sup>2</sup>
Trb( $\gamma_s, TL$ )	Transmittance de l'éclairement direct	[-]
Trd(TL)	Transmittance de l'éclairement diffus	[-]

**TABLE DES MATIERES**

Dédicaces\_

REMERCIEMENT\_

RÉSUMÉ (Arabe, Français, Anglais) .....	I
LISTE DES FIGURES .....	II
LISTE DES TABLEAUX .....	IV
NOMENCLATURE .....	V
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
CHAPITRE I : Généralités sur le solaire et l'état de l'art des systèmes de cuisson solaire .....	4
I.1    Introduction.....	5
I.2    Energies renouvelables.....	5
I.2.1    Définition des énergies renouvelables .....	5
I.2.2    Importance des énergies renouvelable.....	5
I.2.2.1    Changement climatique .....	5
I.2.2.2    Augmentation de la demande d'énergie .....	6
I.2.2.3    Limitation des réserves de combustible fossile.....	7
I.2.3    Les sources des énergies renouvelables.....	8
I.2.3.1    L'énergie solaire.....	8
I.2.3.2    L'énergie éolienne .....	8
I.2.3.3    L'énergie géothermique .....	8
I.2.3.4    La puissance hydraulique.....	8
I.2.3.5    L'énergie biomasse.....	9
I.2.4    Applications de l'énergie solaire.....	9
I.2.4.1    Solaire passif .....	9

I.2.4.2	Solaire actif .....	9
I.2.5	Classement des applications de l’Energie solaire active.....	9
I.2.5.1	Énergie solaire thermique .....	10
I.2.5.2	Énergie solaire photovoltaïque.....	11
I.2.6	Avantages des énergies renouvelables.....	11
I.3	L’historique de la cuisson solaire.....	12
I.4	La cuisson solaire.....	14
I.4.1	Le principe de fonctionnement d’un cuiseur solaire .....	14
I.4.2	Les températures et temps de cuisson.....	14
I.5	Les modèles de base des cuiseurs solaires.....	15
I.5.1	Le cuiseur à panneaux.....	15
I.5.2	Le cuiseur boîte .....	16
I.5.3	Le cuiseur parabolique.....	16
I.6	L’état de l’art sur les cuiseurs solaires .....	17
I.6.1	Les cuiseurs stockeurs d’énergie .....	17
I.6.1.1	Stockage de chaleur sensible.....	17
I.6.1.2	Stockage de chaleur latente.....	18
I.6.2	Les cuiseurs suiveurs du soleil .....	20
I.6.3	Les cuiseurs boîtes à usage multiple (cuiseurs hybrides) .....	22
I.7	Cuiseurs solaires à travers le monde .....	23
I.7.1	Les cuiseurs de type boîtes.....	23
I.7.1.1	Les cuiseurs du type boîte sans et avec réflecteurs .....	23
I.7.1.2	Les cuiseurs type boîte à double exposition.....	24
I.7.2	Les cuiseurs solaires à concentration ponctuelle ou linéaire .....	25

I.7.2.1	Les cuiseurs à concentration de type parabolique .....	25
I.7.2.2	Les cuiseurs à concentration de type cylindro-parabolique .....	26
I.7.3	Les cuiseurs solaires à capteurs non-concentrateurs .....	26
I.7.3.1	Les cuiseurs solaires à capteurs plans.....	26
I.7.3.2	Les cuiseurs solaires à capteurs sous vide .....	27
I.8	Les avantages et les inconvénients des cuiseurs solaires .....	27
I.8.1	Les avantages des cuiseurs solaires .....	27
I.8.2	Les inconvénients des cuiseurs solaires .....	27
I.9	Conclusion .....	28
CHAPITRE II : Gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire .....		29
II.1	Introduction.....	30
II.2	Gisement solaire.....	30
II.2.1	Gisement solaire mondial .....	30
II.2.2	Ressources solaires de l'Algérie .....	31
II.3	Eclairement solaire.....	32
II.3.1	Eclairement ou irradiation .....	32
II.3.2	Répartition spectrale de L'éclairement solaire .....	32
II.3.3	Types de l'éclairement solaire .....	33
II.3.3.1	Eclairement global .....	33
II.3.3.2	Eclairement direct .....	33
II.3.3.3	Eclairement diffus et réfléchi.....	33
II.4	Appareils de mesure de l'éclairement solaire .....	33
II.4.1	Mesure de l'éclairement direct (le Pyrhéliomètre) .....	33
II.4.2	Mesure de l'éclairement diffus et global (le Pyranomètre) .....	34

II.4.3	Mesure de l'éclairement solaire réfléchi (Albédo mètre).....	35
II.4.4	Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe).....	35
II.5	Paramètres géométriques.....	36
II.5.1	Coordonnées géographiques terrestres.....	36
II.5.1.1	La latitude.....	36
II.5.1.2	La longitude.....	37
II.5.1.4	Le méridien.....	37
II.5.2	Paramètres horaires.....	38
II.5.2.1	Temps solaire.....	38
II.5.2.2	Durée astronomique du jour.....	38
II.5.2.3	Angle horaire.....	38
II.5.2.4	Déclinaison solaire.....	39
II.5.3	Paramètres de position.....	40
II.5.3.1	Hauteur du soleil.....	40
II.5.3.2	Azimut du soleil.....	41
II.6	Paramètres atmosphériques.....	41
II.6.1	Masse atmosphérique.....	41
II.6.2	Epaisseur optique de l'atmosphère.....	42
II.6.3	Influence de l'atmosphère sur l'éclairement solaire.....	43
II.7	La modélisation du rayonnement solaire par Matlab.....	44
II.7.1	Eclairement extra-terrestre.....	44
II.7.1.1	Constante solaire.....	44
II.7.1.2	Correction de la distance terre-soleil.....	44
II.7.2	L'angle d'incidence.....	45

II.7.3	L'éclairage solaire reçu sur une surface horizontale.....	46
II.7.3.1	L'éclairage direct reçu sur une surface horizontale .....	47
II.7.3.2	L'éclairage diffus reçu sur une surface horizontale .....	47
II.7.3.3	L'éclairage global reçu sur une surface horizontale .....	47
II.8	Conclusion .....	48
CHAPITRE III : Étude et conception du cuiseur solaire .....		49
III.1	Introduction.....	50
III.2	Conception mécanique du cuiseur .....	50
III.2.1	Description du cuiseur solaire PTC .....	50
III.2.2	Dimensionnement et conception du cuiseur PTC sous logiciel SolidWorks .....	51
III.3	Simulation optique du cuiseur .....	54
III.3.1	Simulation optique avec le logiciel TracePro.....	54
III.3.2	Résultats obtenus et discussion.....	55
III.4	Conclusion .....	59
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		60
Bibliographie.....		62

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les énergies sont dites “renouvelables“ tant qu’elles dépendent du système écologique de la terre, d’une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d’énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités.

Les principales sources d’énergie renouvelable sont le soleil, le vent, la biomasse, les marées, les vagues marines et océaniques et la chaleur des profondeurs de la terre.

L’énergie solaire est en tête de la liste des sources en raison de son abondance, mais aussi en raison de sa distribution dans la nature, plus que tout autre type d’énergie renouvelable.

Vu qu’on a une forte consommation mondiale d’énergie, D’où la nécessité de trouver de nouvelles sources d’énergie.

Dans les régions isolées du Sahara où l’approvisionnement en gaz butane est très difficile, l’homme est contraint de compter sur l’exploitation du bois des quelques arbustes restants tels que les acacias et les palmiers pour cuire sa nourriture et ça entraîne l’épuisement des richesses forestières et donc la perturbation de l’écosystème. L’utilisation de la cuisson solaire apparaît comme une alternative intéressante pour répondre à ce besoin vital sans compromettre la biodiversité végétale saharienne et en limitant les émissions de gaz à effet de serre.

Le cuiseur solaire est une technologie qui permet de fournir de la chaleur de manière naturelle et renouvelable, pour la cuisson, il utilise souvent la technique de la concentration des rayons solaires et/ou le phénomène de l’effet de serre.

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire concerne la conception et la simulation et l’étude des performances d’un cuiseur solaire de type capteur sous vide et avec des réflecteurs mobiles.

Notre mémoire se présente selon le plan suivant :

Commençant par une introduction générale, ensuite :

- Le premier chapitre à faire une recherche sur l’état de l’art sur les systèmes à cuisson solaires, une étude concernant des généralités sur ses derniers et les différents types, suivi d’un bref historique et évolution de cuiseur solaire.

- Le deuxième chapitre est consacré présente le gisement solaire et la modélisation de l'éclairement solaire, et comprendre les caractères du soleil qui affecte la terre, orientation et inclinaison d'une Surface, rayonnement solaire, éclairement et l'irradiation.
- Dans le troisième chapitre, on va présenter une conception mécanique et une étude et une simulation optique de notre cuiseur solaire avec une évaluation de leurs performances, interprétation et discussion des résultats obtenus. Finalement une conclusion générale contenant un résumé des trois chapitres avec des perspectives envisagées.

**CHAPITRE I :**  
**Généralités sur le solaire et**  
**l'état de l'art des systèmes de**  
**cuisson solaire**

### **I.1 Introduction**

C'est en 1987 qui a été défini le concept du développement durable comme suit : « satisfaire les besoins du présent sans hypothéquer la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins ». <sup>[1]</sup>

Ce concept implique de s'intéresser au développement de nouvelles sources d'énergie et de minimiser les rejets affectant l'environnement.

Les combustibles fossiles apparaissent comme une ressource finie et économiquement limitée, induisant des émissions affectant l'environnement et contribuant au changement climatique. Un système énergétique durable doit intégrer des sources d'énergies renouvelables et des chaînes combustibles à faible émissions, accessibles à des coûts acceptables. Malgré le fait que la mise en place de nouvelles infrastructures énergétiques prend plusieurs décennies, un nombre croissant de grandes compagnies s'impliquent dans le développement et la commercialisation de ces nouvelles technologies. <sup>[2]</sup>

### **I.2 Energies renouvelables**

#### **I.2.1 Définition des énergies renouvelables**

Les énergies sont dites "renouvelables" tant qu'elles dépendent du système écologique de la terre, de l'insolation et de l'énergie géothermique de la terre. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. <sup>[3]</sup>

#### **I.2.2 Importance des énergies renouvelable**

##### **I.2.2.1 Changement climatique**

L'augmentation de l'effet de serre augmente la température globale de la surface de la planète. Or, du fait de l'activité humaine, la concentration des gaz à effet de serre a explosé depuis la période préindustrielle (1750-1800). La concentration de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), principal gaz à effet de serre, a augmenté de 30% depuis l'ère préindustrielle. Les effets combinés de tous les gaz

à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane, ozone,...) équivalent aujourd'hui à une augmentation de 50% du CO<sub>2</sub> depuis cette période. <sup>[4]</sup>

Depuis 1860, la température moyenne à la surface de la terre a augmenté de 0,6°C. Différents scénarios prospectifs prévoient que d'ici 2100, cette température devrait encore augmenter entre 1,5 et 6°C si les filières énergétiques et les habitudes de consommation actuelles ne sont pas modifiées. Cette augmentation considérable s'accompagnerait, en particulier, d'une montée du niveau des mers de 20 cm à 1 m. Si l'évolution du climat apparaît irréversible, il est possible de ralentir cette évolution en diminuant de manière significative les émissions de gaz à effet de serre.

Les puits naturels de CO<sub>2</sub> que sont les sols, les arbres et les océans ne seraient capable de résorber qu'un peu moins de la moitié de la production de CO<sub>2</sub> d'origine humaine (produite en 2000). Afin de stabiliser la concentration de CO<sub>2</sub> à son niveau actuel, il faudrait donc réduire immédiatement de 50 à 70% les émissions de ce gaz. Si cette réduction brutale est impossible, il est cependant urgent d'agir, car on se trouve face à un problème cumulatif. En effet, la durée de vie du gaz carbonique dans l'atmosphère étant de l'ordre du siècle, il faudra plusieurs générations pour obtenir la stabilisation des concentrations de CO<sub>2</sub> à un niveau acceptable. <sup>[4]</sup>

Le CO<sub>2</sub> est produit par la combustion de tous les combustibles fossiles : pétrole, gaz et charbon. Les rejets de CO<sub>2</sub> sont environ deux fois plus importants pour le charbon que pour le gaz naturel, ceux liés au pétrole se situant entre les deux.

Au début des années 2000, la répartition par secteur des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde est la suivante : production électrique 39%, transport 23%, industrie 22%, résidentiel 10%, tertiaire 4% et agriculture 2%. Cette répartition est cependant très différente d'un pays à l'autre. Par exemple, en France où seulement un dixième de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles, le secteur des transports est responsable de plus de 40% du CO<sub>2</sub> émit dans l'atmosphère.

### **I.2.2.2 Augmentation de la demande d'énergie**

On appelle « énergie fossile », l'énergie que l'on produit à partir de roches issues de la fossilisation des êtres vivants : pétrole, gaz naturel et charbon. Elles sont présentes en quantité limitée et sont non renouvelables.

Le pétrole est l'énergie fossile la plus utilisée. Il est concentré d'énergie idéal : liquide, il est facilement transportable. En le brûlant en petites quantités, on obtient suffisamment d'énergie pour faire tourner des moteurs qui entraînent toutes sortes de véhicules et permettent à toutes sortes de machines de fonctionner. De plus, on peut le transformer en une grande quantité de produits qui sont devenus les matières premières de notre environnement quotidien : plastiques, textiles synthétiques... et bien d'autres produits divers et variés. <sup>[4]</sup>

Dans la seconde moitié du 20e siècle, le pétrole, porté notamment par le développement du transport routier, a largement remplacé le charbon.

En 2000, La consommation énergétique mondiale était d'environ une dizaine de Gtep (tep = tonne équivalent pétrole, 1 tep correspond à l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole). Les combustibles fossiles représentent environs 8 Gtep.

De très nombreux scénarios énergétiques sont élaborés chaque année par des organismes spécialisés dans le domaine de l'énergie. Ces scénarios pour la demande d'énergie en 2050 vont de 15 à 25 Gtep. Cela est dû à l'augmentation de la population mondiale, l'accès progressif à l'électricité et les besoins croissants des pays en voie de développement. <sup>[5]</sup>

### **I.2.2.3 Limitation des réserves de combustible fossile**

Les réserves connues du pétrole sont d'environ 40 ans de consommation, à consommation inchangée. Cependant, les avis des experts varient entre 20 ans et 80 ans suivant qu'ils prévoient un accroissement de la consommation ou la découverte de nouvelles réserves.

Les réserves connues de gaz naturel sont de plus de 60 ans à consommation inchangée et l'on trouve chaque année plus de gaz que nous n'en consommons. Mais si l'on remplaçait le pétrole et le charbon par le gaz pour réduire les émissions à effet de serre, les réserves ne seraient plus que de 17 ans. L'abandon du nucléaire au profit du gaz par certains pays pourrait accélérer la consommation des ressources. Le charbon est le combustible fossile dont les réserves sont les plus importantes. Ces réserves sont estimées à plus de 200 ans. <sup>[5]</sup>

### **I.2.3 Les sources des énergies renouvelables**

#### **I.2.3.1 L'énergie solaire**

Se manifeste sous forme de chaleur solaire à basse température, chaleur solaire à haute température, électricité éolienne et photovoltaïque. La chaleur solaire à basse température est produite par l'absorption de la lumière du Soleil par des surfaces assombries qui la convertissent en chaleur pour être utilisée pour chauffer de l'eau ou d'autres fluides.

La chaleur solaire à haute température, au contraire, est obtenue en faisant concentrer la lumière du Soleil et les fluides de chauffage à haute température pour générer de l'électricité.

Le photovoltaïque (appelé aussi électricité solaire) est la transformation directe du composant ultraviolet de la lumière du Soleil en électricité dans des endroits appropriés. <sup>[6]</sup>

#### **I.2.3.2 L'énergie éolienne**

Est générée par les vents issus de turbulences causées par le réchauffement (inégal) de l'atmosphère par la chaleur solaire. La plupart des parcs éoliens sont aujourd'hui constitués d'éoliennes (connectées en réseau) qui produisent directement de l'électricité à partir du vent. Les moulins à vent –qui ont été des applications du vent au début du siècle dernier - sont pour la plupart utilisés aujourd'hui pour le pompage de l'eau. <sup>[6]</sup>

#### **I.2.3.3 L'énergie géothermique**

Se manifeste sous forme d'eau chaude ou de vapeur et peut être utilisée pour le chauffage ou pour la production d'électricité dans certaines régions spécifiques. Actuellement les technologies utilisant l'énergie géothermique favorisent la production de l'électricité et sont encore à un stade de développement embryonnaire. <sup>[6]</sup>

#### **I.2.3.4 La puissance hydraulique**

Le principe consiste à utiliser l'énergie mécanique de l'eau pour faire tourner une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité. Cette forme d'énergie est essentiellement produite en contrebas des barrages hydrauliques et parfois en travers des cours d'eau et canaux artificiels à

l'aide de microcentrales. La puissance produite dépend de la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau.<sup>[6]</sup>

### **I.2.3.5 L'énergie biomasse**

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie.

La capacité de l'atmosphère à absorber sans danger des substances toxiques est depuis longtemps dépassée. L'utilisation de pétrole, de gaz naturel, de charbon et d'uranium comporte encore d'autres risques : ces ressources sont seulement disponibles en quantité limitée, leurs prix sont en forte augmentation et elles créent des dépendances politiques et économiques. Grâce aux énergies renouvelables, nous disposons de sources d'énergie qui peuvent être utilisées sans qu'elles émettent de substances toxiques, et qui se renouvellent constamment par des processus naturels si bien que, mesurée à l'échelle de la vie humaine, elles seront disponibles à l'infini.<sup>[6]</sup>

## **I.2.4 Applications de l'énergie solaire**

### **I.2.4.1 Solaire passif**

Les systèmes solaires passifs ne nécessitent pas d'énergie supplémentaire pour fonctionner et ont donc des coûts d'exploitation nuls, n'émettent pas de gaz à effet de serre et peuvent avoir de faibles coûts d'entretien, les techniques d'exploitation de cette forme d'énergie solaire ne font appel à aucun équipement mécanique ou électrique. Elles se produisent de façon passive.<sup>[7]</sup>

### **I.2.4.2 Solaire actif**

L'énergie solaire active classe les technologies liées à l'utilisation de l'énergie solaire qui utilisent des équipements mécaniques ou électriques pour améliorer les performances ou pour traiter l'énergie obtenue en la convertissant en énergie électrique ou mécanique. Ces équipements peuvent être des ventilateurs, des pompes à eau, etc.

## **I.2.5 Classement des applications de l'Energie solaire active**

Les applications de l'énergie solaire active peuvent être classées en deux types :

- Énergie solaire thermique
- Énergie solaire photovoltaïque

La plupart des capteurs solaires thermiques à basse température sont généralement situés sur des supports fixes, mais auraient des performances supérieures s'ils pouvaient suivre le Soleil sur son chemin. [8]

### **I.2.5.1 Énergie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique profite des propriétés de la thermodynamique pour augmenter la température d'un fluide en augmentant son énergie thermique et donc son entropie. Dans cette forme d'utilisation de l'énergie solaire, l'électricité n'est produite que dans les centrales solaires thermoélectriques.

Les systèmes d'eau chaude qui ne sont pas basés sur le système des pompes utilisées thermosiphon eau et ventilateurs pour faire circuler l'eau dans leurs circuits. Pour cette raison, ces systèmes seraient classés comme énergie solaire active. En revanche, les systèmes d'eau solaire qui utilisent un thermosiphon, la circulation de l'eau est effectuée au moyen de la différence de densité entre l'eau chaude et l'eau froide, ils n'ont pas besoin de mécanismes externes et, par conséquent, ils sont classés comme systèmes d'énergie solaire passive.

La majorité des capteurs solaires sont placés sur des supports fixes avec une orientation calculée afin qu'ils puissent capturer autant le rayonnement solaire pendant la journée et tout au long de l'année. Mais ces collecteurs seraient plus efficaces s'ils pouvaient modifier leur orientation vers le Soleil en fonction du jour de l'année et de l'heure.

Il existe des systèmes permettant de modifier l'orientation des capteurs solaires. Dans le cas où ces systèmes sont mécaniques, ils seraient des systèmes d'énergie solaire actifs.

Dans le cas de l'énergie solaire thermique concentrée, il est nécessaire d'installer des systèmes de surveillance solaire. Ce type d'installation doit concentrer le rayonnement solaire reçu en un point, les miroirs doivent donc adapter leur fonction en fonction de la position du Soleil.

Généralement, la fonction de ce type de système est utilisée dans les centrales solaires thermoélectriques dans le but de produire de l'électricité. [8]

### **I.2.5.2 Énergie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque est clairement un système d'énergie solaire actif. Grâce à l'effet photovoltaïque, les panneaux photovoltaïques peuvent générer de l'électricité qui passera ensuite par des transformateurs et d'autres éléments externes.

Semblable à l'énergie solaire thermique, les panneaux solaires peuvent être orientés au moyen d'un petit moteur électrique pour les orienter plus efficacement vers le Soleil. Ce moteur serait un autre élément extérieur. [8]

### **I.2.6 Avantages des énergies renouvelables**

Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux, car ces dernières sont en général propres, elles existent en quantité illimitée (contrairement aux énergies fossiles).

**Sûreté :** En les utilisant en majorité, on retrouverait une stabilité climatique, économique, environnementale et sociale surtout en développant de grandes centrales thermiques. La sûreté est l'un des avantages principaux, car il existe de très faibles risques d'accident.

**Peu de déchets :** Elles génèrent également peu de déchets, et ces déchets sont parfois recyclables.

La décentralisation des énergies renouvelables est aussi un facteur positif très important pour développer certains territoires et le développement local. Le marché du travail concernant ces énergies représente presque un million deux cent mille emplois surtout dans le photovoltaïque, l'éolien et la biomasse. Ces énergies respectent l'environnement pendant leur fabrication, leur fonctionnement et lors de leur fin de vie, au moment de leur démantèlement.

Ces énergies renouvelables permettent de réduire considérablement l'émission de CO<sub>2</sub>. Elles ne généreraient pas non plus de déchets radioactifs dangereux et leurs ressources seraient infinies grâce au vent, à l'eau et au soleil.

### I.3 L'historique de la cuisson solaire

L'histoire des cuiseurs solaires commence dès l'antiquité lorsque l'on a commencé à maîtriser l'énergie solaire pour créer du feu. C'est le cas lors de la cérémonie d'ouverture des premiers Jeux Olympiques de 776 av. JC. La flamme olympique était allumée par les rayons du soleil à l'aide du skaphia, l'ancêtre du miroir parabolique. <sup>[16]</sup>

Ce n'est que quelques années plus tard que l'on voit apparaître le premier cuiseur solaire à effet de serre. En 1774, Horace-Bénédict de Saussure met au point un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du soleil, l'hélio thermomètre. Il ressemble à des boîtes "chaudes" avec des parois isolées et un ou plusieurs vitraux. Horace-Bénédict obtient avec cet appareil une température de 88°C.

Cette invention est à la fois l'ancêtre du cuiseur solaire et du capteur solaire plane. Cette dernière invention intéresse le scientifique français Marcellin Ducarla-Bonifas qui l'améliore en y rajoutant des miroirs de manière à réfléchir plus de rayonnement à l'intérieur de la boîte. <sup>[17]</sup>

En 1976 dans l'état de l'Arizona aux États-Unis, Barbara Kerr et Sherry Cole ont développé des cuiseurs de type boîte faciles à construire à domicile. Elles ont aussi travaillé sur des modèles de dessiccateurs et stérilisateurs solaires de nourriture. Le professeur Robert Metcalf, de l'Université de Californie à Sacramento continue même aujourd'hui à faire des études scientifiques sur la pasteurisation solaire de l'eau et de partager ses connaissances dans beaucoup de pays. Kerr, Cole, Metcalf et d'autres ont fondé 'Solar Cookers International (SCI)' en 1987 pour diffuser la cuisson solaire pour le bénéfice des peuples et des environnements à travers le monde. Aujourd'hui plusieurs centaines d'ingénieurs, d'éducateurs, de coopérants et bénévoles, de fonctionnaires, de clubs, d'universités, de groupes religieux et de programmes pour réfugiés partagent leurs connaissances de cuisson solaires qui est devenu 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 <sup>[18]</sup>.

Les graves sécheresses des années 1990 en Afrique ont incité SCI à améliorer un cuiseur solaire ultra simple initialement développé par Roger Bernard (France). Ce développement a

conduit à diffuser les plans pour la fabrication du nouveau CookKit à travers le monde entier et de distribuer le CookKit à plus de 30000 familles de réfugiés en Afrique orientale.

Actuellement, en Algérie la cuisson solaire est toujours méconnue par le grand public. Le projet lancé en 2004 et inscrit au programme de l'URER/MS 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 [18].

En 2017, l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa) a également portée un grand intérêt au développement et à la vulgarisation des cuiseurs solaires, en lançant un programme ambitieux, s'inscrivant dans le cadre de ces activités ; qui porte sur la conception et la réalisation de nouveaux de cuiseurs solaires, qui a abouti à la proposition d'un cuiseur solaire de type boîte avec une surface réceptrice inclinée, et la réalisation d'un cuiseur solaire parabolique (Fig I.1), des cartes des efficacités des cuiseurs à travers le territoire national ont été proposées à cet effet. [19].



Figure I. 1 : Deux prototypes de cuiseurs solaires réalisés et testés à l'URAER Ghardaïa. [18]

## **I.4 La cuisson solaire**

### **I.4.1 Le principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire**

La plupart des cuiseurs solaires fonctionnent de la manière suivante : le rayonnement solaire est converti en chaleur. Cette chaleur est conservée pour cuire les aliments dans la durée.

Dans certains cas, les apports solaires sont multipliés par l'ajout de miroirs. L'énergie utilisée par les cuiseurs solaires est une énergie renouvelable qui provient du Soleil. Ce rayonnement solaire est un ensemble d'ondes électromagnétiques constituées de photons. La Terre qui est située à près de 150 millions de kilomètres du Soleil, reçoit en permanence une énergie solaire de 170 millions Gigawatt parmi laquelle environ 30% est réfléchi par les nuages, l'atmosphère et le sol, et 20% est absorbés par l'atmosphère et les nuages. Le rayonnement solaire est ensuite converti en chaleur par un absorbeur, dont sa surface est généralement sombre.

Dans la plupart des cuiseurs solaires, cette fonction est assurée par le récipient contenant les aliments. Dans un souci d'efficacité, la chaleur doit être conservée au maximum. Les cuiseurs solaires de type "boîte" utilisent un vitrage pour garder la chaleur à l'intérieur de la boîte par effet de serre. Au niveau des autres parois, l'ajout d'une isolation classique améliore la conservation de la chaleur. Enfin, les rayons solaires peuvent être déviés par des miroirs et permettre l'apport d'énergie supplémentaire vers le foyer du cuiseur solaire <sup>[20]</sup>.

### **I.4.2 Les températures et temps de cuisson**

Les nouvelles cuisinières solaires signalent souvent qu'elles testent la température de leur cuiseur solaire à vide et ne la voient atteindre que des températures avoisinant les 120 ° C (248 ° F). Ils se demandent s'il fait assez chaud pour cuire lorsque les recettes demandent 175 ° C ou même 230 ° C. Cette température plus basse (120 ° C) est suffisamment chaude pour presque tous les types de cuisson (Fig I.2). N'oubliez pas que l'eau ne doit pas atteindre plus de 100 ° C (212 ° F) à moins d'être dans un autocuiseur.

Ainsi, si vous cuisinez des aliments contenant de l'eau, ils ne peuvent pas non plus chauffer plus longtemps. <sup>[19]</sup>

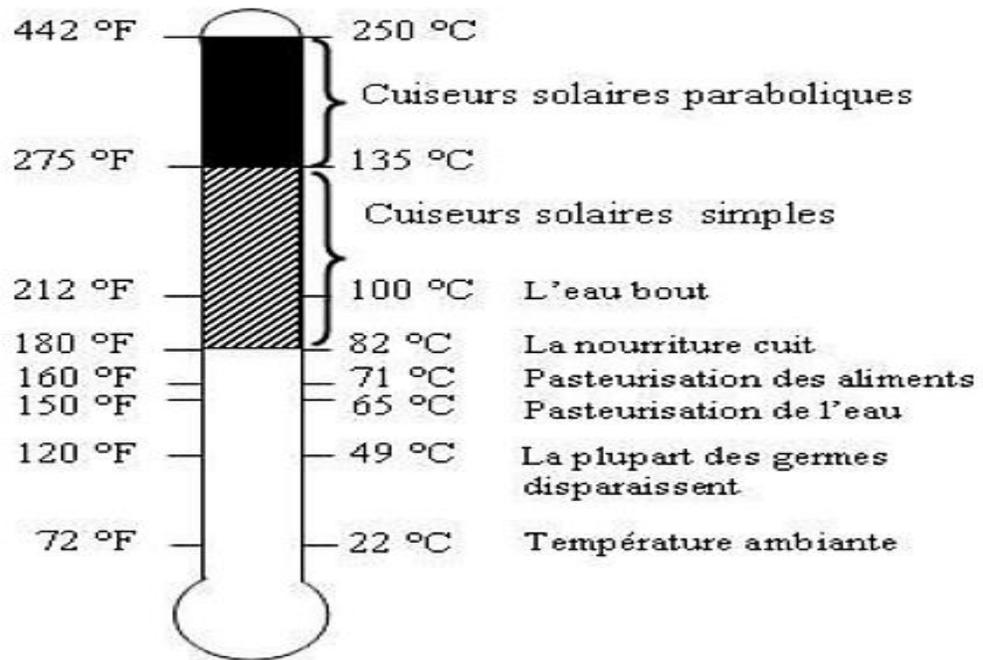


Figure I. 2 : Températures de cuisson pour les différents types de cuisseurs.<sup>[22]</sup>

## I.5 Les modèles de base des cuisseurs solaires

### I.5.1 Le cuisseur à panneaux

Confectionné à partir d'une caisse en carton ouvert et recouverte de feuilles d'aluminium (Fig I.3).

Il fonctionne par effet de concentration des rayons sur un récipient noir équipé d'un couvercle.<sup>[24]</sup>



Figure I. 3 : Un cuisseur à panneaux.

### I.5.2 Le cuiseur boîte

Le cuiseur solaire boîte est un boîtier en bois avec des extrémités isolées thermiquement et un simple ou double vitrage en haut. Le principe de fonctionnement de ce type de cuiseur est basé sur l'effet de serre, le vitrage du cuiseur permet le passage des rayons ayant une courte longueur d'onde mais, il est opaque pour les rayons ayant des grandes longueurs d'onde comme les rayons infrarouges, ces dernières ont une grande quantité d'énergie.

Dans un tel type de cuiseur, l'isolation joue un grand rôle pour maintenir la chaleur dans la chambre de cuisson, des miroirs peuvent être utilisés aussi pour une réflexion supplémentaire des rayons solaires. La vitesse de cuisson dépend de la conception, la configuration et, le rendement thermique du cuiseur. (Fig I.4) <sup>[24]</sup>



Figure I. 4 : Un cuiseur boîte.

### I.5.3 Le cuiseur parabolique

Les cuiseurs solaires paraboliques utilisent un réflecteur de forme parabolique pour diriger la lumière du soleil sur une petite surface afin de générer de la chaleur pour la cuisson. Ils peuvent atteindre des températures élevées, de 350 ° C (662 ° F) ou plus, ce qui leur permet d'être utilisés pour griller et frire. Ces températures sont nettement supérieures à celles que peuvent atteindre les cuiseurs solaires ou les cuiseurs à panneaux solaires et permettent aux temps de cuisson sur un cuiseur parabolique d'être comparables à ceux d'un réchaud conventionnel, tel qu'un brûleur électrique ou à gaz.

La quantité d'aliments cuits et la manière dont la chaleur est utilisée sont généralement dictés par la taille du plat parabolique. <sup>[25]</sup>

Le réglage doit se refaire toutes les 10 minutes environ. Il est aussi possible de laisser la marmite une bonne demi-heure en place si on a anticipé le mouvement du soleil. Par contre, au-delà d'une grosse demi-heure, c'est sûr que la tâche n'est plus du tout sur la marmite, et ça ne chauffe plus <sup>[22]</sup>.



Figure I. 5 : Un cuiseur parabolique.

### **I.6 L'état de l'art sur les cuiseurs solaires**

#### **I.6.1 Les cuiseurs stockeurs d'énergie**

Le besoin au stockage thermique intervient lorsqu'il y a une non équivalence entre la demande en énergie et la consommation énergétique. Les cuiseurs solaires doivent contenir un matériau de stockage de chaleur pour stocker l'énergie afin de résoudre le problème de la cuisson en dehors des locaux et l'impossibilité de cuire la nourriture pendant les moments nuageux de la journée et durant la nuit.

L'énergie thermique peut être stockée sous forme de changement d'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente ou thermochimique et parfois sous forme de la combinaison de ces modes <sup>[18]</sup>.

##### **I.6.1.1 Stockage de chaleur sensible**

Dans les cuiseurs solaires du type stockage de chaleur sensible, l'énergie thermique est stockée en augmentant la température d'un solide ou d'un liquide.

De l'huile à moteur est utilisée comme support de stockage généralement dans des cuiseurs boîtes (Fig I.6 a), où, pendant la journée, la température de stagnation stockage thermique possible est le sable. En effet, le sable a été utilisé comme moyen de stockage pour cuire à l'intérieur des locaux, 6 heures de cuisson à l'extérieur ont été enregistrées et approximativement 3 heures par jour à l'intérieur ont été réalisées.

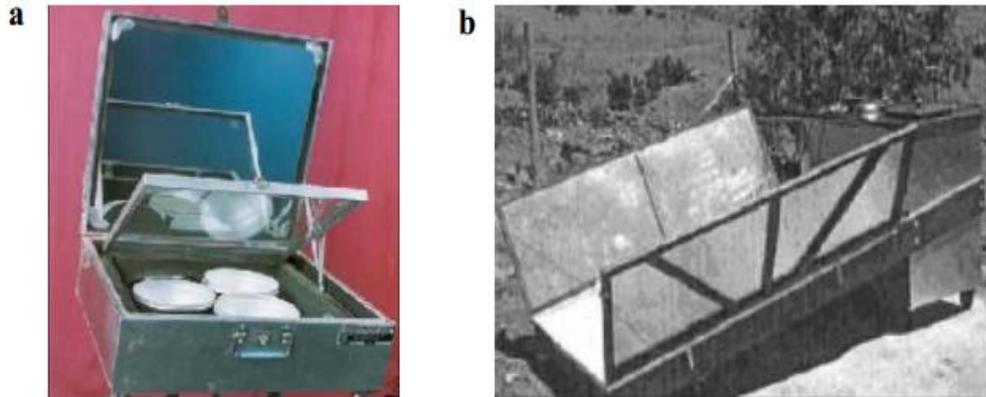


Figure I. 6 : Cuiseurs solaires à stockage de chaleur sensible avec support de stockage : (a) l'huile à moteur, (b) l'huile végétale. <sup>[18]</sup>

De l'huile végétale est aussi utilisée comme support de stockage, généralement en association avec des capteurs plans et une cuve de stockage thermique (Fig I.6.b), où l'huile végétale est utilisée comme fluide de transfert thermique, elle est chauffée au niveau du collecteur et conduite par la suite soit vers le récipient de cuisson soit vers l'unité de stockage à l'aide d'un système de régulation bien adapté. L'avantage de ce type de stockage est de garder la nourriture chaude le plus longtemps possible.

Les limitations principales des matériaux à stockage de chaleur sensible sont la capacité basse de chaleur spécifique et la diminution de l'efficacité de cuisson quand la température du matériau de stockage diminue pendant la décharge <sup>[18]</sup>.

### I.6.1.2 Stockage de chaleur latente

Le stockage de chaleur latente utilise l'énergie emmagasinée dans un matériau quand ce dernier change d'état d'une phase à une autre. L'utilisation des matériaux à changement de phase (Phase Change Materials) pour stocker l'énergie sous forme de chaleur latente a été reconnue comme l'une des meilleures solutions qui peut assurer un moyen de stockage efficace en raison de sa densité de stockage élevée et sa température de fonctionnement constante.

Il existe actuellement différents types de cuiseurs solaires intégrés avec des PCM en tant que support de stockage thermique qui ont été développés et testés à travers le monde <sup>[18]</sup>.

On a utilisé d'abord des PCM tel que l'acide stéarique (point de fusion 55 °C, chaleur latente de fusion 161 kJ/kg) et l'hexahydrate de nitrate de magnésium (température de fusion 89 °C) intégrés au-dessous des récipients de cuiseurs boîtes (Fig I.7), l'inconvénient de ce type de conception est que le transfert thermique à partir du matériau au récipient pendant le mode de décharge est lent et plus de temps est nécessaire pour la cuisson en soirée, ce mode de stockage dépend non seulement de l'irradiation solaire et de la quantité de nourriture à cuire mais aussi des propriétés thermophysiques du PCM.

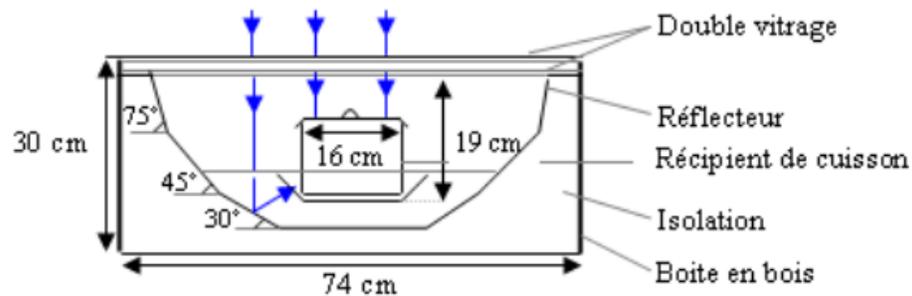


Figure I. 7 : Schéma d'un cuiseur solaire à stockage de chaleur latente de type boîte avec PCM <sup>[18]</sup>.

Par la suite les récipients de cuissons ont été modifiés et mis sous forme de deux cylindres intégrés pour contenir la nourriture entourée du matériau. L'acétamide est utilisé d'abord comme PCM (point de fusion 82 °C, chaleur latente de fusion 263 kJ/kg) et ensuite l'acétanilide (température de fusion 118 °C, chaleur latente de fusion 222 kJ/kg), le débit du transfert thermique entre le matériau et le récipient est devenu plus grand et la préparation de nourriture est plus rapide.

Et pour faciliter la cuisson pendant la nuit à l'intérieur de la maison, un cuiseur solaire de type boîte avec stockage d'énergie a été développé, le cuiseur contenait un simple capteur plan et des miroirs pour réorienter les rayons solaires vers le récipient de cuisson, le PCM choisi été de l'hydrate de sel Ba (OH)28H<sub>2</sub>O. Un cuiseur du type indirect (Fig I.8.a), a été développé, ce cuiseur est composé d'un capteur plan exposé à l'extérieur et d'un récipient de cuisson avec un PCM à l'intérieur du local, le PCM a été de l'hexahydrate de nitrate de magnésium (température de fusion 89 °C, chaleur latente de fusion 134 kJ/kg) intégré à l'unité de cuisson. Des tests ont été effectués

sans charge et avec différentes charges à divers moments de la journée, les résultats indiquent que ce cuiseur peut être utilisé avec succès pour cuire différents types de repas à midi, l'après-midi et pendant la soirée, il peut être également utilisé pour conserver les repas à chaud pour la matinée.

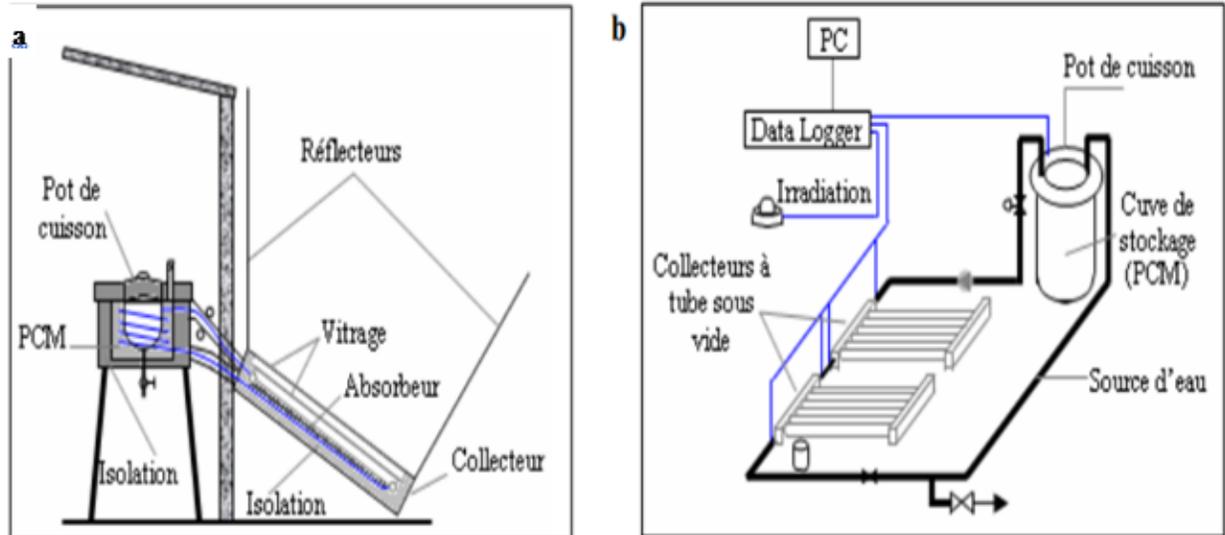


Figure I. 8 : Schéma de cuiseurs solaires à stockage latent avec PCM intégré en mode indirect utilisant : (a) des capteurs plans, (b) des capteurs sous vides. <sup>[18]</sup>

Un autre cuiseur solaire indirect (Fig I.8.b), a été développé avec des capteurs à tube sous vides, le PCM utilisé est du erythritol (température de fusion 118 °C, chaleur latente de fusion 339.8 kJ/kg), où une pompe fait circuler un fluide caloporteur des capteurs vers l'unité de cuisson (entourée du PCM) à travers un échangeur de chaleur sous une boucle fermée, l'énergie stockée dans le PCM est utilisée pour faire cuire la nourriture durant nuit.

La température maximale du PCM en stockage de chaleur pour la cuisson solaire reportée dans la littérature est seulement de 120 °C ce qui n'est pas approprié pour faire frire et à faire cuire rapidement. Néanmoins quand le PCM est utilisé comme matériau de stockage dans la cuisson solaire, le mode indirect de chauffage est le plus approprié <sup>[18]</sup>.

### I.6.2 Les cuiseurs suiveurs du soleil

En 2010, Un cuiseur solaire cylindro-parabolique avec système de poursuite solaire automatique (Fig I.9), a été conçu, construit et testé par Al-Soud et al., un contrôleur programmable a été employé pour contrôler le mouvement du cuiseur solaire. Les résultats de l'essai ont prouvé

que la température de l'eau à l'intérieur de la cuve du cuiseur a atteint  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  en jours typiques d'été, quand la température ambiante enregistre un maximum de  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$  [26].

En 2011, l'effet d'un système de poursuite solaire à deux axes sur un cuiseur parabolique (Fig I.10), a été étudié par Abu-Malouh et al. Le concentrateur parabolique a été construit pour concentrer le rayonnement solaire sur un récipient fixé au sommet du foyer, le cuiseur suit le soleil à l'aide du système de poursuite à deux axes, ce dernier est réalisé et ensuite testé. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la température à l'intérieur du récipient avait atteint les  $93\text{ }^{\circ}\text{C}$  quand la température ambiante est de  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la température obtenue convient parfaitement pour faire cuire différents plats [27].

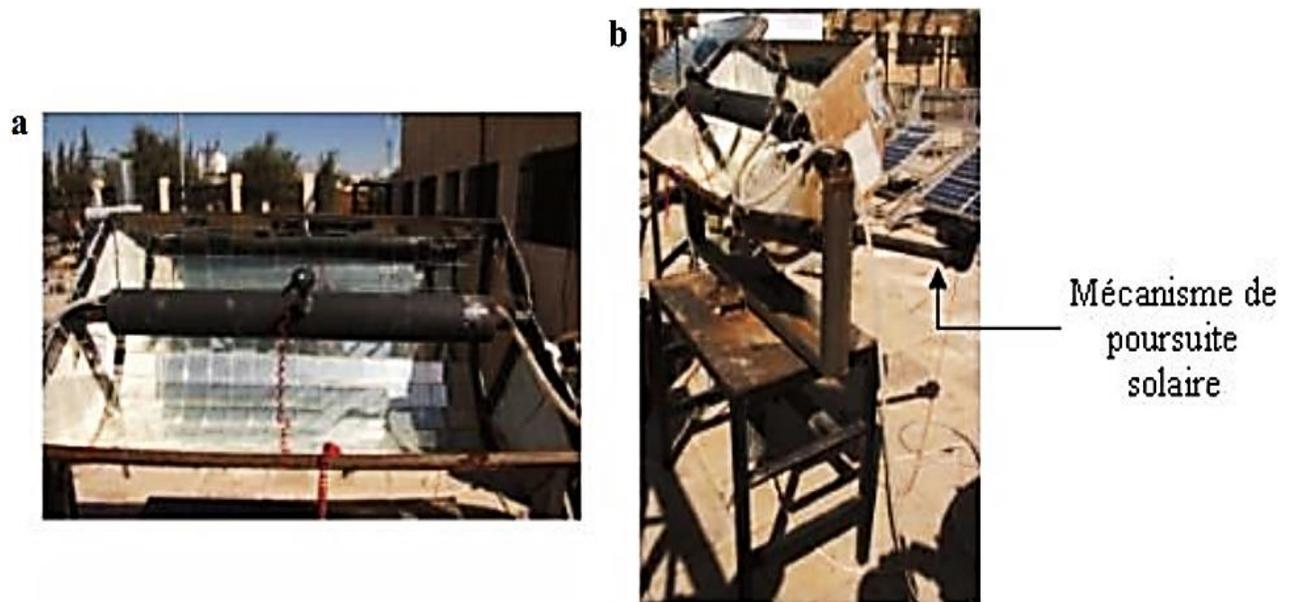


Figure I. 9 : (a) Cuiseur cylindro-parabolique ; (b) système de poursuite solaire, réalisé par AL-Soud et al. [26]

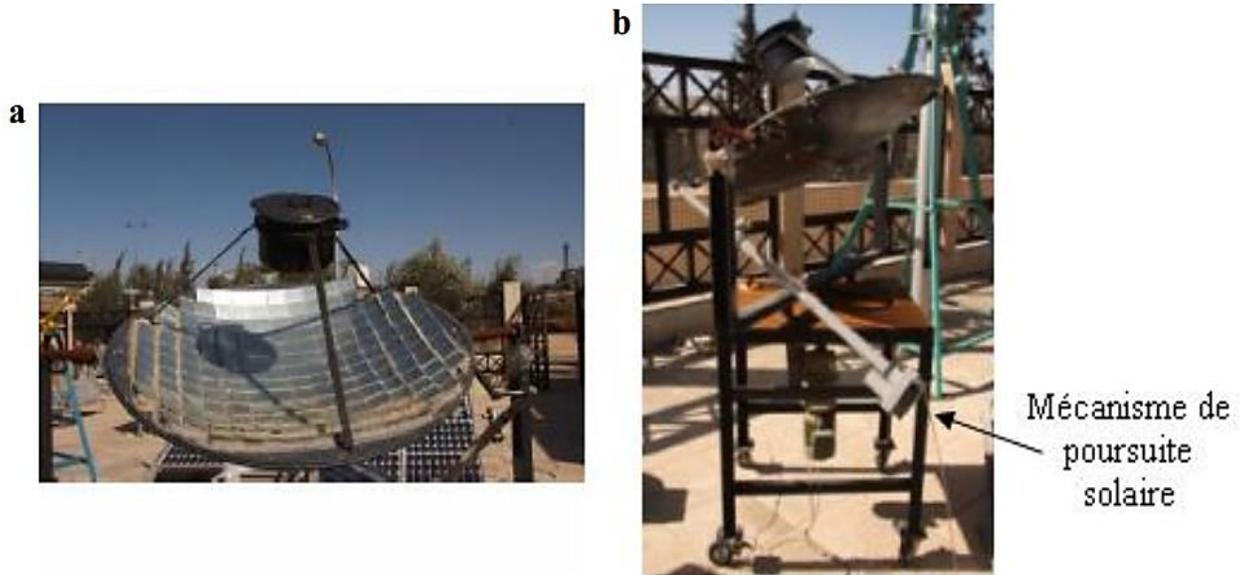


Figure I. 10 : (a) cuisson parabolique ; (b) système de poursuite solaire réalisé par Abu-Malouh et al. <sup>[27]</sup>

### I.6.3 Les cuiseurs boîtes à usage multiple (cuiseurs hybrides)

Kumar et al ont conçu et fabriqué un cuisson-séchoir solaire de type pyramide tronquée (Fig I.11), qui satisfait les normes prescrites par le Bureau des Standards de l'Inde concernant les cuissons solaires de type boîte, la géométrie tronquée de la pyramide concentre la lumière vers le bas du cuisson, ils ont également recommandé quelques modifications pour obtenir de plus hautes températures et des temps de cuisson réduits <sup>[28]</sup>. Le groupe de travail ont ensuite conçu, fabriqué et testé un dispositif de type pyramide tronquée (Fig I.11), qui pourrait être utilisé pour la cuisine domestique aussi bien que pour le chauffage de l'eau. Une analyse économique simple illustre que ce genre de conception pourrait être financièrement viable et physiquement utile <sup>[29]</sup>.

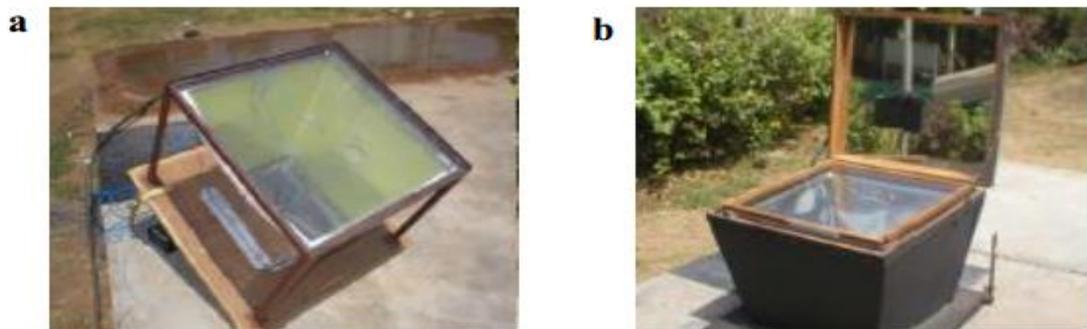


Figure I. 11 : (a) Cuisson séchoir- pyramide <sup>[28]</sup>, (b) cuisson chauffe-eau <sup>[29]</sup>.

## I.7 Cuiseurs solaires à travers le monde

### I.7.1 Les cuiseurs de type boîtes

#### I.7.1.1 Les cuiseurs du type boîte sans et avec réflecteurs

Beaucoup de travaux ont été effectués ces dernières décennies pour étudier et déterminer les performances thermiques des cuiseurs solaires de type boîte sans et avec réflecteurs, notamment en Inde <sup>[30,31]</sup>, en Asie <sup>[32,33]</sup>, en Europe <sup>[34]</sup> et en Afrique <sup>[35,36]</sup>.

Kumar <sup>[37]</sup> a développé une corrélation pour le coefficient de pertes de chaleur d'un cuiseur solaire boîte qui a comme charge de l'eau, il a également présenté une analyse thermique pour évaluer le coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle du cuiseur. Purohit et al. <sup>[30]</sup> ont construit et évalué un prototype de cuiseur solaire avec 4 réflecteurs et 2 récipients de cuisson, la conception du cuiseur est optimisée pour les zones intertropicales. Les tests ont montré que le prototype, qui a besoin de seulement 4 simples mouvements tout au long de l'année, convient parfaitement pour faire cuire les repas principaux de base.

En 2001, Nahar <sup>[38]</sup> a conçu, fabriqué (Fig I.12), testé et comparé les performances d'un cuiseur solaire boîte à double réflecteurs avec un matériau isolant transparent avec celle d'un cuiseur boîte possédant un seul réflecteur sans matériau isolant. Mohamad et al. ont conçu un simple cuiseur solaire boîte en bois avec un seul réflecteur, ils ont aussi fabriqué plusieurs unités de démonstration qui ont montrées des performances acceptables concernant les essais effectués sur terrain.

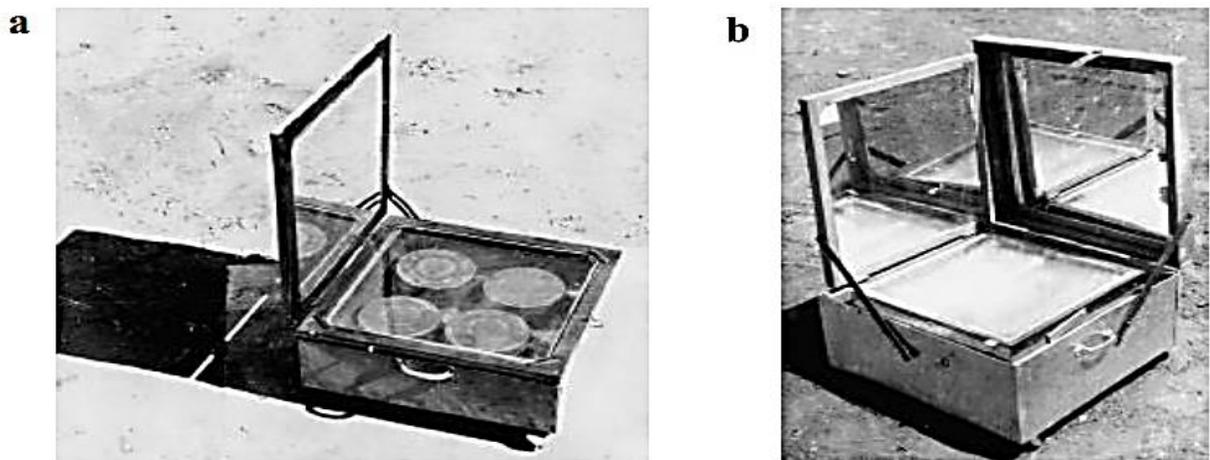


Figure I. 12 : Cuiseurs boîte fabriqué et testé par Nahar <sup>[38]</sup> : (a) avec un seul réflecteur ; (b) avec deux réflecteurs

Negi et Purohit ont réalisé des tests sur les performances thermiques d'un cuiseur solaire type boîte (Fig I.13.a), utilisant des réflecteurs à concentration sans poursuite solaire. Ils ont montré que le cuiseur peut donner une meilleure collecte de la chaleur d'où une cuisson plus efficace <sup>[39]</sup>. Amer a présenté et largement étudié les performances d'un nouveau modèle de cuiseur solaire (Fig I.13.b), où l'absorbeur est exposé au rayonnement solaire par le haut et par la face inférieure, un ensemble de réflecteurs sont utilisés pour diriger le rayonnement sur la face inférieure de la plaque absorbante <sup>[40]</sup>.

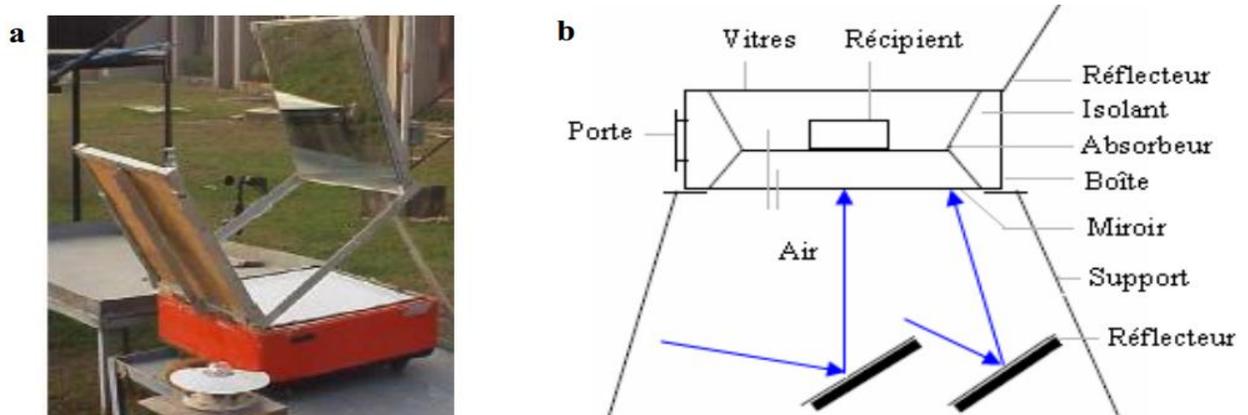


Figure I. 13 : Schéma du cuiseur boîte avec réflecteurs : (a) exposés par la face supérieure testé par Negi et al ; (b) exposés par la face inférieure étudié par Amer.

### I.7.1.2 Les cuiseurs type boîte à double exposition

Emad H. Amer a présenté un nouveau design des cuiseurs solaires (fig I.14) et l'a comparé avec un cuiseur boîte conventionnel. Dans le nouveau prototype, l'absorbeur est exposé au rayonnement solaire des deux côtés, par le haut et par le bas, un ensemble de réflecteurs plans est utilisé pour diriger les rayons du soleil vers bas de l'absorbeur. Une série de tests a été réalisés et les résultats obtenus montrent que la température de l'absorbeur et de l'air à l'intérieur du cuiseur atteint 165°C et 155°C respectivement, et qui est supérieure à la température dans le cuiseur conventionnel (140°C et 132°C). <sup>[40]</sup>

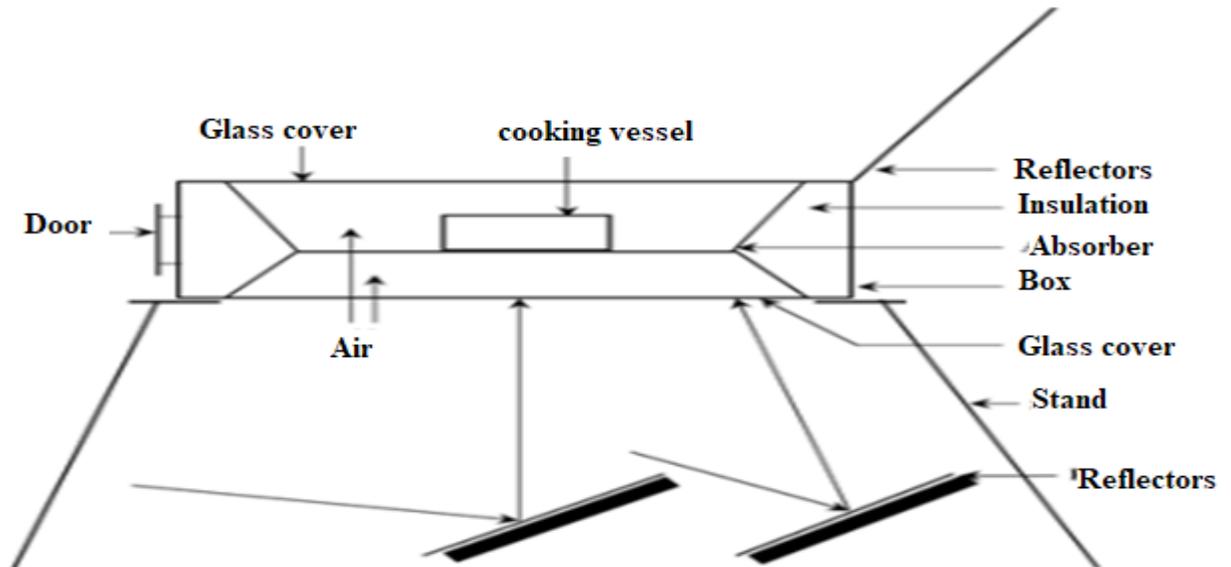


Figure I. 14 : Schéma du cuisinier boîte avec double exposition étudié par Amer.

## I.7.2 Les cuisiniers solaires à concentration ponctuelle ou linéaire

### I.7.2.1 Les cuisiniers à concentration de type parabolique

Le cuisinier parabolique (Fig I.15), utilise le principe de la concentration des rayons solaires. Ces cuisiniers sont constitués de disques concaves sous forme de parabole qui focalise la lumière solaire sur le fond du récipient. La puissance d'un cuisinier parabolique solaire est équivalente à celle d'une plaque électrique ou à gaz. On trouve généralement deux types : les cuisiniers paraboliques à réglage manuel et les cuisiniers paraboliques à réglage automatique.



Figure I. 15 : Un cuisinier parabolique.



que la capacité de chaleur élevée, les inconvénients supplémentaires sont les pots inamovibles qui font que leur nettoyage soit difficile. <sup>[18]</sup>

### **I.7.3.2 Les cuiseurs solaires à capteurs sous vide**

Les cuiseurs solaires avec capteurs à tubes sous vides sont constitués de longues pipes chauffantes intégrées menant directement à la plaque chaude du cuiseur, ils ont également besoin d'un système de transfert thermique puissant afin de conduire la chaleur du collecteur à la plaque chaude sans diminution de la température. Ces types de cuiseurs ont beaucoup d'avantages : ils n'ont pas besoin d'un système de poursuite, ils peuvent atteindre des températures élevées et la cuisson peut avoir lieu à l'extérieur ou à l'intérieur de la maison en raison de la longue séparation entre le collecteur et l'unité de cuisson. Les inconvénients sont dus essentiellement à leur coût. <sup>[18]</sup>

## **I.8 Les avantages et les inconvénients des cuiseurs solaires**

### **I.8.1 Les avantages des cuiseurs solaires**

- On ne risque pas de faire brûler les aliments.
- On utilise une énergie renouvelable, gratuite et non polluante.
- Le cuiseur est transportable.
- Ce mode de cuisson est plus doux et respecte les qualités nutritionnelles des aliments.
- Il n'y a aucun élément contaminant (gaz de combustion...).

### **I.8.2 Les inconvénients des cuiseurs solaires**

- Lorsqu'on ouvre le four pour surveiller la cuisson, on perd une grande partie de la chaleur.
- Le temps de cuisson des aliments est souvent multiplié par deux comparativement à un mode de cuisson traditionnel...
- Dépendant du bon vouloir du soleil.
- Ils sont compliqués à construire.

### **I.9 Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons rassemblée quelque généralité sur l'énergie renouvelable et surtout l'énergie solaire et ces différentes modes d'utilisation. Il a été constaté qu'un cuiseur solaire est un moyen écologique et économique de préparer les aliments. Les cuiseurs solaires capturent les rayons du soleil au moyen de surfaces brillantes ou miroirs, qui réfléchissent les rayons du soleil et les concentrent sur un récipient de cuisson, à cette concentration de rayons lumineux, s'ajoute un effet de serre. Et pour surmonter les besoins énergétiques en cas de mauvais temps ou pendant la nuit, le stockage thermique d'énergie est compté parmi les meilleures solutions techniques possibles pour la cuisson solaire.

**CHAPITRE II :**  
**Gisement solaire et**  
**modélisation de l'éclairement**  
**solaire**

## II.1 Introduction

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

Le Soleil est une fantastique boule de feu qui brûle depuis 4.7 milliards d'années. Elle est grande et chaude, même si nous en sommes très éloignés, nous bénéficions encore de sa chaleur et de sa lumière. Le Soleil est  $1.3 \cdot 10^6$  Fois plus grosse que la Terre, et la chaleur dans son cœur peut atteindre 16 millions de degrés, 150 millions de kilomètres nous séparent de cette formidable source d'énergie, et notre atmosphère nous protège de la puissance de ses rayons. [14]

## II.2 Gisement solaire

### II.2.1 Gisement solaire mondial

Le soleil est l'origine de la plupart des sources d'énergie. L'énergie solaire est la plus abondante, la mieux répartie géographiquement et la plus durable des sources d'énergies. Selon le scénario « Hi-Ren » de l'IEA (International Energy Agency), l'énergie solaire joue un rôle capital dans la diminution de l'émission des gaz à effet de serre. [9]

La quasi-totalité de l'énergie de la Terre provient du soleil. L'énergie éolienne, la biomasse, L'énergie hydraulique et les combustibles fossiles, entre autres, ne sont que des formes Secondaires d'énergie solaire. La figure montre la carte mondiale d'irradiation normale directe (DNI).

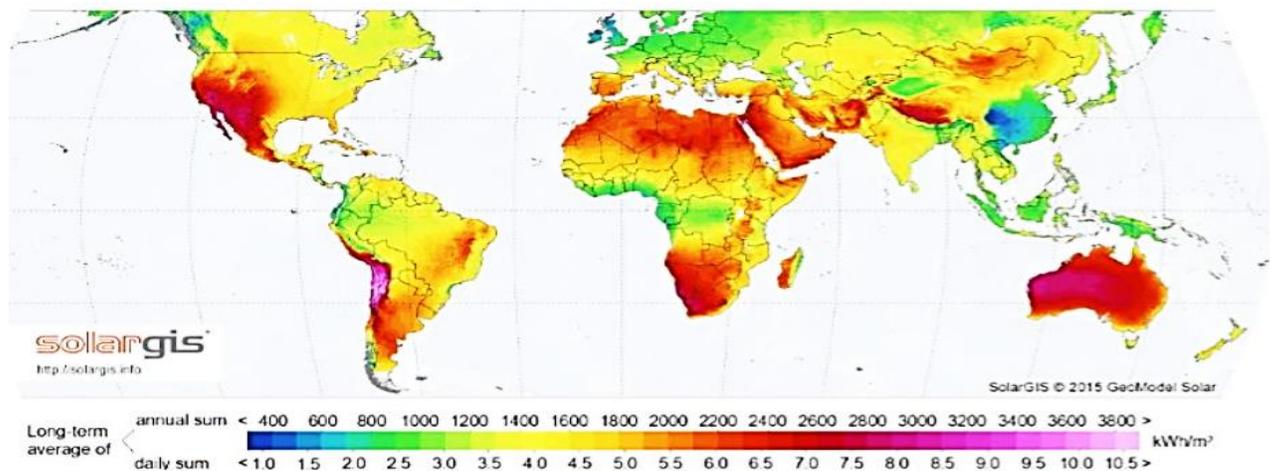


Figure II. 1 Carte du monde d'irradiation normale directe DNI [10].

## CHAPITRE II : Gisement solaire et modélisation de l'éclairage solaire

### II.2.2 Ressources solaires de l'Algérie

Avec 2381741 km<sup>2</sup> de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste de la méditerranéen, selon une étude de l'agence aérospatiale allemande <sup>[11]</sup>, l'Algérie offre de plus grandes possibilités intéressantes ; à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires.

En effet l'Algérie est l'un des pays de la méditerrané qui dispose d'un potentiel solaire énorme, selon les données d'ensoleillement, l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara, l'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays, le potentiel des ressources solaires de notre pays est donc optimal pour l'exécution des projets solaires. <sup>[12]</sup>

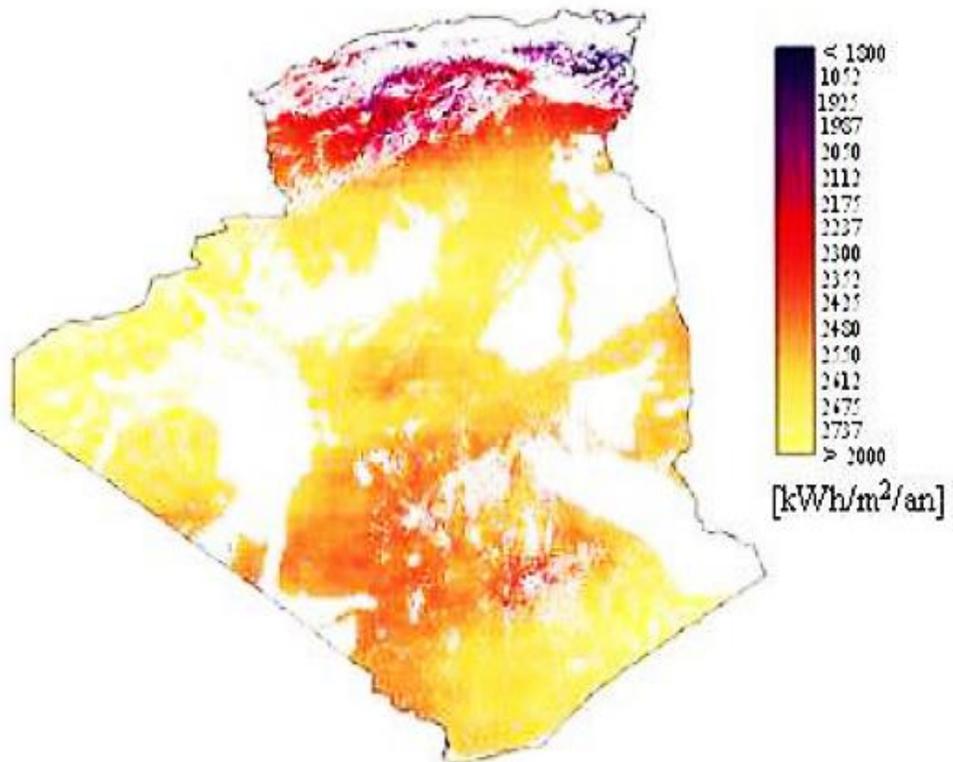


Figure II. 2 : Ressources énergétiques solaires : potentiel de l'Algérie <sup>[11]</sup>.

### II.3 Eclairement solaire

#### II.3.1 Eclairement ou irradiation

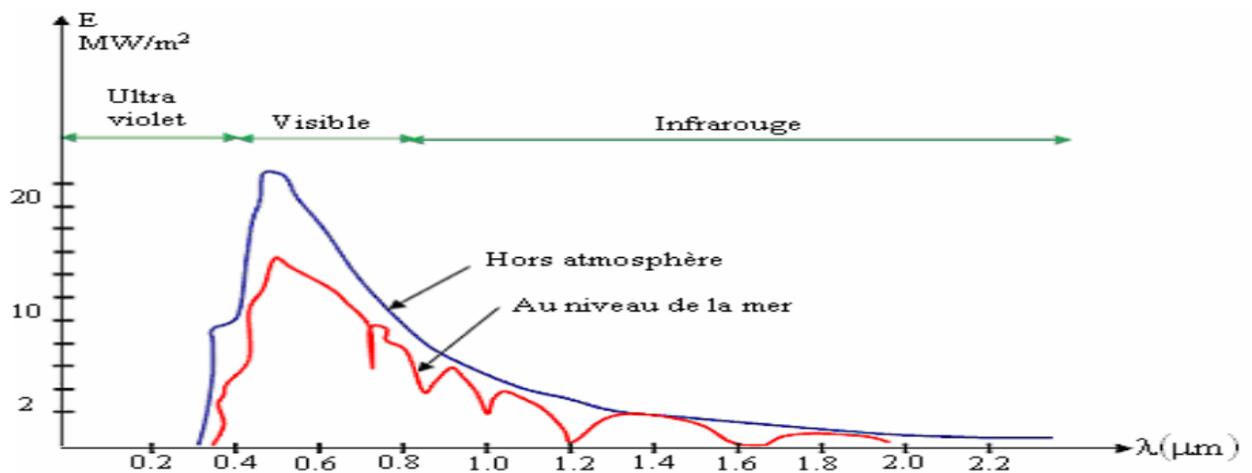
L'éclairement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10<sup>-6</sup>m. sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent.

#### II.3.2 Répartition spectrale de L'éclairement solaire

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10  $\mu\text{m}$ . La figure I.3 représente la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9 % dans la bande des ultraviolets ( $< 0.4 \mu\text{m}$ ).
- 47 % dans la bande visible ( $0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$ ).
- 44 % dans la bande des infrarouges ( $> 0.8 \mu\text{m}$ ).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 kW/m<sup>2</sup> à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. [13]



### II.3.3 Types de l'éclairement solaire

#### II.3.3.1 Eclairement global

On appelle rayonnement global le rayonnement solaire parvenant au niveau du sol sur une surface horizontale, soit directement, soit après diffusion. Il s'exprime simplement comme la somme du rayonnement diffus et du rayonnement direct :  $G = I + D$

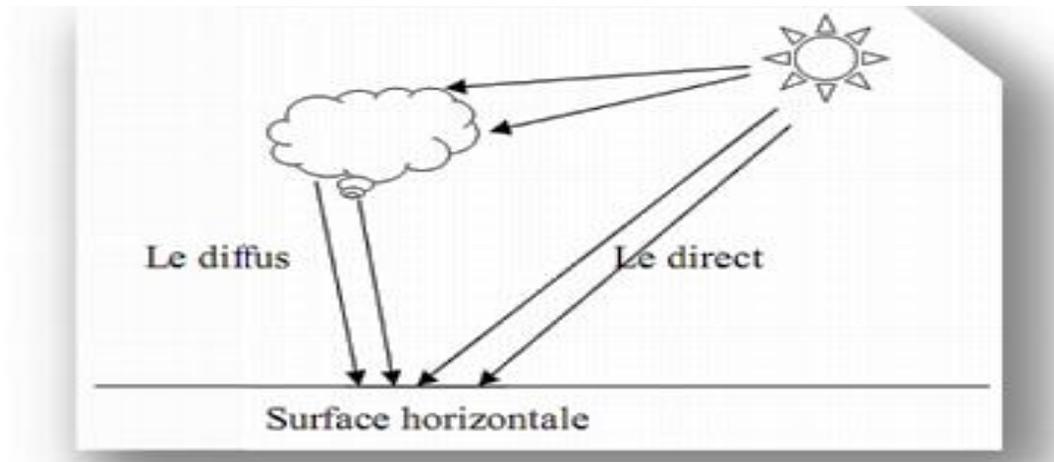


Figure II. 4 : Les différentes composantes du rayonnement solaire sur un plan horizontal.<sup>[14]</sup>

#### II.3.3.2 Eclairement direct

C'est la composante parvenant directement de l'angle solide délimité par le disque solaire.

C'est un rayonnement, dont le parcours entre le soleil et la surface terrestre est direct.

#### II.3.3.3 Eclairement diffus et réfléchi

Le diffus parvient de toute la voûte céleste et n'a pas d'orientation privilégiée à cause des effets de l'atmosphère et les nuages.

### II.4 Appareils de mesure de l'éclairement solaire

#### II.4.1 Mesure de l'éclairement direct (le Pyrhéliomètre)

Au sol, la mesure du rayonnement solaire direct est faite à l'aide d'un pyrhéliomètre, cet instrument est en permanence orienté vers le soleil et ne mesure que le rayonnement provenant du seul disque solaire. Le rayonnement capté est absorbé par une surface noire, la différence de

## CHAPITRE II : Gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire

température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement direct.



Figure II. 5 : Pyrhéliomètre pour la mesure de l'éclairement direct normal.

### II.4.2 Mesure de l'éclairement diffus et global (le Pyranomètre)

Les mesures effectuées par un pyranomètre (Fig II.6) sont :

- La mesure de l'éclairement énergétique global.
- La mesure de l'éclairement énergétique diffus par adjonction d'un dispositif d'occultation du disque solaire.

L'élément sensible (thermopile) du pyranomètre est une série de thermocouples exposés au rayonnement solaire, dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction et qui délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident. Un parasoleil constitué par une bande circulaire centrée sur la thermopile et parallèle au plan équatorial, occulte le pyranomètre du rayonnement solaire direct pour permettre la mesure du rayonnement solaire diffus.

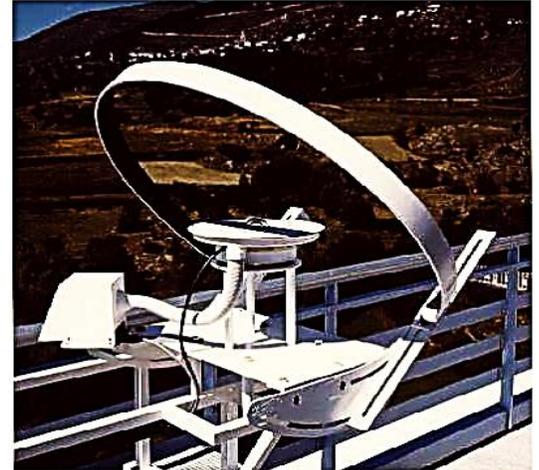


Figure II. 6 : Pyranomètre pour la mesure de rayonnement global et diffus.

### II.4.3 Mesure de l'éclairage solaire réfléchi (Albédo mètre)

On mesure l'éclairage solaire réfléchi avec l'albédo mètre qui est un instrument qui mesure l'albédo solaire, ou réflectance solaire, et le rayonnement solaire net. Il est composé de deux pyranomètres de seconde classe avec des capteurs thermopiles montés sur le même appareil. L'un est placé en direction du ciel, l'autre vers le sol. La partie supérieure mesure le rayonnement global, celui du bas mesure le rayonnement solaire réfléchi. <sup>[15]</sup>



Figure II. 7 : Albédo mètre pour la mesure de rayonnement solaire réfléchi. <sup>[15]</sup>

### II.4.4 Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe)

L'insolation est définie comme l'intervalle de temps durant lequel le disque solaire a été visible ou durant lequel on a pu observer des ombres portées sur le sol. Elle est également définie comme la durée pendant laquelle le rayonnement direct est demeuré supérieur à une valeur internationalement admise :  $120 \text{ W/m}^2$ .

## CHAPITRE II : Gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire

Mesure effectuée par un Héliographe (Fig.II.8) : enregistrement de l'insolation en centième d'heure, la durée d'insolation est mesurée à l'aide d'héliographes en dixièmes d'heures.

On distingue les héliographes classiques et automatiques.



Figure II. 8 : Héliographe pour la mesure de l'insolation.

### II.5 Paramètres géométriques

#### II.5.1 Coordonnées géographiques terrestres

Tout point de la surface terrestre est repérée par ses coordonnées géographiques :

La longitude, la latitude, ainsi que par son altitude

##### II.5.1.1 La latitude

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle Équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur, est indiquée en tant que latitude de  $0^\circ$ , le pôle nord par latitude  $+90^\circ$  et le pôle sud par la latitude  $-90^\circ$ .

Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude sera désignée ici par lettre ( $\varphi$ ), et Peut ainsi être composé entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$  [43].

## CHAPITRE II : Gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire

### II.5.1.2 La longitude

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^\circ$ ) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ , à tout écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps.

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest <sup>[43]</sup>.

### II.5.1.3 L'altitude

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesuré en m <sup>[44]</sup>.

### II.5.1.4 Le méridien

C'est le plan qui contient la verticale du lieu et l'axe de rotation de la terre. Son intersection avec la surface de la terre définit un grand cercle qui passe par les deux pôles et par le point de la surface considéré. En astronomie, on considère plutôt son intersection avec la sphère céleste sous la forme du grand cercle de la sphère céleste qui passe par les pôles célestes et par la verticale du lieu. Bien qu'il nous paraisse fixe, le méridien d'un lieu accompagne la terre dans sa rotation sur elle-même (Fig II.9) <sup>[44]</sup>.

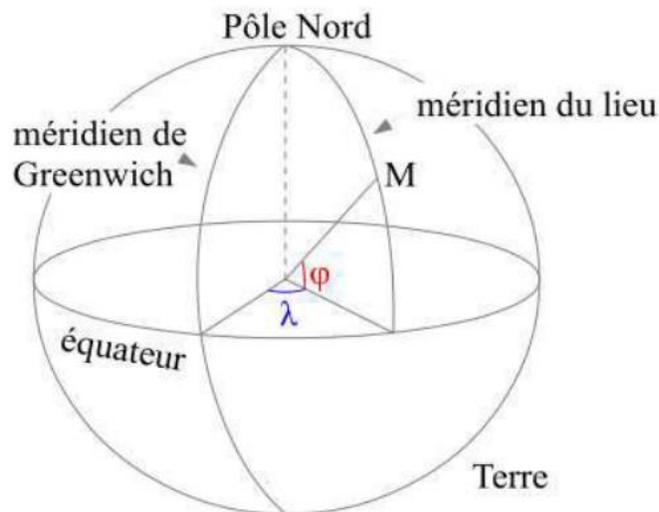


Figure II. 9 : Coordonnées terrestres <sup>[44]</sup>

### II.5.2 Paramètres horaires

#### II.5.2.1 Temps solaire

##### II.5.2.1.1 Temps solaire moyen :

La rotation de la terre autour de l'axe des pôles introduit la notion de temps solaire moyen (TSM). La journée solaire moyenne est le temps qui sépare, en moyenne, deux passages successifs du soleil au méridien d'un lieu. Par définition, la journée solaire moyenne a une durée de 1 jour = 24h 00m 00s <sup>[14]</sup>.

##### II.5.2.1.2 Temps solaire Vrai

Définition en astronomie : on appelle temps solaire vrai (TSV) en un lieu et à un instant donné, l'angle horaire du soleil en ce lieu et à cet instant. C'est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la terre et son mouvement de translation. Son introduction est naturelle, car il est lié à l'alternance des jours et de nuits. C'est le (TSV) qui est indiqué sur les cadrans solaires <sup>[14]</sup>.

#### II.5.2.2 Durée astronomique du jour

On peut définir la durée astronomique du jour (ou la durée d'ensoleillement) comme étant la période de temps séparant les événements où le soleil est à l'horizon, c'est-à-dire que sa hauteur est nulle. Au lever et au coucher du soleil :  $h = 0$

La durée astronomique du jour est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente laquelle dépend de la période de l'année considérée :

$$D_j = \left[ \left( \frac{2}{5} * \cos^{-1} \right) * (-\tan(\varphi) * \tan(\delta)) \right] \quad , \text{ (Heures) (Equ II 1)}$$

La durée astronomique du jour est maximale le 21 juin (le jour le plus long de l'année) et minimale le 21 décembre (le jour le plus court de l'année). <sup>[14]</sup>

#### II.5.2.3 Angle horaire

A chaque moment, il est plus pratique de calculer le temps en degrés qu'en heures. L'unité est l'angle horaire (24 h représente 360° horaires). L'angle horaire est l'angle compris entre le

## CHAPITRE II : Gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire

méridien origine passant par le sud et la projection de la direction du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel.

$$\omega = 15(12 - \text{TSV}), \text{ (Degré), (Equ II 2)}$$

L'angle horaire se mesure à partir du midi solaire, il est positif s'il est avant midi et négatifs s'il est après midi ( $\omega$  vaut  $0^\circ$  à midi,  $-90^\circ$  à 18 heures et  $90^\circ$  à 6 heures, en temps solaire vrai, chaque heure le décale de  $15^\circ$ , positifs le matin et négatifs l'après-midi). [45]

### II.5.2.4 Déclinaison solaire

La déclinaison solaire est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le Plan équatorial. Elle varie entre  $+23^\circ 27'$  au solstice d'été (le 21 Juin) et  $-23^\circ 27'$  au solstice d'hiver (le 21 Décembre).

Plusieurs chercheurs ont proposé des formules permettant de calculer la déclinaison, l'expression suivante permet de le faire avec précision [45] :

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cdot \cos \Gamma + 0.070257 \cdot \sin \Gamma - 0.006758 \cdot \cos^2 \Gamma + 0.000907 \cdot \sin^2 \Gamma - 0.002697 \cdot 3 \cos \Gamma + 0.00148 \cdot 3 \sin \Gamma) (180/\pi) \quad \dots(\text{Equ II 3})$$

$\Gamma$  qui est exprimée en radians, s'appelle l'angle du jour et est donné par :

$$\Gamma = 2 \pi (n_j - 1) / 365 \quad \dots(\text{Equ II 4})$$

En exprimant tous les angles en degrés, on trouve l'équation de Cooper qui est donnée par :

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin(360/365 (n_j + 284)^\circ) \quad \dots(\text{Equ II 5})$$

$n_j$  est le numéro de jour de l'année, variant de 1 à 365. (Pour le 1<sup>er</sup> Janvier,  $n_j = 1$  et pour le 31 Décembre,  $n_j = 365$ ).

A l'aide d'un code en Matlab, on peut tracer les trois formules précédentes donnant la valeur de la déclinaison solaire en fonction du jour de l'année.

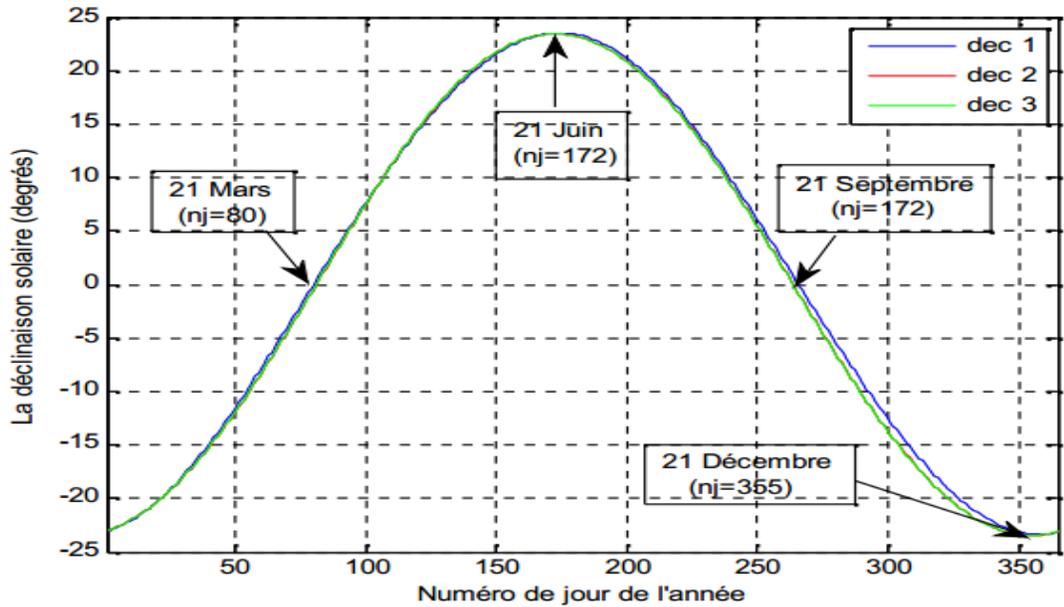


Figure II. 10 : variation de la déclinaison solaire en fonction du jour de l'année.

A partir du graphe, on voit que :

- $\delta = 23,45^\circ$  pour le 21 Juin, ce qui correspond au solstice d'été.
- $\delta = -23,45^\circ$  pour le 21 Décembre, ce qui correspond au solstice d'hiver.
- $\delta = 0$  pour le 21 Mars et le 21 Septembre, ce qui correspond aux équinoxes de printemps et d'automne. <sup>[45]</sup>

### II.5.3 Paramètres de position

#### II.5.3.1 Hauteur du soleil

La hauteur du soleil est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à  $0^\circ$  au lever et au coucher astronomiques du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai.

L'expression de la hauteur du soleil est donnée par

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\varphi) \quad \dots(\text{Equ II } 6)$$

$\varphi$ : la latitude du lieu,

$\delta$  : la déclinaison du soleil et  $\omega$  : l'angle horaire. <sup>[14]</sup>

### II.5.3.2 Azimut du soleil

L'azimut du soleil est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud.

$$\sin(\text{az}) = \frac{\cos(\delta) * \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad \dots(\text{Equ II } 7)$$

Il est nul à midi TSV et maximal au lever et au coucher du soleil. <sup>[14]</sup>

## II.6 Paramètres atmosphériques

### II.6.1 Masse atmosphérique

On appelle masse d'air  $m_A$  la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer <sup>[46]</sup>.

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. La masse atmosphérique relative est donnée par la relation, très simple :

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma_s)} \quad \dots(\text{Equ II } 8)$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante :

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma_s) + [9.40 * 10^{-4} * \{\sin(\gamma_s) + 0.0678\}^{-1.253}]} \quad \dots(\text{Equ II } 9)$$

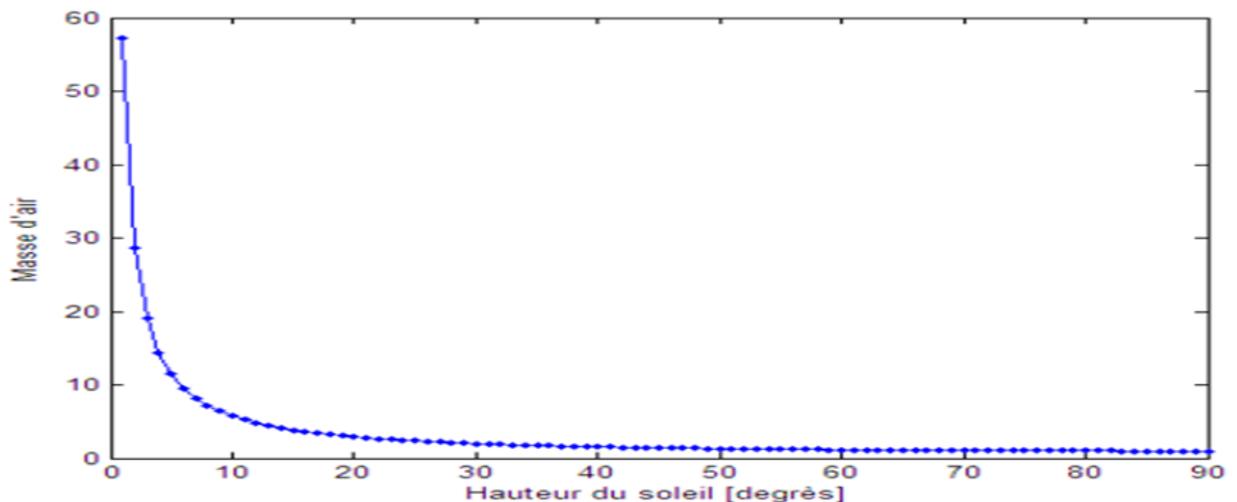


Figure II. 11 : Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil.

### II.6.2 Epaisseur optique de l'atmosphère

En 1922, Linke <sup>[47]</sup> définit l'épaisseur optique de Rayleigh  $\delta_R$  comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols. Kasten, en 1980 <sup>[48]</sup> utilisa les données spectrales publiées par Feussner et Dubois en 1930 <sup>[49]</sup> et proposa la formule (Equ II.10) pour  $\delta_R$ , connue sous le nom de formule pyréliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte.

$$\delta_R = 9,4 + (0,9 * m_A) \quad \dots(\text{Equ II } 10)$$

Dans cette formule utilisé depuis fort longtemps, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que : CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et le CO n'est prise en compte. Capderou dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, 'ASA', utilisa la formule pyréliométrique de Kasten pour calculer le rayonnement direct incident sur un plan par ciel clair (Fig II.12). En 1986, Louche <sup>[50]</sup> ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4ème ordre pour la masse.

$$(\delta_R)^{-1} = 6.5567 + (1.7513.m_A) - (0.1202.m_A^2) + (0.0065.m_A^3) - (0.00013.m_A^4) \quad (\text{Equ II } 11)$$

Louche démontra que la formule (Equ II 11) conduit à des valeurs grandes par rapport à ceux données par la formule d'origine de Kasten et plus particulièrement pour les petites valeurs de la masse d'air. Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour  $\delta_R$

$$(\delta_R)^{-1} = 6.6296 + (1.7513.m_A) - (0.1202.m_A^2) + (0.0065.m_A^3) - (0.00013.m_A^4) \quad (\text{Equ II } 12)$$

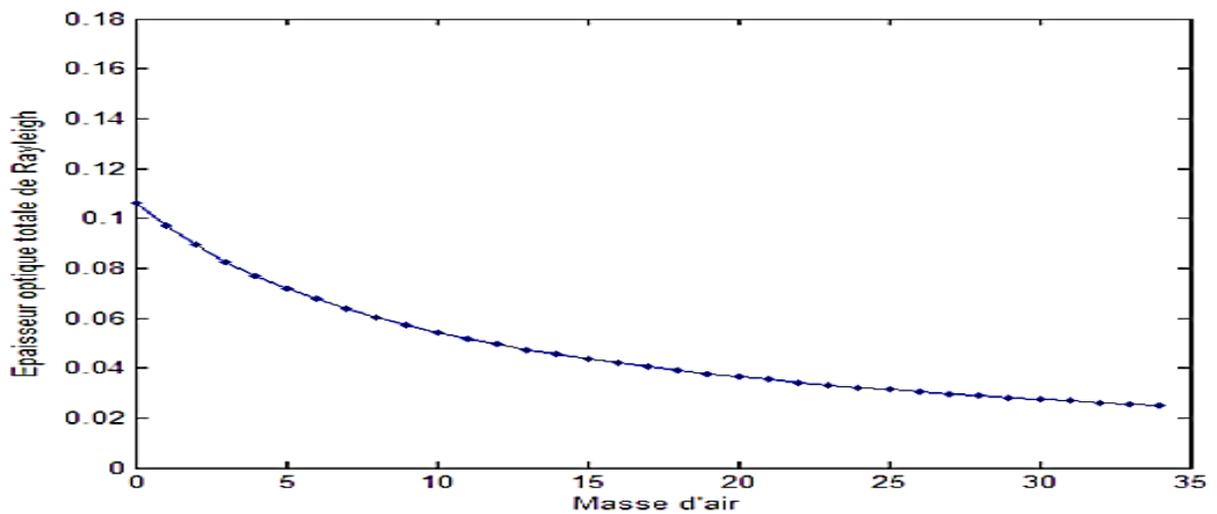


Figure II. 12 : Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.

### II.6.3 Influence de l'atmosphère sur l'éclairement solaire

L'énergie solaire est atténuée par différents composants atmosphériques comme les molécules d'air, les aérosols, les gaz, les gouttelettes d'eau nuageuses ou les cristaux de glace en suspension dans l'atmosphère. Les molécules d'air diffusent le rayonnement (diffusion de Rayleigh), et absorbent une partie de ce rayonnement, alors que les particules d'aérosols diffusent principalement le rayonnement solaire à travers l'atmosphère.

Les propriétés de diffusion et d'absorption dépendent des compositions chimiques de l'atmosphère, des propriétés physiques des particules solides en suspension dans l'atmosphère et de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.

La vapeur d'eau, l'ozone, le dioxyde de carbone et l'oxygène sont les importants gaz absorbants du rayonnement solaire. L'absorption de l'ozone se produit dans les domaines du visible et de l'ultraviolet du spectre solaire, alors que la grande partie de la bande d'absorption de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone se produit dans les domaines spectraux du proche infrarouge et rouge. Par ailleurs, l'oxygène se caractérise par de petites bandes d'absorption dans le spectre visible.

On retrouve l'influence de ces composants atmosphériques sur la distribution spectrale du rayonnement solaire direct et diffus, comme on peut le constater sur la figure (Fig II.13).<sup>[46]</sup>

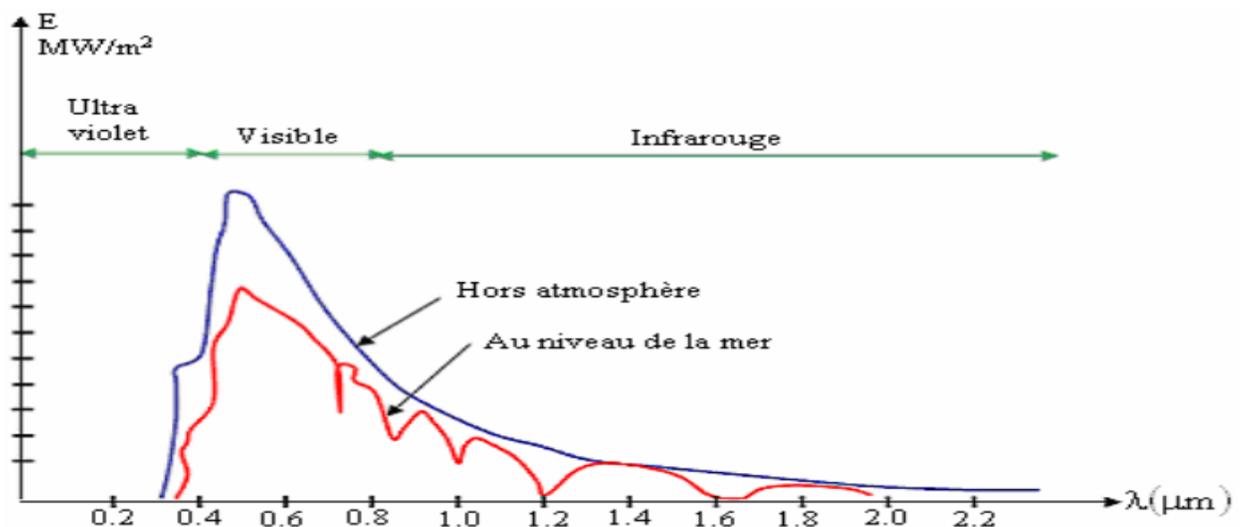


Figure II. 13 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

### II.7 La modélisation du rayonnement solaire par Matlab

#### II.7.1 Eclairement extra-terrestre

Le rayonnement solaire extraterrestre (hors atmosphère) est le rayonnement solaire qui frappe la surface de la couche atmosphérique.

##### II.7.1.1 Constante solaire

La constante solaire est l'intensité d'énergie solaire qui tombe sur une surface perpendiculaire aux rayons solaires, cette surface se trouvant à la limite de l'atmosphère et à une distance moyenne de  $150 \cdot 10^6$  km (distance moyenne Terre – soleil). Elle est indépendante des conditions météorologiques. Par contre elle dépend de la distance Terre-soleil. On peut l'exprimer ainsi :

$$I_0 = \sigma * T_s^4 * \left(\frac{R_s}{D_{t,s}}\right)^2 \quad \dots \text{ (Equ II 13)}$$

$T_s$  : Température du soleil égale à 5800 K.

$R_s$ : Rayon du soleil ( $696 \cdot 10^6$  m).

$D_{t,s}$  : Distance moyenne Terre soleil.

$\sigma$ : Constante de Stéphane Boltzmann =  $5.67 \cdot 10^{-8}$ . ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ).

En moyenne, la Terre reçoit donc  $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , en haute atmosphère et à la verticale, face au soleil.

De façon plus simple, la constante solaire est une puissance qui nous parvient du soleil en absence de l'atmosphère, par unité de surface et sur un plan normal. <sup>[14]</sup>

##### II.7.1.2 Correction de la distance terre-soleil

Les variations annuelles de la distance terre-soleil sont dues au fait que la trajectoire autour du soleil est une ellipse. Elles se traduisent par des variations du rayonnement hors atmosphère (l'éclairement solaire direct extra-terrestre).

Le coefficient de correction dû à cette variation de la distance a été déterminé à partir de la position de la Terre sur son orbite en fonction du jour de l'année et est donné par la relation :

## CHAPITRE II : Gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire

$$E_0 = (r_0 / r)^2 = 1.0001 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2 \Gamma + 0.000077 \sin 2 \Gamma$$

(Equ II 14)

Avec :

$r_0$ : la distance moyenne entre la Terre et le soleil (150 millions Km).

$r$ : la distance actuelle entre la Terre et le soleil.

$\Gamma$ : l'angle du jour exprimé en Radians est donné par l'équation (Equ II 15)

Ou encore :

$$E_0 = (r_0 / r)^2 = 1 + 0.033 [(2\pi (n_j) / 365)], \quad [14] \quad (\text{Equ II 16})$$

### II.7.2 L'angle d'incidence

L'angle d'incidence  $\theta_i$  est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré, elle est définie par l'inclinaison du plan  $\gamma_p$  et l'Azimut de la normale du plan  $\theta_p$  (orientation du plan),  $\theta_p$  est compté dans le sens rétrograde ( $\theta_p < 0$  vers l'Est,  $\theta_p > 0$  vers l'Ouest). L'angle d'incidence est calculé à partir du  $\sin(\theta_i)$  de la manière suivante :

$$\sin(\theta_i) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega - \lambda) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (\text{Equ II 17})$$

$$\text{Avec } \sin(\varphi) = -\cos(\varphi) \cdot \sin(\gamma_p) \cdot \cos(\theta_p) + \sin(\varphi) \cdot \cos(\gamma_p) \quad (\text{Equ II 18})$$

$$\text{Tg}(\lambda) = \frac{\sin(\gamma_p) \cdot \sin(\theta_p)}{\sin(\varphi) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\gamma_p)} \quad (\text{Equ II 19})$$

Les variations de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire pour une déclinaison de  $20^\circ$  à un lieu de latitude  $30^\circ$ , pour différentes valeurs de l'inclinaison  $\gamma_p$  sont représentées sur la figure (Fig II.14) :

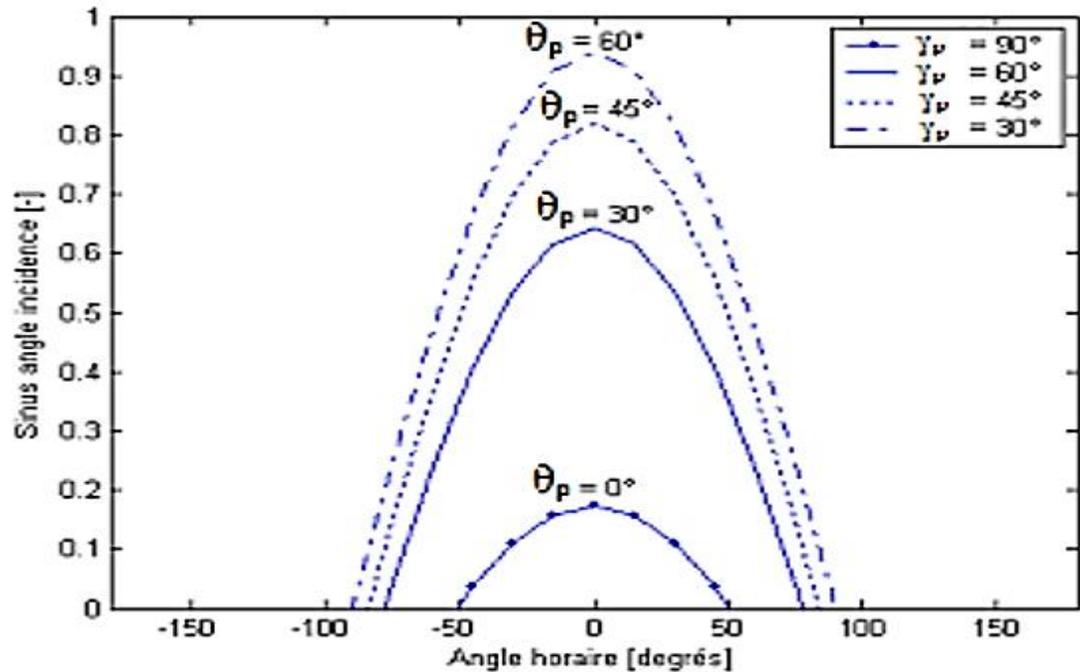


Figure II. 14 : Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.

### II.7.3 L'éclairement solaire reçu sur une surface horizontale

En utilisant le modèle de Capderou qui utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directes et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimés par des facteurs des troubles.

[51]

La connaissance du facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement direct traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par :

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2$$

L'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante : [51]

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1 (2 + \sin(\varphi)) A_{he} - 0.2 Z - (1.22 + 0.14 A_{he}) (1 - \sin(h)) \quad (\text{Equ II } 20)$$

## CHAPITRE II : Gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire

---

$$A_{he} = \text{Sin} ((360/365)*(j - 121)) \quad (\text{Equ II } 21)$$

Z : l'altitude de lieu.

T<sub>1</sub> : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche :

$$T_1 = 0.89^Z$$

T<sub>2</sub> : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption (il dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom β, T<sub>2</sub> est donné par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4 A_{he}) * 0.63^Z$$

### II.7.3.1 L'éclairement direct reçu sur une surface horizontale

L'éclairement direct obtenu sur une surface horizontale est donné par :

$$I = I_0 \text{Sin} (h) * C_{ts} * \exp (-T_L^* \cdot (0.9 + \frac{9.4}{0.89^Z} \text{Sin}(h))^{-1}) \quad (\text{Equ II } 22)$$

### II.7.3.2 L'éclairement diffus reçu sur une surface horizontale

L'éclairement diffus incident sur une surface horizontale est donné par : [51]

$$a = 1.1$$

$$b = \log ( T_L^* - T_0 ) - 2.8 + 1.02 \cdot (1 - \text{Sin}(h))^2 \quad (\text{Equ II } 23)$$

$$D = I_0 * C_{ts} * \exp((( -1 + 1.06 * \log (\text{Sin} (h)) + a - \sqrt{a^2 + b^2} ) \quad (\text{Equ II } 24)$$

### II.7.3.3 L'éclairement global reçu sur une surface horizontale

L'éclairement global reçu sur une surface horizontale est donné par :

$$G = I + D \quad (\text{Equ II } 25)$$

### **II.8 Conclusion**

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

**CHAPITRE III :**  
**Étude et conception du cuiseur**  
**solaire**

### **III.1 Introduction**

Le cuiseur solaire est un appareil basé sur la conversion en chaleur des rayonnements lumineux émis par le soleil. Il utilise généralement la technique de concentration des rayons solaires et/ou le phénomène de l'effet de serre.

Dans ce chapitre, après le principe de fonctionnement et la description de notre cuiseur solaire de type capteur sous vide avec réflecteurs on va faire une conception avec le logiciel SolidWorks puis une simulation optique avec le logiciel TracePro.

### **III.2 Conception mécanique du cuiseur**

Avant de faire la conception des cuiseurs, nous avons besoin de choisir la forme de cuiseur bien définie avec des dimensions précises.

#### **III.2.1 Description du cuiseur solaire PTC**

##### **III.2.1.1 Le Principe de fonctionnement du cuiseur solaire type sous vide**

Lorsque les rayons solaires brillent sur les réflecteur mobiles – qui suivent le soleil -, ils se reflètent au capteur solaire de type sous vide ce tube est de verre sous vide à l'intérieur lequel se trouve un absorbeur métallique noir avec un circuit hydraulique, qui capte l'énergie solaire et la transfère au fluide caloporteur dans notre cas c'est l'huile. Grâce aux propriétés isolantes du vide, à son tour, le capteur chauffe l'huile qui aussi chauffe la partie inférieure du boîtier.

##### **III.2.1.2 Les composants du cuiseur solaire**

Le cuiseur solaire est constitué d'une boîte extérieure en bois, une boîte interne de cuisson en cuivre ou inox, un capteur solaire sous vide qui est un tube de verre sous vide à l'intérieur lequel se trouve un absorbeur noir, un isolant thermique, des réflecteurs mobiles qui sont des tôles en inox avec une forme semi parabolique, une boîte de système de poursuite de soleil, des supports et un casier.

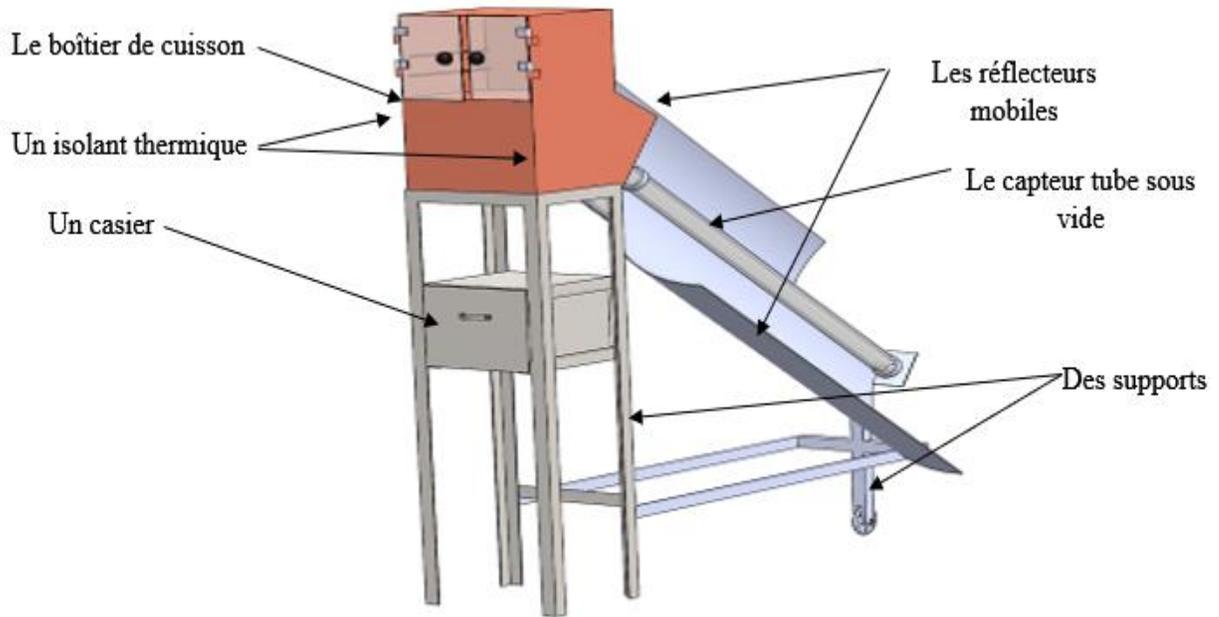
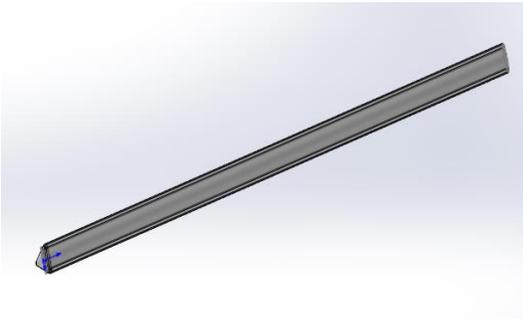


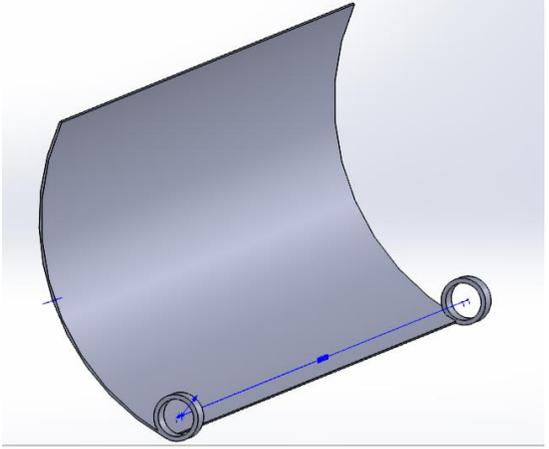
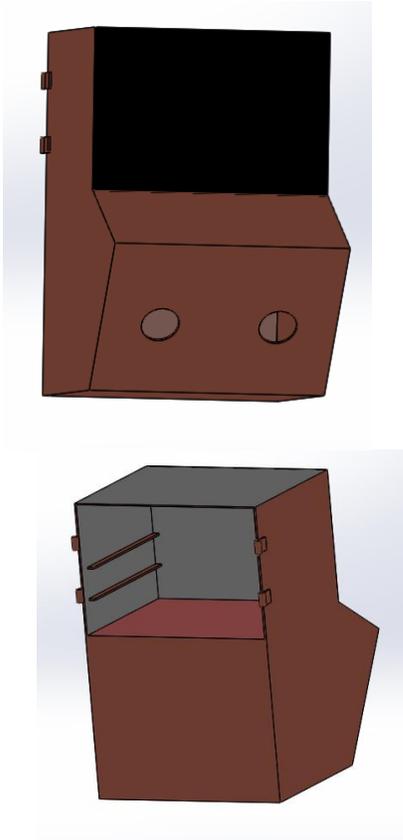
Figure III. 1 Le cuiseur solaire de type capteur sous vide avec réflecteurs.

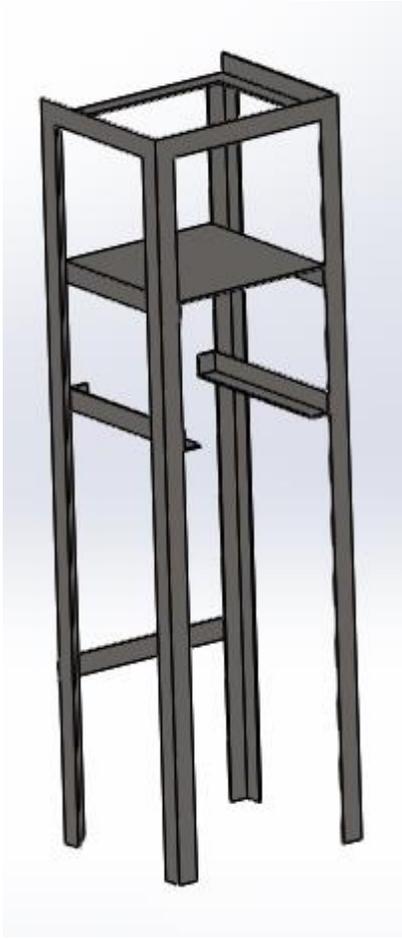
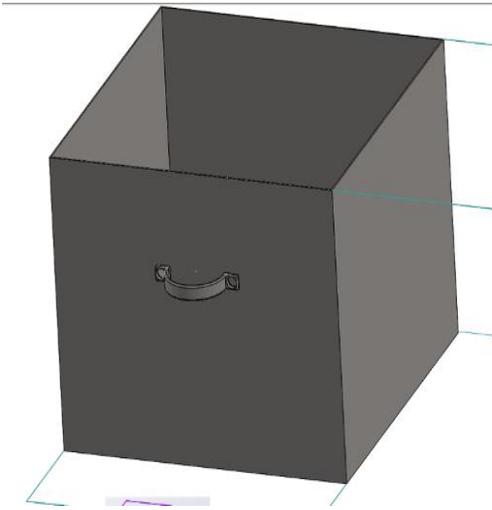
### III.2.2 Dimensionnement et conception du cuiseur PTC sous logiciel SolidWorks

Nous avons besoin de faire une conception assistée par ordinateur CAO. Pour cela nous avons utilisé le logiciel SolidWorks, voici un tableau qui résume le dimensionnement de différentes parties de cuiseur solaire :

Tableau III. 1 : Les dimensionnement de différentes parties de cuiseur solaire

Le capteur tube sous vide	<p><b>Un tube est de verre sous vide à l'intérieur lequel se trouve un absorbeur métallique noir de diamètre (48mm)</b></p> <p><b>Et une longueur de 1220mm</b></p>	
---------------------------	---	---

<p>Les réflecteur</p>	<p>Deux tôles en inox ou cuivre avec une forme semi parabolique (1000*500) mm</p>	
<p>Le boîtier</p>	<p>Une boîte extérieure en bois, une boîte interne de cuisson en cuivre ou inox  (500*500*800) mm</p>	

<p>La carcasse externe</p>	<p>Une carcasse en bois ou métal avec 4 pieds (1500*503*503) mm</p>	
<p>Le casier</p>	<p>Un casier en bois ou métal. Dimension (500*500*400) mm</p>	

### III.3 Simulation optique du cuiseur

#### III.3.1 Simulation optique avec le logiciel TracePro

La simulation optique est la simulation de la répartition des rayons solaires concentrés au niveau de l'absorbeur le capteur tube sous vide pour notre cas, et des réflecteurs mobiles qui sont ajoutés aux cuiseurs afin de connaître leurs effets sur le comportement optique de l'éclairement solaire reçu pour en arriver à une conception du design final optimisé. [52]

Le choix du logiciel de simulation s'est porté sur le logiciel de simulation optique professionnel le TracePro 7.0 [53]. Pour cela, nous avons commencé par le calcul des paramètres de position du soleil (hauteur et azimut) pour le site de Ghardaïa. Avec des relations trigonométriques, nous avons converti les coordonnées du soleil en coordonnées de source de lumière qu'on introduit au logiciel.

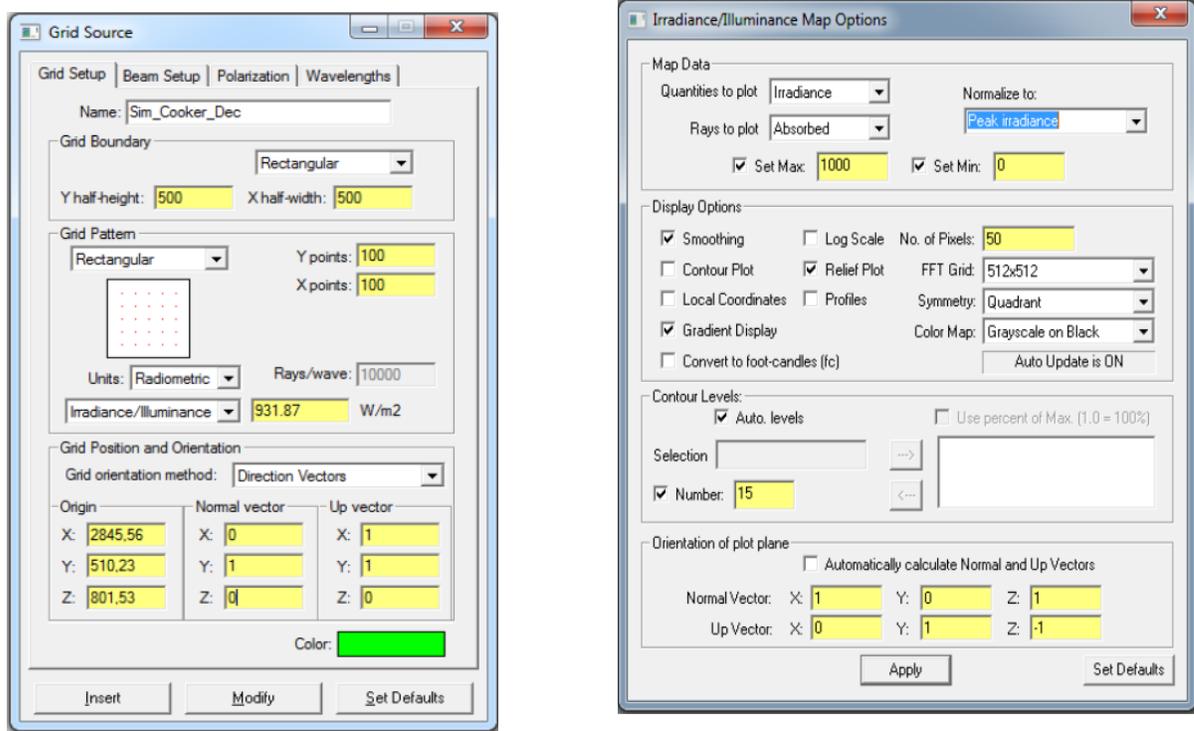


Figure III. 2 : La configurations de la source lumineuse et le choix des options du mapping de l'éclairement concentré.

Pour procéder à la simulation de plusieurs jours types de l'année, on insère les valeurs de l'éclairement solaire calculées précédemment ; par le logiciel Matlab 7.10 [54], pour chaque cas (Fig III.2).

Après conception des cuiseurs utilisant le logiciel SolidWorks <sup>[55]</sup>, on importe les formes des cuiseurs au logiciel TracePro 7.0 <sup>[53]</sup>, on ajoute des réflecteurs selon le cas considéré, les angles  $\alpha$ ,  $\gamma$ , et  $\lambda$  d'inclinaison des réflecteurs (Fig III.3).

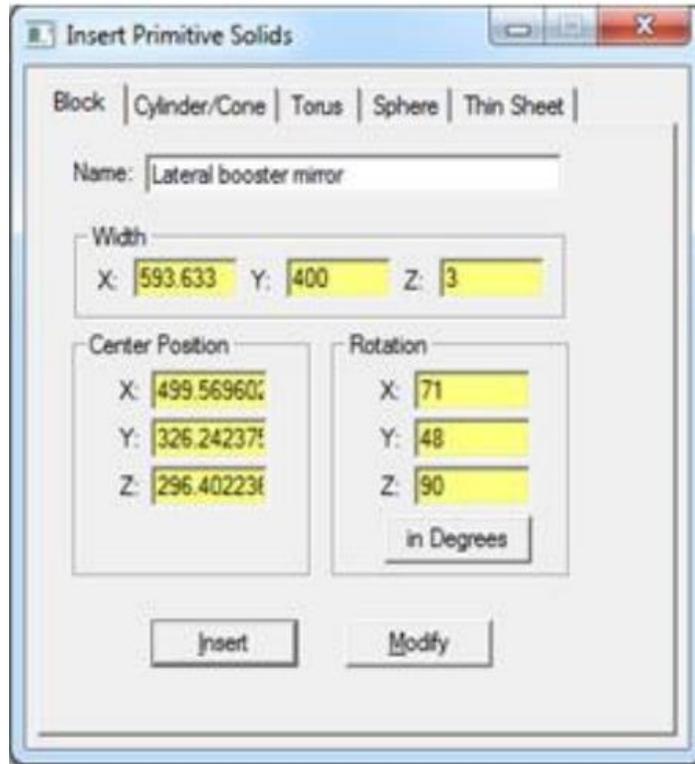


Figure III. 3 :insertions des réflecteurs.

### III.3.2 Résultats obtenus et discussion

La quantité d'énergie produite par les cuiseurs solaires dépend de la quantité de lumière à laquelle ils sont exposés. Étant donné que la position du soleil change pendant la journée et afin de collecter un maximum de rayonnement solaire.

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de rayonnement concentré au niveau du capteur tube sous vide de cuiseur. Les Figures(Fig III.4a ,Fig III.4.b) représentent clairement le comportement optique des rayons solaires reçus et réfléchis par les réflecteurs de cuiseur.

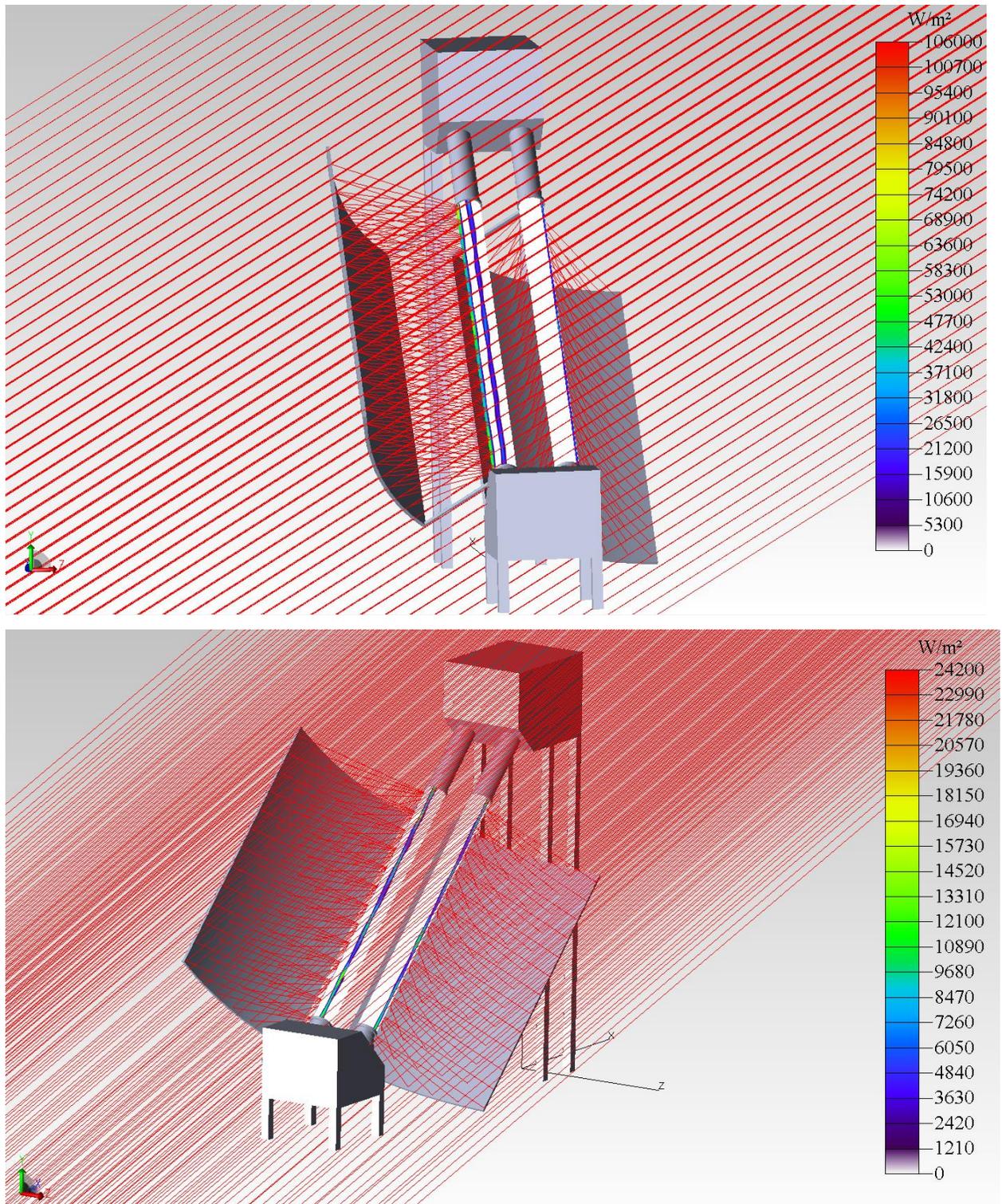


Figure III. 4 : La simulation du comportement optique des rayons solaires reçus et réfléchis par les réflecteurs de cuiseur.

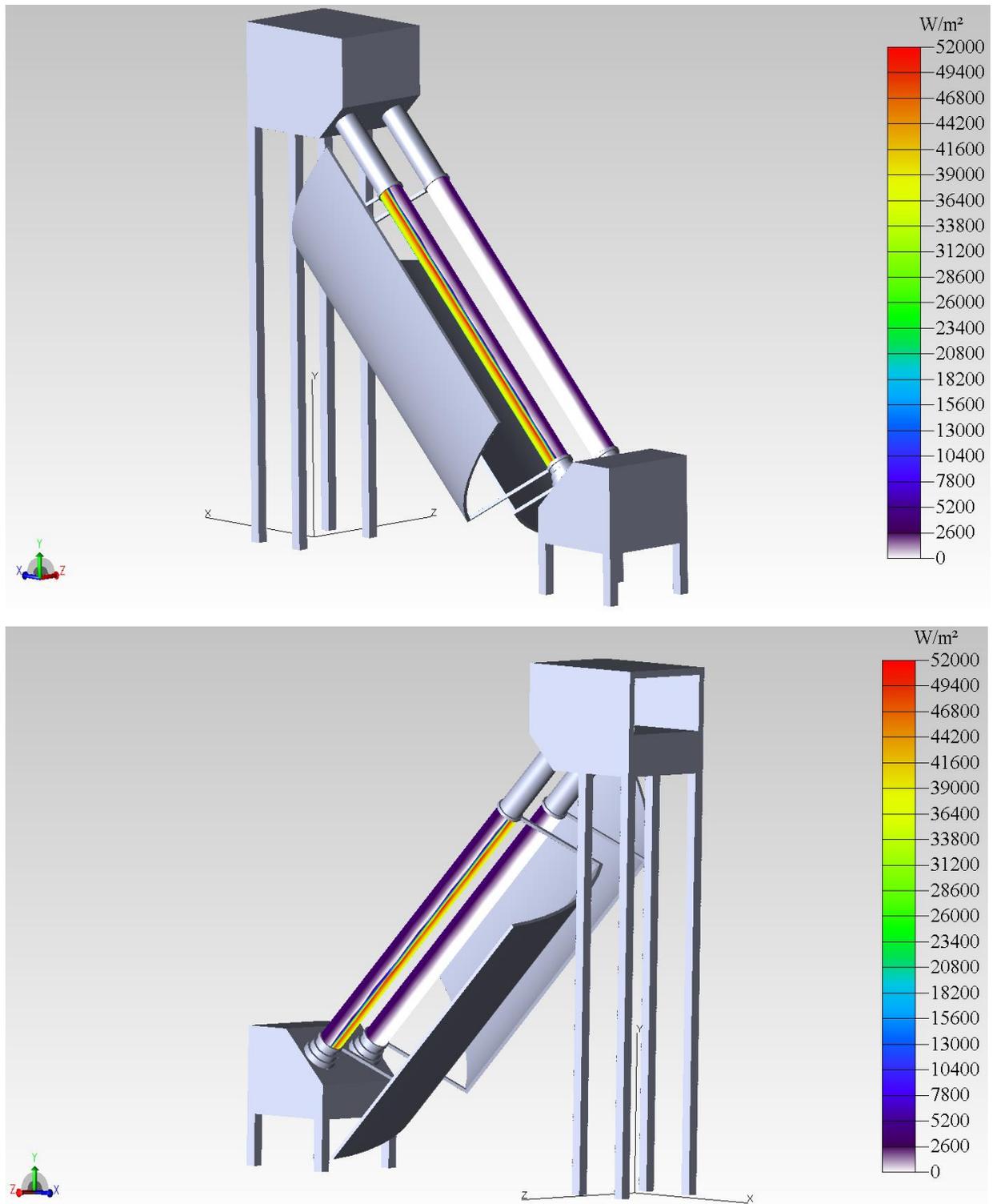


Figure III. 5 : Résultats de la simulation optique de cuiseurs de type capteur sou vide avec un réflecteur.

Les résultats de la simulation réalisée montrent que l'ajout du réflecteur et un capteur tube sous vide permet d'augmenter l'énergie captée dans le cuiseur jusqu'à 52 fois (X52) le rayonnement concentré moyen dans ce cas est de  $52000 \text{ W/m}^2$ .

### **III.4 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons fait une présentation et description du cuiseur de type capteur sous vide et leur principe de fonctionnement après on a réalisé une conception mécanique du cuiseur proposé à l'aide du logiciel SolidWorks est ensuite présenté, puis une simulation optique de la répartition des rayons solaires sur le réflecteur du cuiseur est effectuée en utilisant le logiciel TracePro.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

### Conclusion générale

Avec l'augmentation de la population de la planète, la demande d'énergie augmente et également l'épuisement de ses ressources, la cuisson est parmi les besoins de l'homme qui accroissent. En Algérie, l'exploitation du bois pour la cuisson entraîne l'épuisement des richesses forestières et donc la perturbation de l'écosystème, d'autre part l'utilisation de l'énergie traditionnelle (gaz naturel) menant à des problèmes environnementaux.

Dans ce contexte et dans le cadre de ce travail, on s'est proposé de faire la conception et la simulation d'un nouveau design de cuiseur solaire de type capteur tube sous vide et muni de réflecteurs à concentration d'énergie mobiles. Cette nouvelle configuration permet d'améliorer les performances du cuiseur et résoudre quelques problèmes liés à la cuisson solaire à savoir ; les rendements minimes à cause des faibles températures.

Après une étude bibliographique et un état de l'art sur les systèmes à cuisson solaire, leur développement et leur utilisation à travers le monde, nous avons commencé par l'étude détaillée de notre problématique. Une conception mécanique du cuiseur proposé à l'aide du logiciel SolidWorks est ensuite présentée, puis une simulation optique de la répartition des rayons solaires sur le réflecteur du cuiseur est effectuée en utilisant le logiciel TracePro.

Et comme perspective, L'Algérie a commencé dernièrement à s'introduire dans le solaire thermique à plusieurs échelles en coopération avec des sociétés étrangères, mais l'investissement reste encore minime par rapport à son potentiel énorme en énergie solaire. Pour cela, il est important que le pays commence à maîtriser cette technologie pour pouvoir à terme, équilibrer sa consommation en introduisant de plus en plus l'énergie solaire thermique et des énergies renouvelables en terme général. Un pays comme l'Algérie pourra donc dégager d'énormes quantités de gaz naturel pour l'exportation de la fête de l'intégration et de l'investissement dans ce genre de projet.

### Bibliographie

- [1] Gro Harlem Brundtland, Notre avenir à tous (Our Common Future), la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies ,1987.
- [2] <https://www.reeep.org>, Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership, « Glossary of terms in sustainable energy regulation » ,2004.
- [3] SER livre blanc, Le livre blanc des énergies renouvelables, 2012.
- [4] AQPER Association québécoise de la production des énergies renouvelables, Pourquoi choisir les énergies renouvelables ? ,2017.
- [5] Geoffroy Hureau, l'Institut français du pétrole Énergies nouvelles (IFPEN), 2013.
- [6] <https://www.kelwatt.fr/energie> , les différentes sources d'énergie, mis à jour le 01/06/2020.
- [7] K. Ogilvie, « L'abc des technologies de l'énergie renouvelable, Pollution Probe, » Canada, 2003.
- [8] <https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/l-energie-solaire-active>, Qu'est-ce que l'énergie solaire active ? 2017.
- [9] Solúcar, Inabensa, Fichtner, Ciemat, DLR, Final Technical Progress Report: 10 MW Solar Thermal Power Plant for Southern Spain, 2006.
- [10] ao, Z., Wang, Z., Lu, Z., Wei, X., Modeling and simulation of the Pioneer 1MW solar thermal central receiver system in China. Renewable Energy, 2009.
- [11] «Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region, » German Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics, Section Systems Analysis and Technology Assessment, Germany, 2005.
- [12] Annuaire économique des wilaya, Energies et mines en Algérie,2015.

- [13] Ammar LAICHI, Nabil BOUTARENE, Etude de l'effet de flexion des miroirs de la centrale solaire à tour de l'URAER-CDER à Ghardaïa, Mémoire de Master Université El-Hadj Lakhdar - BATNA 1, 2019.
- [14] Mesri Mokhtaria, Cheknane Ali, Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications.
- [15] <http://www.slg-instruments.com>, Albédomètre seconde classe, 2017.
- [16] The Olympic Museum, 2nd edition - The Olympic flame and torch relay, 2007
- [17] Beth Halacy - Daniel Stephen Halacy, Cooking with the sun, Morning Sun Press, 1992.
- [18] Yettou Fatiha, 'Conception et réalisation d'un système de cuisson solaire destiné au site saharien (Ghardaïa, Algérie)', Thèse de Doctorat, Univ Batna 2, 2015.
- [19] M. Asma, L. Messaouda, 'étude expérimentale pour la détermination de la courbe caractéristique d'un cuiseur solaire parabolique testé sous climat aride de Ghardaïa', mémoire de master Univ Batna 2, 2018.
- [20] Kera -energie.org.
- [21] Djebara amel, Guettaf zineb, « Etude comparative entre deux cuiseurs solaires testés sous conditions climatiques de Ghardaïa » mémoire de master Univ Batna 2, 2019.
- [22] Cuiseur solaire parabolique : faites-le vous-mêmes (doucement PDF).
- [23] <https://www.atlascuisinesolaire.com>
- [24] R. Mohamed Amine, B. Oussama, 'Etude et Réalisation d'un Cuiseur Solaire Boîte avec Réflecteurs à Concentration', mémoire master, Univ mentouri constantine.2012.
- [25] [Solarcooking.fandom.com/wiki/Category:Parabolic\\_solar\\_cooker\\_designs](http://Solarcooking.fandom.com/wiki/Category:Parabolic_solar_cooker_designs).

- [26] Al-Soud MS , Abdallah E, Akayleh A , Abdallah S , Hrayshat ES, «A parabolic solar cooker with automatic two axes sun tracking system,» *Applied Energy*, vol. 87, p. 463–470,2010.
- [27] Abu-Malouh R, Abdallah S, Muslih IM, «Design, construction and operation of spherical solar cooker with automatic sun tracking system,» *Energy Conversion and Management*, vol. 52,p. 615–620, 2011.
- [28] Kumar N, Agravat S, Chavda T, Mistry HN, «Design and development of efficient multipurpose domestic solar cookers/dryers, » *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2207-2011, 2008.
- [29] Kumar N, Chavda T, Mistry H.N, «A truncated pyramid non-tracking type multipurpose domestic solar cooker/hot water system,» *Applied Energy*, vol. 87, pp. 471-477, 2010.
- [30] Purohit I, Purohit P, «Instrumentation error analysis of a box-type solar cooker,» *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 365-375, 2009.
- [31] Kumar S, «Estimation of design parameters for thermal performance evaluation of box-type solar cooker,» *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1117-1126, 2005.
- [32] Kurt H, Atik K, Özkaymak M, Recebli Z, «Thermal performance parameters estimation of hot box type solar cooker by using artificial neural network,» *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 47, pp. 192-200, 2008.
- [33] Algifri AH, Al-Towaie HA, «Efficient orientation impacts of box-type solar cooker on the cooker performance,» *Solar Energy*, vol. 70, n° %12, pp. 165-170, 2001.
- [34] Schwarzer K, Vieira da Silva ME, «Characterisation and design methods of solar cookers,» *Solar Energy*, vol. 82, pp. 157-163, 2008.
- [35] Ekechukwu OV, Ugwuoke NT, «Design and measured performance of a plane reflector augmented box-type solar-energy cooker,» *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 1935-1952, 2003.

- [36] El-Sebaï AA, Ibrahim A, «Experimental testing of a box-type solar cooker using the standard procedure of cooking power,» *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1861-1871, 2005.
- [37] K. S, «Thermal performance study of box type solar cooker from heating characteristic curves,» *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 127-139, 2004.
- [38] Nahar NM, «Design, development and testing of a double reflector hot box solar cooker with a transparent insulation material,» *Renewable Energy*, vol. 23, p. 167–179, 2001.
- [39] Negi BS, Purohit I, «Experimental investigation of a box type solar cooker employing a non-tracking concentrator,» *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 577-604, 2005.
- [40] Amer EH, «Theoretical and experimental assessment of a double exposure solar cooker,» *Energy Conversion and Management*, vol. 44, pp. 2651-2663, 2003.
- [41] Richard P, «Exergy analysis of the solar cylindrical-parabolic cooker,» *Solar Energy*, vol. 79, pp. 221-233, 2005.
- [42] Ozturk HH, «Experimental determination of energy and exergy efficiency of the solar parabolic-cooker, » *Solar Energy*, vol. 77, pp. 67-71, 2004.
- [43] Bouden Abdelmalek "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque", Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [44] A. Khedim, 'L'énergie solaire utilisation thermique et photovoltaïque', ANEP, 359 p., 2005. J.M. Chasseriau, 'Conversion thermique du rayonnement solaire', Ed. Dunod, France., 1984.
- [45] ZIDANE Faouzi et HAMMI Sassi « Etude et Réalisation d'un séchoir solaire à capteur solaire plan. » mémoire fin d'étude université Abderrahmane MIRA BEJAIA 2016 /2017.
- [46] A. Labouret, *Energie solaire photovoltaïque*, Ed. Dunod, 2003.

- [47] F. Linke, «Transmissions - Koeffizient und Trübungsfaktor,» Beiträge zur Physik der Atmosphäre, vol. 10, pp. 91-103, 1922.
- [48] F. Kasten and A.T. Young, «Revised optical air mass tables and approximation formula,» Applied Optics, vol. 28, n° 122, p. 4735 – 4738, 1989.
- [49] F. Kasten, «A Simple Parameterization of Two Pyrheliometric formulae for determining the Linke Turbidity Factor,» Meteorology Rdsch, vol. 33, pp. 124-127, 1980.
- [50] A. Louche, G. Peri and M. Iqbal, «An analysis of Linke Turbidity Factor,» Solar Energy, vol. 37, n° 16, pp. 393-396, 1986.
- [51] M. Capderou, Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, vol1 et 2 : Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [52] F. Yettou, A. Gama, B. Azoui et A. Malek, « Etude comparative entre deux types de cuiseurs solaires boîtes en milieu aride, » Revue des Energies Renouvelables, vol. Numéro spécial SIENR'12, pp. 233-245, 2012.
- [53] Manuel, «TracePro software for opto-mechanical modeling,» Lambda Research Corporation, USA, 2010.
- [54] Manuel, Matlab/Simulink Tutorial, School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, 2010.
- [55] Logiciel, SolidWorks, 300 Baker Avenue, Concord, MA 01742: SolidWorks Corporation, <http://www.solidworks.com/>.