



*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 Technologie*

**Filière :** *Energies Renouvelables*

**Spécialité :** *Energies Renouvelables en Electrotechnique*

**Par : MOSBAH Abdelwahab et ACHOUR Abdelaziz**

**Thème**

**Contribution à la détermination expérimentale  
des performances d'un cuiseur solaire testé sous  
climat aride du Sud Algérien**

**Soutenu publiquement le : 17/06/2021**

**Devant le jury :**

<b>FERKOUS Khaled</b>	MAA	Université de Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>BENSEDDIK Abdelouahab</b>	MAA	Université de Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>YETTOU Fatiha</b>	MRA	URAER. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
<b>GAMA Amor</b>	MRA	URAER. Ghardaïa	<b>Co-encadreur</b>

**Année universitaire 2020/2021**

## **REMERCIEMENTS**

Mes remerciements et gratitude à notre superviseur Madame Docteur YETTOU, pour nous avoir guidés et nous avoir aidés dans le projet ses précieux conseils et ses compétences techniques. Merci pour ta gentillesse, le temps que tu nous as consacré, tes orientations, ton humanisme, ton soutien et surtout aux moments les plus difficiles.

Mes remerciements également le Docteur GAMA Amor pour son soutien tout au long du processus je ne sais pas comment vous remercier pour tout ce que vous nous avez apporté, transmis et appris tout au long de ce travail.

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.

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

Mes remerciements vont aussi à messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail. On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible.

Merci à tous et à toutes.

## *Dédicace*

A mes chers parents, qui ont toujours su allumer cette flamme en moi, je souhaite et leur dis :

Merci de m'avoir donné une bonne éducation. Et pour votre soutien et vos encouragements pendant mes études. Et de partager mes joies et mes peines, votre foi en moi et votre confiance en moi. Merci pour tout ce que vous m'avez appris et donné.

Merci pour tout.

Que Dieu m'accorde la force et les moyens de toujours prendre soin de vous.

Mes remerciements vont également à mes chers frères et sœurs et à tous les membres de la famille, et enfin, le mérite de ce travail va à toutes les personnes qui ont participé à sa réalisation et à qui j'exprime ma plus profonde gratitude et mes remerciements.

*Abdelouahab*

*&*

*Abdelaziz*

## ملخص

الطاقة الشمسية هي المصدر الأساسي للطاقة على سطح كوكبنا و هي طاقة نظيفة متجددة و مجانية. لقد استطاع الانسان اختراع بعض التطبيقات لتحقيق الاستفادة المباشرة لتلبية احتياجاته المختلفة للتماشي مع متطلبات عصره. و في هذه الاطروحة سنتحدث عن استخدام الطاقة الشمسية في الطهو باستخدام مطبخ شمسي دائري. هذا المطبخ تم انجازه في وحدة البحث التطبيقي للطاقات المتجددة بغرداية تحت معايير و مقاييس دولية حيث أجرينا عليه تجارب مختلفة لاختبار قدرته على الطهو و كذلك لتقييم الأداء لهذا المطبخ كالمردود الطاقوي.

**الكلمات المفتاحية:** الاشعاع الشمسي, مطبخ شمسي دائري, اختبارات تجريبية, تقييم الأداء.

## Résumé

L'énergie solaire est la principale source d'énergie à la surface de notre planète c'est une énergie propre renouvelable et gratuite. Les humains pouvaient inventer des applications pour obtenir un bénéfice direct pour répondre aux différents besoins de se conformer à ses exigences. Dans ce mémoire, nous allons parler de l'utilisation de l'énergie solaire pour la cuisson à l'aide d'un cuiseur solaire parabolique, ce cuiseur est réalisé à l'unité de recherche appliquée en énergie renouvelable (URAER) de Ghardaïa selon les normes et les standards internationaux. Différents tests ont été effectués pour tester la faisabilité du cuiseur à cuire et pour évaluer les performances de ce cuiseur comme le rendement énergétique.

**Mots-clés:** rayonnement solaire, cuiseur solaire parabolique, essais expérimentaux, l'évaluation des performances.

## Abstract

Solar energy is the main source of energy on the surface of our planet, it is a renewable and free of charge clean energy. Humans could invent applications to get a direct benefit to meet different needs to comply with its requirements. In this thesis, we are going to talk about the use of solar energy for cooking using a parabolic solar cooker, this cooker is realized in the applied research unit in renewable energy (URAER) of Ghardaïa according to international standards and norms. Different tests have been carried out to test the feasibility of the cooking cooker and to evaluate the performance of this cooker as energy efficiency.

**Keywords:** solar radiation, parabolic solar cooker, experimental testing, performance evaluation.

## Chapitre I

Figure I.1	Analyse spectrale du rayonnement solaire	4
Figure I.2	Composants du rayonnement solaire	4
Figure I.3	Pyrhéliomètre pour la mesure du rayonnement direct	5
Figure I.4	Pyranomètre pour la mesure du rayonnement global et diffus	6
Figure I.5	Schéma Le système à chauffe-eau solaire (énergie solaire active)	7
Figure I.6	Schéma d'une maison à énergie solaire passive	8
Figure I.7	carte d'éclairement solaire du monde	8
Figure I.8	la centrale solaire à tour	9
Figure I.9	Système à collecteurs cylindro-paraboliques	9
Figure I.10	Système à collecteurs paraboliques	10
Figure I.11	systèmes à miroirs de Fresnel	10
Figure I.12	Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire	11
Figure I.13	Représente principe d'un cuiseur de type boîte	14
Figure I.14	Représente principe d'un cuiseur à panneaux	14
Figure I.15	Représente principe d'un cuiseur parabolique	15
Figure I.16	Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs	16
Figure I.17	Heures propices à la cuisson solaire	18
Figure I.18	Capture ou réflexion des rayons du soleil	19
Figure I.19	Classification des cuiseurs solaires sans et avec stockage thermique	20
Figure I.20	Cuiseurs solaires boîtes : (a) sans réflecteur, (b) avec réflecteur, (c) avec deux réflecteurs, (d) avec trois réflecteurs, (e) avec quatre réflecteurs, et (f) avec huit réflecteurs.	22
Figure I.21	Cuiseurs à concentration : (a) cuiseur à panneaux, (b) cuiseur entonnoir, (c) réflecteur sphérique, (d) réflecteur parabolique, (e) concentrateur Fresnel, et (f) concentrateur cylindro- parabolique.	22
Figure I.22	Cuiseurs solaires du type indirect, (a) avec capteur plan, (b) avec capteurs sous vides, (c) avec concentrateur parabolique, (d) avec concentrateur sphérique	23
Figure I.23	Stockage par chaleur sensible :(a) avec l'huile des moteurs, (b) avec le sable	24
Figure I.24	Stockage par chaleur latente en utilisant Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	25

## Chapitre II

Figure II.1	Image de l'étoile soleil du système solaire	28
Figure II.2	Variation de la déclinaison ( $\delta$ ) solaire en fonction du jour (N)	30
Figure II.3	Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil)	31
Figure II.4	Variation de la hauteur du soleil ( $\gamma_s$ ) en fonction du jour (N)	32

Figure II.5	Variation de l'azimut solaire ( $\chi_s$ ) en fonction du temps	33
Figure II.6	La structure verticale de l'atmosphère	34
Figure II.7	Variation de la masse d'air ( $m_A$ ) en fonction de la hauteur du soleil ( $\gamma_s$ )	35
Figure II.8	Variation de l'épaisseur optique ( $\delta_R$ ) de l'atmosphère en fonction de la masse d'air ( $m_A$ )	36
Figure II.9	Eclairement solaire extraterrestre	38
Figure II.10	Variation de le rayonnement solaire extraterrestre en fonction du jour	39
Figure II.11	Variation des rayonnement incident sur un plan horizontal, en fonction de temps sur site de Ghardaïa	40
Figure II.12	Variation des rayonnement incident sur un plan quelconque, en fonction de temps sur site de Ghardaïa	44
Figure II.13	Schéma de la trajectoire des rayons solaires incidents sur le cuiseur dans cas d'une bonne orientation et d'une absence d'orientation (déviation des rayons)	45
Figure II.14	Site de Ghardaïa	46
Figure II.15	photo de l'Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER) Ghardaïa	47
Figure II.16	Instruments de mesure du rayonnement solaire ; (a): Pyrhéliomètre (mesure du rayonnement direct), (b): Pyranomètre (mesure du rayonnement global), (c): Pyranomètre (mesure du rayonnement diffus)	49

### Chapitre III

Figure III.1	Une vue prise lors de test du cuiseur parabolique à l'URAER	54
Figure III.2	Schéma du cuiseur parabolique de l'URAER, Ghardaïa et les différentes composantes du rayonnement incident sur le concentrateur	55
Figure III.3	Vue du cuiseur parabolique lors d'un test du mois de Mai 2021 pris à deux heures différentes à 10:30h AM et 12:30h AM	56
Figure III.4	Schéma synoptique de l'installation des cuiseurs solaires	57
Figure III.5	Visualisation des températures sur un micro-ordinateur connecté à une unité d'acquisition de donnée	58
Figure III.6	Variations du rayonnement direct et diffus horizontal (Modèle Capderou)	59
Figure III.7	Rayonnement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude ( $32^\circ$ ) pour un jour type du mois de Décembre et de Juin	61
Figure III.8	Eclairement incident sur un plan vertical Sud et un plan vertical Est pour un jour type du mois de Décembre et de Juin	61
Figure III.9	Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver	62
Figure III.10	Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement direct normal et global incliné pour un jour clair d'hiver	63
Figure III.11	Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été	63

Figure III.12	Variation des températures de l'eau dans l'ustensile et l'éclairement solaire avec le temps dans le cas d'une charge de 1 kg	65
Figure III.13	Vue du cuiseur durant les deux tests de chauffage du 8 et 9 juin	66
Figure III.14	Evolution de la température de l'eau au niveau de l'ustensile de cuisson pour le test de chauffage de 1 litre d'eau de la journée du 8 Juin 2021	66
Figure III.15	Evolution des valeurs du rayonnement solaire pour la journée du test du 8 Juin	67
Figure III.16	Evolution de la température de l'eau au niveau de l'ustensile de cuisson pour le test de chauffage de 1 litre et demi d'eau de la journée du 9 Juin 2021	67
Figure III.17	Evolution des valeurs du rayonnement solaire pour la journée du test du 9 Juin	68
Figure III.18	Vue du cuiseur durant les deux tests de refroidissement du 17 et 20 Mai	69
Figure III.19	Evolution de la température de l'eau au niveau de l'ustensile de cuisson pour le test de refroidissement de 1 litre d'eau de la journée du 17 Mai 2021	69
Figure III.20	Evolution des valeurs du rayonnement solaire pour la journée du test du 17 Mai	70
Figure III.21	Evolution de la température de l'eau au niveau de l'ustensile de cuisson pour le test de refroidissement de 1 litre et demi d'eau de la journée du 20 Mai 2021	70
Figure III.22	Evolution des valeurs du rayonnement solaire pour la journée du test du 20 Mai	71
Figure III.23	Effet de la température sur la puissance de cuisson du cuiseur solaire parabolique sous des conditions de test de chauffage suivant la méthode suggéré par Funk	72
Figure III.24	Rendement instantané en fonction de $(\Delta T/I_n)$ pour les deux tests effectués sur le cuiseur solaire parabolique	73

## Chapitre I

Tableau I.1	Représente les facteurs essentiels pour la cuisson solaire	17
-------------	--	----

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
$\varphi$	La latitude	Degrés
$\lambda$	Longitude	Degrés
$z$	L' altitude	Km
$N$	Numéro du jour	[-]
$TSM$	Temps solaire moyen	Heure
$TSV$	Temps solaire vrai	Heure
$\omega$	Angle horaire	Degrés
$\delta$	Déclinaison solaire	Degrés
$ET$	Equation du temps	Heure
$\theta_z$	angle zénithal	Degrés
$\gamma_s$	Hauteur du soleil	Degrés
$\chi_s$	Azimut du soleil	Degrés
$m_A$	Masse atmosphérique	[-]
$\delta_R$	Epaisseur de Rayleigh	[-]
$T_L$	Facteur de trouble de Linke	[-]
$T_0$	Trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau	[-]
$T_1$	Trouble du à la diffusion moléculaire	[-]
$T_2$	Trouble relatif à la diffusion par les aérosols	[-]
$A_{he}$	Alternance hiver été	W/m <sup>2</sup>
$I_0$	Constante solaire	W/m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Correction de distance terre soleil	[-]
$G_0$	Eclairement solaire extraterrestre	W/m <sup>2</sup>
$IB_h$	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$ID_h$	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$IG_h$	Eclairement global incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$\delta^i$	Angle d'incidence	Degrés
$IN$	Eclairement direct normal incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$IB_i$	Eclairement direct incident sur le plan quelconque	W/m <sup>2</sup>
$\beta$	Inclinaison du plan	Degrés
$\alpha$	L'orientation du plan	Degrés
$\gamma$	Hauteur de la normal du plan	Degrés
$\rho_g$	Albédo du sol	[-]
$\delta_a$	Composante due à l'albédo	[-]
$\delta_i$	Composante isotrope du ciel	[-]
$\delta_i'$	Composante due à la rétrodiffusion	[-]
$\delta_d$	Composante directe	[-]
$\delta_h$	Composante du cercle de l'horizon	[-]
$ID_a^i$	Composante du diffus isotrope du sol	W/m <sup>2</sup>
$ID_i^i$	Composante du diffus isotrope du ciel	W/m <sup>2</sup>
$ID_d^i$	Composante du diffus directionnel	W/m <sup>2</sup>

$ID_d^i$	Composante du diffus du cercle de l'horizon	W/m <sup>2</sup>
$ID_{ciel}^i$	Composante du diffus du ciel	W/m <sup>2</sup>
$ID_i$	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque	W/m <sup>2</sup>
$IG_i$	Eclairement global incident sur un plan quelconque	W/m <sup>2</sup>
F'UL	Facteur de perte de chaleur	/
F'η <sub>o</sub>	Facteur d'efficacité optique	/
T <sub>wi</sub>	Température de l'eau initiale	°C
T <sub>wf</sub>	Température de l'eau finale	°C
$\bar{T}_a$	Température ambiante moyenne de l'air	°C
$\bar{I}_b$	Moyenne du rayonnement solaire direct	W/m <sup>2</sup>
A <sub>p</sub>	Surface d'ouverture de la parabole	m <sup>2</sup>
A <sub>t</sub>	Surface de l'ustensile de cuisson	m <sup>2</sup>
(MC)' <sub>w</sub>	Puissance calorifique combinée de l'eau	W
P	Puissance de cuisson	W
τ	Intervalle de temps pendant les deux températures de T <sub>wi</sub> à T <sub>wf</sub>	min
τ <sub>boil</sub>	Temps d'ébullition pour la période de chaleur sensible	min
E <sub>i</sub>	Energie d'entrée du cuiseur	kJ
E <sub>o</sub>	Energie de sortie du cuiseur	kJ
Δt	Intervalle de temps	s
W <sub>s</sub>	La vitesse du vent	s
η	Rendement énergétique du cuiseur	%

---

**TABLE DES MATIERES**
**RESUME****LISTE DES FIGURES****LISTE DES TABLEAUX****NOMENCLATURE****INTRODUCTION GENERALE** **1****CHAPITRE I :GENERALITES SUR LE SOLAIRE ET LES SYSTEMES A  
CUISSON SOLAIRE**

<b>I.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>I.2.</b>	<b>Le rayonnement et l'énergie solaire</b>	<b>3</b>
I.2.1.	Le rayonnement solaire	3
I.2.2.	Les instruments de mesure du rayonnement solaire	5
I.2.2.1	La mesure du rayonnement solaire direct	5
I.2.2.2.	La mesure du rayonnement solaire global et diffus	5
I.2.3.	Définition de l'énergie solaire	6
I.2.3.1.	L'énergie solaire thermique	6
a.	Energie solaire active	7
b.	Energie solaire passive	7
I.2.4.	Les technologies solaires à concentration	8
I.2.4.1.	Les centrales à tour	9
I.2.4.2.	Les centrales à collecteur cylindro-parabolique	9
I.2.4.3.	Les centrales à collecteurs paraboliques	10
I.2.4.4.	Les centrales solaires à miroirs de Fresnel	10
I.2.5.	Le potentiel solaire en Algérie	11
<b>I.3.</b>	<b>Les cuiseurs solaires</b>	<b>12</b>
I.3.1.	Histoire de la cuisson solaire	12
I.3.2.	Principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire	13
I.3.3.	Types de cuissons solaires	14
I.3.3.1.	Cuiseur de type boîte	14
I.3.3.2.	Cuiseur à panneaux	14

---

I.3.3.3.	Cuiseur parabolique	15
I.3.4.	Facteurs nécessaires pour la cuisson solaire	15
I.3.4.1.	Températures de cuisson solaire	15
I.3.4.2.	Temps de cuisson solaire	16
I.3.4.3.	Emplacement du cuiseur solaire	18
I.3.4.4.	Moment d'utilisation du cuiseur solaire	18
I.3.4.5.	Types de récipients utilisés pour la cuisson des aliments	19
I.3.5.	Classification des cuiseurs solaires	19
I.3.5.1.	Les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur	20
I.3.5.2.	Cuiseurs solaires type direct	21
I.3.5.3.	Cuiseurs solaires boîte	21
I.3.5.4.	Cuiseurs solaires à concentration	22
I.3.5.5.	Cuiseurs solaires type indirect	23
I.3.6.	Cuiseurs solaires avec stockage de chaleur	24
I.3.6.1.	Stockage avec chaleur sensible	24
I.3.6.2.	Stockage par chaleur latente	24
I.3.7.	Les avantages et les inconvénients des cuiseurs solaires	25
I.3.7.1.	Les avantages des cuiseurs solaires	25
I.3.7.2.	Les inconvénients des cuiseurs solaires	26
<b>I.4</b>	<b>I.4. Conclusion</b>	<b>26</b>

## **CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE ET DETERMINATION DES PERFORMANCES DU CUISEUR**

<b>II.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>27</b>
<b>II.2.</b>	<b>Modélisation de l'éclairement solaire par Matlab</b>	<b>27</b>
II.2.1.	Paramètres géographiques	27
II.2.1.1.	La latitude	27
II.2.1.2.	La longitude	27
II.2.1.3.	L'altitude	28
II.2.1.4.	Le méridien	28

---

II.2.2.	Paramètres horaires	29
II.2.2.1.	Temps solaires	29
II.2.2.2.	Angle horaire	29
II.2.2.3.	Déclinaison solaire	29
II.2.2.4.	Equation du temps	30
II.2.3.	Paramètres de position du soleil	31
II.2.3.1.	Hauteur du soleil	31
II.2.3.2.	Azimut du soleil	32
II.2.4.	Paramètres de l'atmosphère	33
II.2.4.1.	L'atmosphère	33
II.2.4.2.	Masse atmosphérique	34
II.2.4.3.	Epaisseur optique de l'atmosphère	35
II.2.5.	Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère	37
II.2.5.1.	Facteur de trouble de Linke	37
II.2.6.	Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal	37
II.2.6.1.	Eclairement hors atmosphère	37
II.2.6.2.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	39
II.2.6.3.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	39
II.2.6.4.	Eclairement global incident sur un plan horizontal	40
II.2.7.	Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque	41
II.2.7.1.	Angle d'incidence	41
II.2.7.2.	Eclairement direct incident sur le plan quelconque	41
II.2.7.3.	Eclairement diffus incident sur le plan quelconque	42
II.2.7.4.	Eclairement global incident sur un plan quelconque	44
<b>II.3.</b>	<b>Conception mécanique et simulation optique du cuiseur</b>	<b>45</b>
II.3.1.	Conception mécanique par Solid Works	45
II.3.2.	Simulation optique avec le logiciel TracePro	45
<b>II.4.</b>	<b>Présentation du lieu de stage</b>	<b>46</b>
II.4.1.	Site de Ghardaïa	46
II.4.2.	Aperçu sur l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER)	47
II.4.3.	Equipe Mini Centrales Thermodynamiques	48

---

II.4.4.	Données utilisées	48
<b>II.5.</b>	<b>Méthodologies de test adoptées</b>	<b>49</b>
II.5.1.	Méthode de tests suggérée par Mullick et al.	49
II.5.2.	Méthode de tests suggérée par Funk	50
II.5.3.	Calcul du temps d'ébullition	51
II.5.4.	Détermination du rendement énergétique du cuiseur	51
<b>II.6.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>52</b>

**CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE, RESULTATS OBTENUS,  
INTERPRETATION ET DISCUSSION**

<b>III.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>53</b>
<b>III.2.</b>	<b>Etude expérimentale du cuiseur solaire parabolique</b>	<b>53</b>
III.2.1.	Description du cuiseur solaire parabolique	53
III.2.2.	Temps d'ajustement du cuiseur	55
III.2.3.	Schéma synoptique de la chaîne de mesure	56
III.2.4.	Montage des capteurs de mesures et accès aux données par ordinateur	57
III.2.5.	Description des tests effectués	58
<b>III.3.</b>	<b>Résultats et discussion de la partie éclairement solaire</b>	<b>59</b>
III.3.1.	Influence du facteur $T_L$ sur le rayonnement solaire	59
III.3.2.	Application du modèle au site de Ghardaïa	60
III.3.3.	Validation et discussion des résultats	62
<b>III.4.</b>	<b>Résultats et discussion de la partie cuiseur solaire</b>	<b>64</b>
III.4.1.	Tests d'évolution des températures de l'eau	64
III.4.2.	Tests relatifs aux chauffages	65
III.4.3.	Tests relatifs refroidissements	68
III.4.4.	La puissance de cuisson du cuiseur parabolique	71
III.4.5.	Le rendement instantané du cuiseur parabolique	72
<b>III.5.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>73</b>

<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>74</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>75</b>

---

# Introduction Générale

### INTRODUCTION GENERALE

Les besoins énergétiques de l'humanité n'ont pas cessé de croître avec son évolution: on a utilisé d'abord des ressources naturelles tel que le charbon, le bois et par la suite avec le progrès scientifique, le pétrole, le gaz, l'énergie hydraulique et l'énergie nucléaire. Actuellement les énergies fossiles sont consommées bien plus rapidement qu'elles ne se forment dans la nature et selon les estimations, les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au plus tard vers 2100 si des efforts sont fournis concernant la production et la consommation nécessaire. Cette forme d'énergie étant limitée dans le temps, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser d'autres sources d'énergies, tout en tenant compte des notions économiques et environnementales.

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires et produit aussi de la chaleur grâce aux capteurs solaires photo-thermiques. Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente. C'est une énergie propre qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil, est disponible partout dans le monde, gratuit, diffuse et inépuisable.

Notre pays dispos d'un des plus grands gisements solaires dans le monde et son utilisation imminente demeure la meilleure alternative au moment même où le gaz et le pétrole commencent d'une part à s'épuiser et d'autre part à subir une chute sérieuse des prix dans le monde.

Les applications solaires sont très diverses et on peut citer à titre d'exemples : la production d'électricité, le séchage solaire, le chauffage solaire et la réfrigération domestique et industrielle et la liste n'est pas exhaustive.

Nous allons nous intéresser à une des applications les plus prometteuses; à savoir les cuiseurs solaires, qui sont ni plus ni moins que de simples capteurs solaires à concentration. Mais il y a d'autres types : à boîte ou à panneaux.

La cuisson solaire est une des technologies les plus économiques et les plus répandues dans les régions montagneuses rurales et sahariennes où le soleil est présent dans la quasi-totalité des jours de l'année. La cuisson des aliments revient très chère quand on exploite les sources énergétiques conventionnelles, elle induit des conséquences désastreuses sur l'écosystème en exploitant le bois très noble de la région.

Le cuiseur solaire parabolique repose sur le principe de la concentration des rayons : le faisceau des rayons parallèles du soleil se reflète sur le miroir parabolique et les rayons convergent en un même point, le foyer de la parabole. En heurtant un récipient sombre placé en ce point, les rayons vont libérer leur énergie sous forme de chaleur.

Concernant la partie pratique, on s'est déplacé durant un mois à l'URAER de Ghardaïa pour faire des tests expérimentaux sur un cuiseur solaire parabolique dans le but de l'évaluation de ces performances, le cuiseur est réalisé par des chercheurs de cette Unité de Recherche en Energies Renouvelables.

Notre travail est composé de trois chapitres avec une introduction et une conclusion générale selon la structuration suivante :

- Dans le premier chapitre, nous présentons les définitions des données astronomiques et des notions relatives au rayonnement solaire couramment utilisées dans toute étude ayant relation avec le domaine solaire.
- Le deuxième chapitre concerne la description et le fonctionnement des cuiseurs en général, ainsi que de leurs avantages et inconvénients.
- Le troisième chapitre retrace notre étude théorique et expérimentale et éventuellement les résultats obtenus.

---

## **CHAPITRE I**

# **Généralités sur le solaire et les systèmes a cuisson solaire**

## I.1.Introduction

L'utilisation de l'énergie solaire doit être exploitée dans toute la planète. Nous allons donc fournir des informations générales sur l'énergie solaire et son utilisation dans l'art de cuisiner. Les cuissons traditionnelles sont néfastes pour l'environnement et participent à l'aggravation de la pollution et le réchauffement de la planète, elles utilisent souvent des énergies fossiles dont les stocks ne sont pas illimités, les cuissons au bois contribuent à la déforestation dans certaines régions. C'est pourquoi l'utilisation d'un cuiseur solaire peut s'avérer être la solution la plus écologique pour la cuisson des aliments.

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude des cuiseurs à énergie solaire, leur principe de fonctionnement, les types de cuiseurs qui existent et les facteurs essentiels pour la cuisson solaire. Des prototypes de cuiseurs développés et produits à travers le monde seront également discutés et étudiés et leur impact environnemental.

## I.2. Le rayonnement et l'énergie solaire

### I.2.1. Le rayonnement 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.1) représente la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi [1] :

- 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  $1.37 \text{ kW/m}^2$  à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1200 \text{ W/m}^2$ . La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui augmentent ou diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [1].

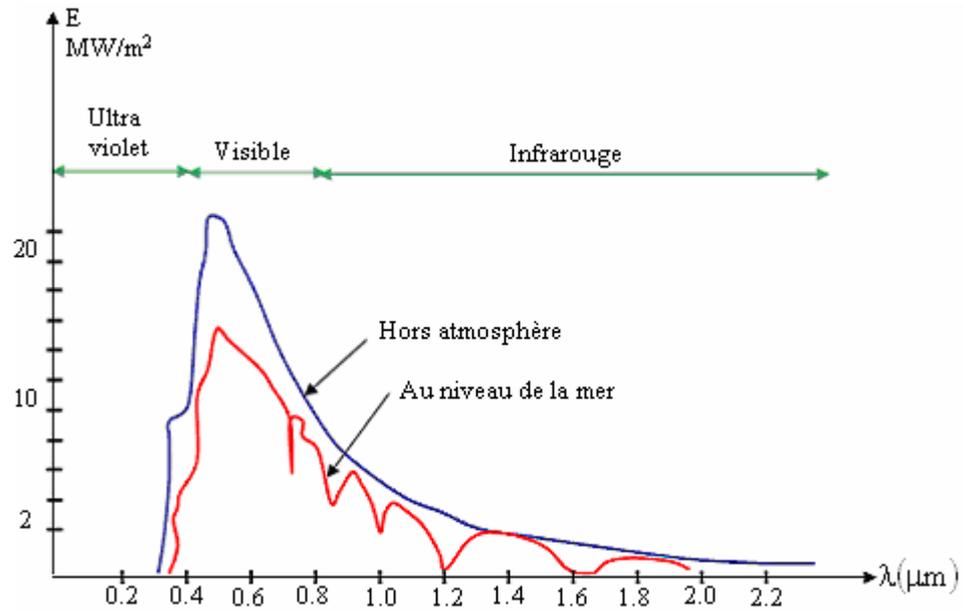


Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [1].

On décompose le rayonnement global (total) terrestre en rayonnement direct (rayonnement provenant directement du soleil) et en rayonnement diffus (rayonnement provenant de l'atmosphère). Un capteur incliné d'un angle donné sur l'horizontale subit une autre composante du rayonnement : la part renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffuse par le sol (FigI.2)

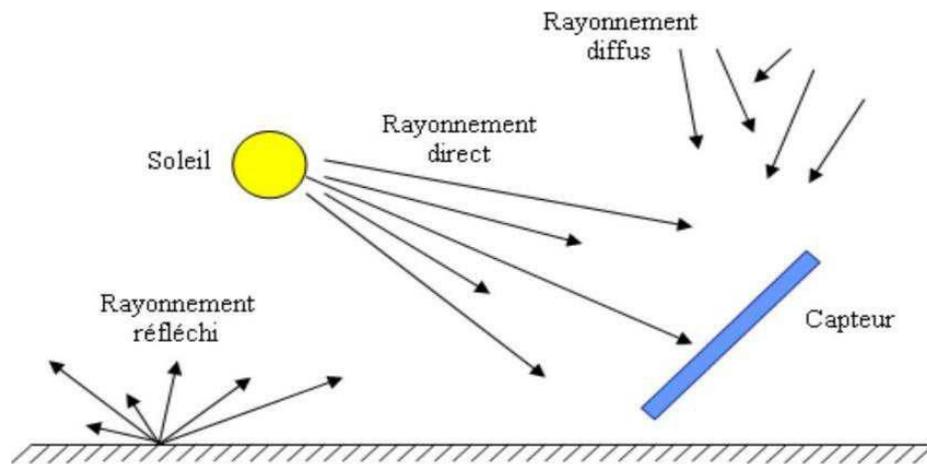


Figure I.2 : Composants du rayonnement solaire

### I.2.2. Les instruments de mesure du rayonnement solaire

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

### I.2.2.1. La mesure du rayonnement solaire direct

Au sol, la mesure du rayonnement solaire direct est faite à l'aide d'un pyréliomètre (Fig I.3), cet instrument est en permanence orienté vers le soleil et ne mesure que le rayonnement provenant du seul disque solaire. Le rayonnement capté est absorbé par une surface noire, la différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement direct. Pour mesurer la répartition spectrale du rayonnement solaire, on utilise un spectroradiomètre qui fournit la densité spectrale d'éclairement énergétique du rayonnement [14].



Figure I.3 : Pyréliomètre pour la mesure du rayonnement direct.

### I.2.2.2. La mesure du rayonnement solaire global et diffus

La mesure du rayonnement solaire global est faite à l'aide d'un pyranomètre (Fig I.4), cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie.

Le domaine spectral couvert s'étend de 0.3 à 3  $\mu\text{m}$ . Le rayonnement reçu est converti en chaleur par la surface noircie. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global ; elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série [14].



Figure I.4 : Pyranomètre pour la mesure du rayonnement global et diffus.

### **I.2.3. Définition de l'énergie solaire**

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du Soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre [5]. L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour) [6]. L'un de ses avantages les plus importants est que [1] :

- Locale : elle est disponible partout sur notre planète.
- Gratuite : seul l'investissement dans l'installation solaire est nécessaire.
- Silencieuse : les rayons solaires nous arrivent dans le plus grand silence.
- Durable : de par son caractère renouvelable, elle est durable.

#### **I.2.3.1. L'énergie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique consiste en la transformation des rayons du soleil en énergie thermique. C'est une forme d'énergie renouvelable, durable et respectueuse de l'environnement. Il en existe deux types ; indirecte, appelée énergie solaire active, et énergie directe, appelée énergie solaire passive.[7].

## a. Energie solaire active

Traditionnellement, ce terme désigne les applications de température. Des capteurs solaires thermiques sont installés sur les toits des bâtiments. Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur (Fig I.5). La chaleur est ensuite utilisée afin de produire de l'eau chaude sanitaire ou bien encore chauffer des locaux [8].

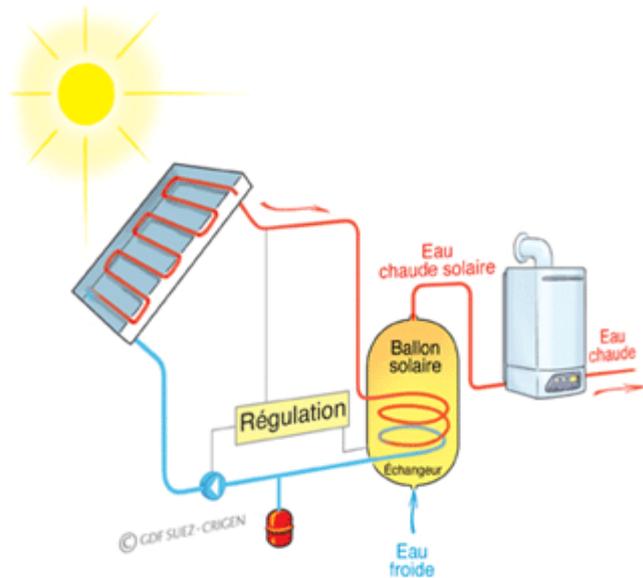


Figure I.5 : Schéma Le système à chauffe-eau solaire (énergie solaire active) [9].

## b. Energie solaire passive

On peut également citer les installations solaires passives. Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs (les capteurs solaires). Ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi de matériaux spéciaux. L'utilisation passive de l'énergie du Soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux (Fig I.6) [8].

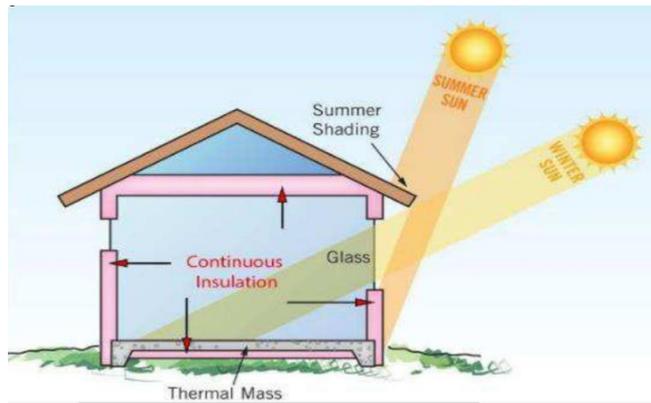


Figure I.6 : Schéma d'une maison à énergie solaire passive [9].

### I.2.4. Les technologies solaires à concentration

Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et 2000°C, avec un rendement supérieur à 70%. Cette chaleur primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés de transformation ou de synthèse de matériaux ou bien être convertie en vecteur énergétique comme l'électricité ou l'hydrogène. La ressource est ici le rayonnement solaire direct, qui représente entre 50% et 90% de la totalité du rayonnement solaire. La partie diffuse n'est en effet pas collectée par les dispositifs à concentration. Plus abondante dans une zone géographique appelée communément carte d'éclairement solaire indiquée sur (la figure I.7) la ressource en rayonnement solaire direct est considérable à l'échelle planétaire [11].

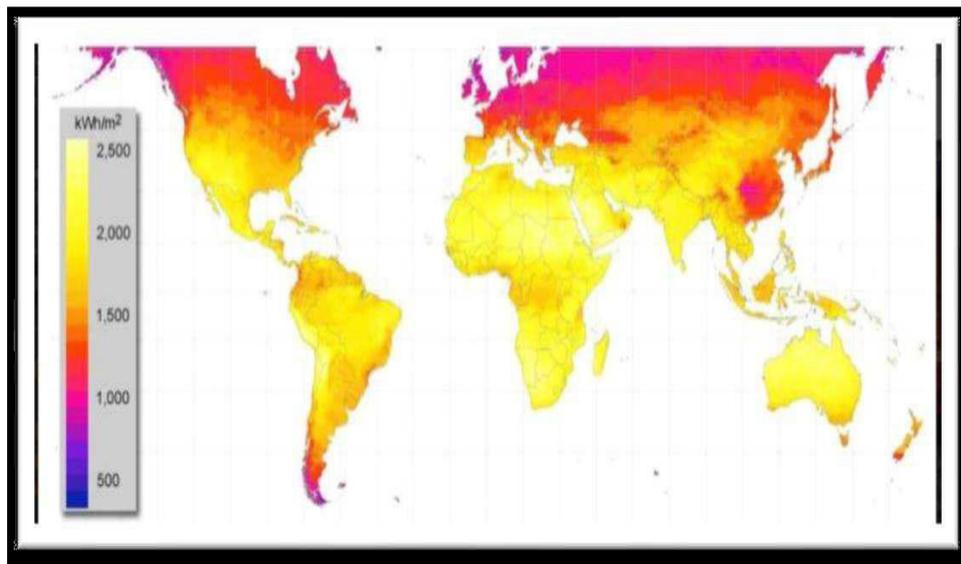


Figure I.7 : carte d'éclairement solaire du monde [12].

## I.2.4.1. Les centrales à tour

Les centrales à tour (CT) (Fig I.8) sont constituées de nombreux miroirs ou héliostats concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Le facteur de concentration optique d'une installation CT varie de 200 à 1000 et le fluide caloporteur peut atteindre des températures comprises entre 250 et 1000 °C selon le type de récepteur et de caloporteur, ce qui permet de mettre en oeuvre un cycle de Rankine, ou un cycle à gaz (Baryton) ou même un cycle combiné (vapeur-gaz). Elle a une capacité de production entre 10 et 200 MWel [13].

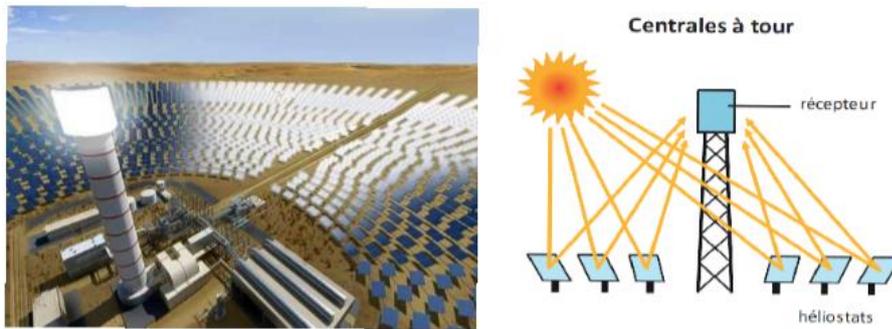


Figure I.8 : la centrale solaire à tour

## I.2.4.2. Les centrales à collecteur cylindro-parabolique

Comme son nom l'indique, ce système utilise une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole (Fig I.9). La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Les températures du récepteur peuvent atteindre (400 °C) et peuvent produire de la vapeur afin de fournir de l'électricité [1].



Figure I.9 : Système à collecteurs cylindro-paraboliques.

## I.2.4.3. Les centrales à collecteurs paraboliques

Un système à réflecteur parabolique (Fig I.10), utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur situé au foyer du récepteur. Le récepteur contient un fluide qui, lorsque les rayons du soleil le frappent, atteint une température de 750 à 1000 °C. Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité dans un petit moteur fixé au récepteur [1].

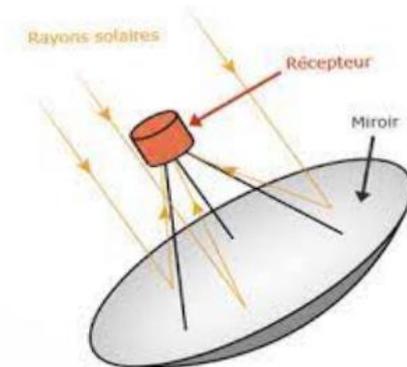


Figure I.10 : Système à collecteurs paraboliques.

## I.2.4.4. Les centrales solaires à miroirs de Fresnel

La technologie des miroirs de Fresnel (Fig I.11), utilise un premier étage de réflecteur installé sur le sol, le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur, ce second étage de réflecteurs joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur. Cette technologie pourrait mener à une réduction des coûts de production de 50 % par rapport à aux réflecteur traditionnels [1].

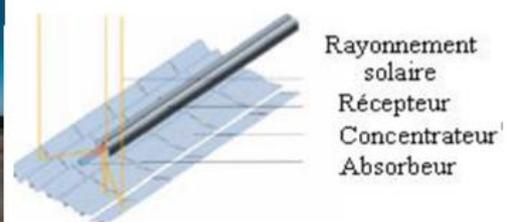


Figure I.11 : systèmes à miroirs de Fresnel

## I.2.5. Le potentiel solaire en 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, 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 (Fig I.12), l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillés au monde [1]. L'Algérie est en effet l'un des plus importants gisements d'énergie solaire au monde avec une durée d'insolation de 2.000 à 3.900 heures par an, et une irradiation journalière de 3.000 à 6.000 Wh/M2, soit l'équivalent de 10 fois la consommation mondiale [10].

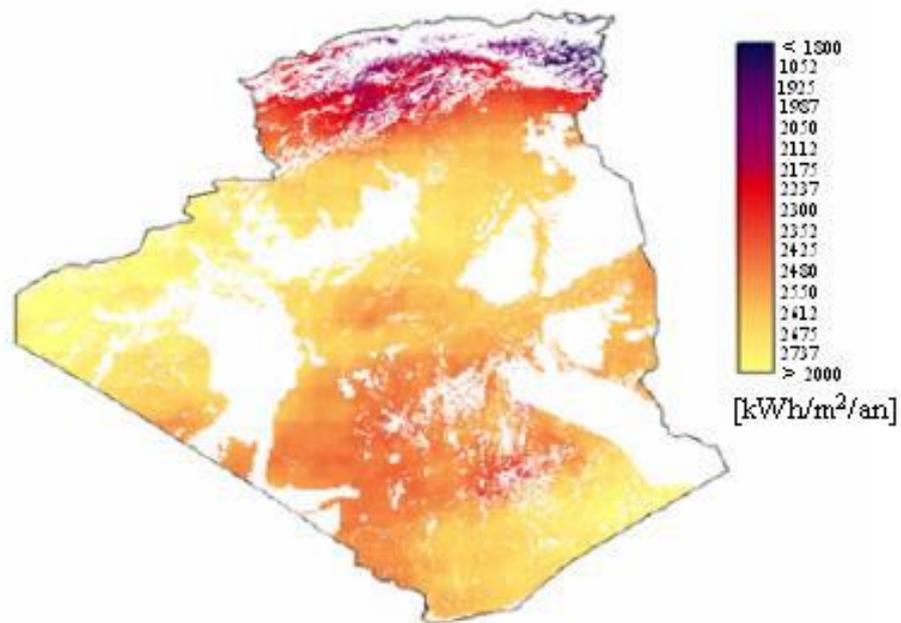


Figure I.12 : Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire [1].

## I.3. Les cuiseurs solaires

### I.3.1. Histoire de la cuisson solaire

Dans l'antiquité la cuisine des aliments était inconnue. Les gens mangeaient la nourriture dans l'état dans lequel ils l'avaient trouvée. C'était la première fois que le solaire chauffait des gaufrettes d'Esséniens, une des premières sectes de Juifs, pour créer une source de nourriture qui est extrêmement saine pour le corps humain. Horace-Bénédict de Saussure, naturaliste suisse, a été le premier à construire une boîte pour cuisiner des aliments à l'énergie solaire et a

publié ses travaux en 1767. Il cuisinait des fruits dans un cuiseur solaire primitif qui atteignait une température de 88°C [2].

De Saussure a continué son expérimentation, utilisant d'autres matériaux: ajoutant de l'insulation, cuisinant à différentes altitudes, etc. Ce scientifique européen explorant l'énergie solaire, il y a près de 250 ans, est largement considéré comme le père du mouvement de la cuisson solaire. D'autres ont suivi son exemple, notamment le Britannique Sir John Herschel et l'Américain Samuel Pierpont Langley, qui dirigea plus tard le Smithsonian, qui ont tous deux mené des expériences avec la boîte chaude, précurseur de la boîte de cuisson d'aujourd'hui [24].

Le mouvement de cuisson solaire contemporain a commencé sérieusement au milieu du siècle, avec quelques tentatives isolées pour susciter un intérêt pour la technologie. À la fin des années 50, Maria Telkes , scientifique du MIT, était une personnalité majeure de ce mouvement. Ses travaux sur la cuisson solaire se sont déroulés dans le cadre de ses activités professionnelles dans le domaine de l'énergie solaire. Cet intérêt la conduisit à construire un four à encastrer classique, une caisse isolée en plywood avec un dessus incliné de deux couches de glass et quatre grands réflecteurs évasés. Le dessin est utilisé, en variation infinie, jusqu'à nos jours. George Lof , ancien directeur de l'Institut de recherche industrielle de l'Université de Denver, au Colorado , était également un pionnier de la technologie solaire, y compris la cuisson solaire. Dans les années 1950, il a expérimenté un modèle de cuiseur solaire parabolique qu'il a nommé en raison de sa structure en forme de parapluie. Il a commercialisé le dessin, mais c'était un échec commercial pour l'époque [24].

La fondation de Solar Cookers International, le 11 juillet 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 [1].

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 [1].

### **I.3.2. Principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire**

Le principe de fonctionnement des cuiseurs solaires est le suivant : Conversion du rayonnement solaire en chaleur nécessaire à la cuisson des aliments.

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 [4].

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" utilise un vitrage pour garder la chaleur à l'intérieur de la boîte par effet de serre. Au niveau des autres parois, l'ajout d'une isolation classique améliore la conservation de la chaleur. Enfin, les rayons solaires peuvent être déviés par des miroirs et permettre l'apport d'énergie supplémentaire vers le foyer du cuiseur solaire [4].

### **I.3.3. Types de cuissons solaires**

Il existe trois types de cuissons solaires de base :

#### **I.3.3.1. Cuiseur de type boîte**

Solide et performant, le cuiseur boîte (Fig I.13) est construit avec une caisse en bois isolée contenant une caisse plus petite dont le fond est noir et les parois intérieures recouvertes d'aluminium. Un double vitrage recouvre l'ensemble et permet de produire un effet de serre. Pouvant être fabriqué avec des matériaux locaux (bois, laine de mouton, etc.), il permet

d'atteindre facilement des températures de 120 à 150 °C. Facile à fabriquer, le cuiseur boîte est le plus utilisé [3].



Figure I.13 : Représente principe d'un cuiseur de type boîte [23] [4].

### I.3.3.2. Cuiseur à panneaux

Les cuiseurs à panneaux (Fig I.14) combinent les éléments du cuiseur boîte et du cuiseur parabolique. Très facile à construire, le cuiseur à panneaux n'est équipé ni de vitre ni de système d'isolation. Ses surfaces réfléchissantes sont sans danger pour les yeux. Ses températures étant régulières, il n'a pas besoin d'être ajusté pendant la cuisson. Pour le ranger, il suffit de le plier [3].

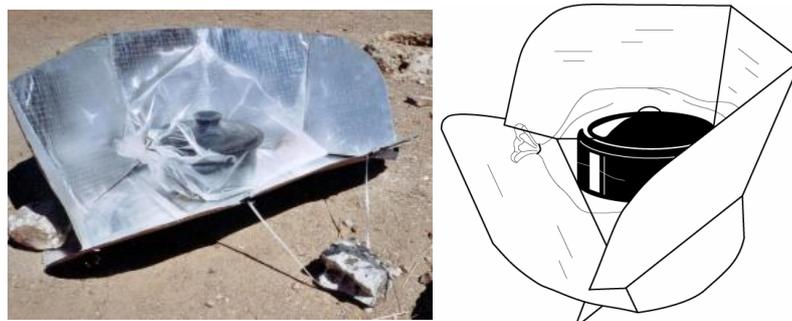


Figure I.14: Représente principe d'un cuiseur à panneaux [23] [4].

### I.3.3.3. Cuiseur parabolique

M également appelés « cuiseurs paraboliques » (Fig I.15), les cuiseurs à concentrateur incurvé atteignent rapidement de très hautes températures, mais nécessitent un ajustement fréquent et de nombreuses précautions concernant la sécurité. D'une puissance estimée à 400 W, ils sont les plus chers. La parabole permet de tout cuire et de réaliser des fritures [3].

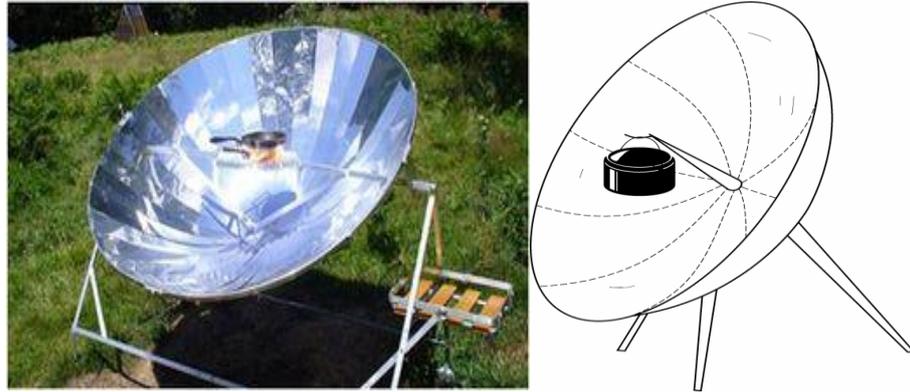


Figure I.15: Représente principe d'un cuiseur parabolique [23] [4].

### **I.3.4. Facteurs nécessaires pour la cuisson solaire**

#### **I.3.4.1. Températures de cuisson solaire**

La cuisine solaire est un moyen écologique et économique de préparer les aliments. Le fonctionnement des cuiseurs solaires dépend uniquement de l'ensoleillement et non de la température extérieure. Par conséquent, ils s'utilisent aussi bien en été qu'en hiver et ce dans toutes les régions ensoleillées du globe. Un minimum de 40 minutes d'ensoleillement suffit pour un bon fonctionnement [1].

La température atteinte par les cuiseurs solaires simples (de type boîte et les cuiseurs à panneaux réfléchissants) est généralement comprise entre 100 et 200 °C et dépend tout d'abord du nombre et de la taille des panneaux utilisés. La température atteinte par d'autres types de cuiseurs (les cuiseurs paraboliques) varie entre 150 et 250 °C en fonction du diamètre du réflecteur [1]. Cependant, des températures comprises entre 80 et 90°C suffisent pour cuire les nourritures et gardent leur goût, humidité et éléments nutritifs (Fig I.16) [1].

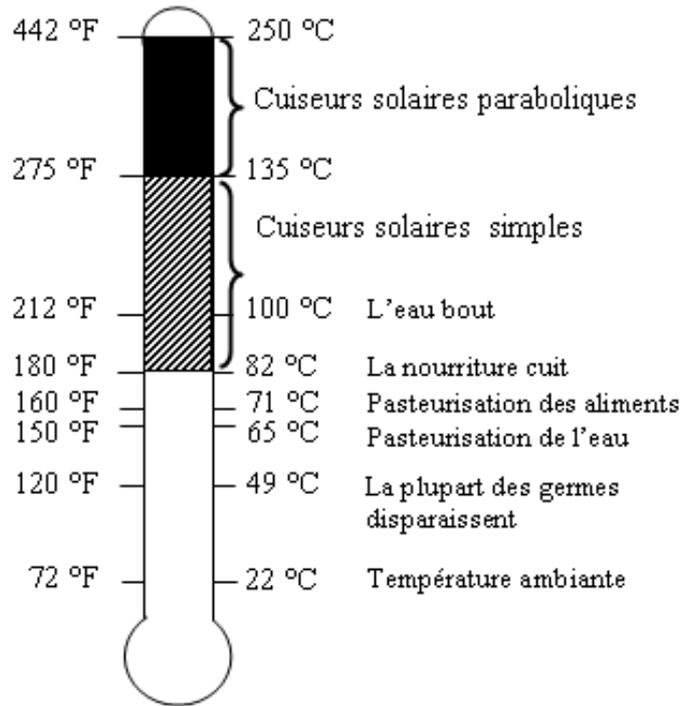


Figure I.16 : Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs [1].

### I.3.4.2. Temps de cuisson solaire

De nombreux facteurs jouent sur la durée de cuisson solaire dépend de la période de l'année, du moment de la journée, du degré d'ensoleillement, du type de récipient utilisé, du plat à cuire et de la quantité de nourriture préparée. Les facteurs essentiels pour la cuisson solaire sont représentés dans le tableau (I.1) suivante [3].

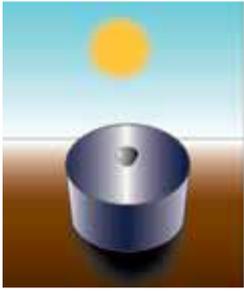
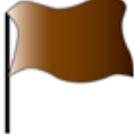
	Cuisson rapide	Cuisson lente
Période de la journée		
Intensité du soleil		
Force du vent		
Epaisseur du récipient		
Quantité et taille de la nourriture		
Quantité d'eau		

Tableau I.1 : représente les facteurs essentiels pour la cuisson solaire [3].

### I.3.4.3. Emplacement du cuiseur solaire

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

Le lieu choisi doit être éloigné des sites de dépôt de déchets humains, de déchets d'animaux et des eaux usées. Il est préférable de clôturer le site pour éviter la présence d'animaux domestiques [3].

### I.3.4.4. Moment d'utilisation du cuiseur solaire

Le cuiseur solaire doit être utilisé quand la longueur de l'ombre sur le sol est plus petite que la taille réelle du cuisinier (Fig I.17). Le soleil doit donc être assez haut dans le ciel pour permettre la cuisson. La cuisson solaire ne doit se faire ni tôt le matin ni après le coucher du soleil. Par conséquent, l'idéal est de cuisiner entre 9 et 15 heures [3].



Figure I.17 : Heures propices à la cuisson solaire [3].

### I.3.4.5. Types de récipients utilisés pour la cuisson des aliments

Il est préférable d'utiliser des récipients de couleur foncée qui absorbent mieux la chaleur, tandis que les couleurs claires réfléchissent les rayons du soleil [3] (Fig I.18).

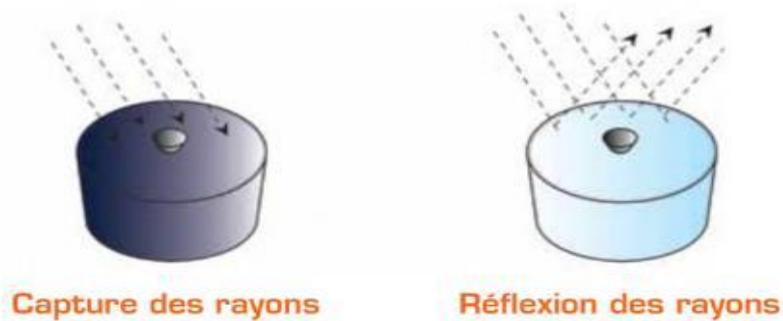


Figure I.18 : Capture ou réflexion des rayons du soleil [3].

### I.3.5. Classification des cuiseurs solaires

Les cuiseurs solaires sont classifiés globalement en deux catégories : les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur et, les cuiseurs solaires avec stockage de chaleur, cette classification est illustrée en détail sur la figure (I.19) [1] :

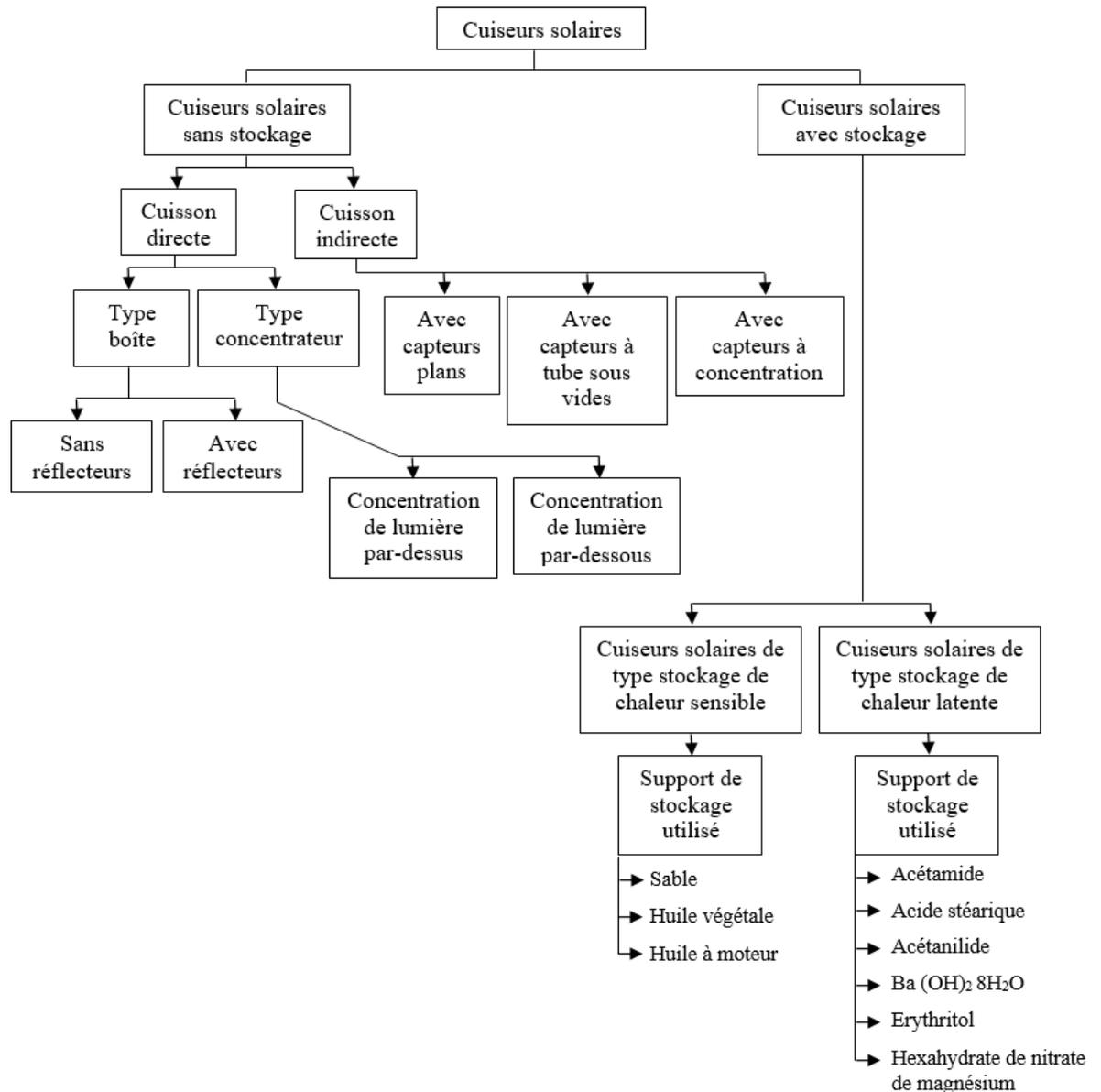


Figure I.19 : Classification des cuiseurs solaires sans et avec stockage thermique [1].

### I.3.5.1. Les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur

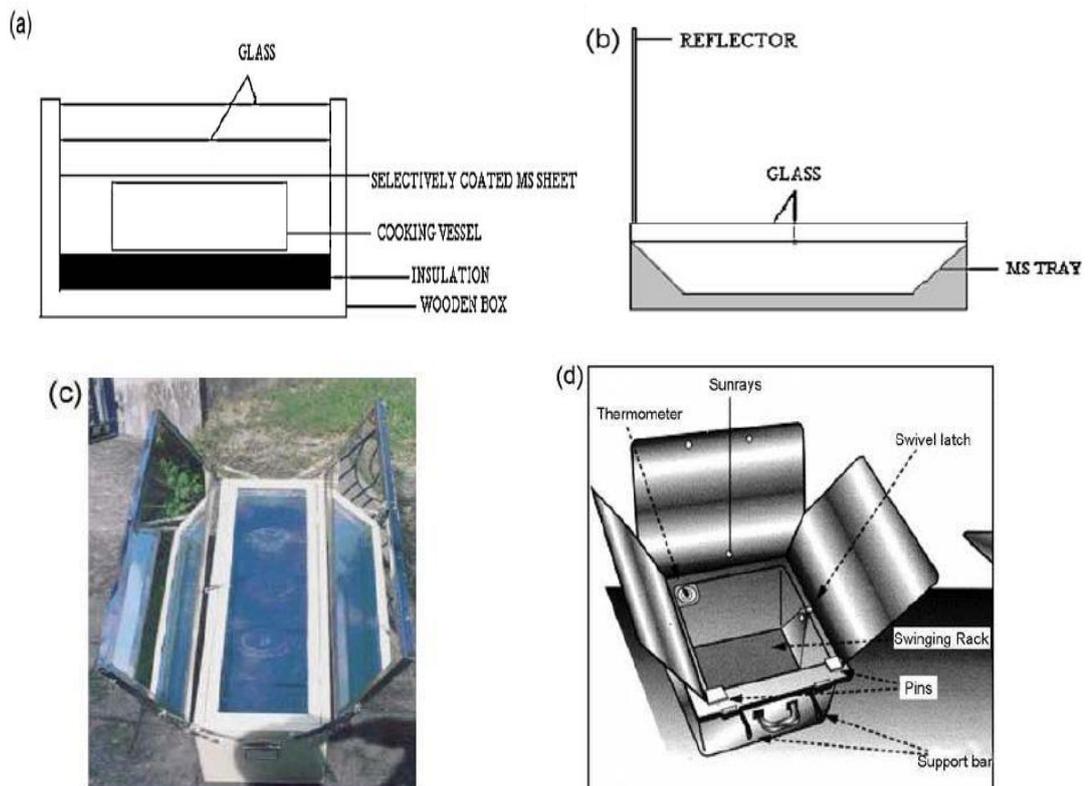
Les cuiseurs solaires sans stockage se divisent entre : cuiseurs avec cuisson directe et, cuisson indirecte, cette catégorisation est effectuée suivant le mécanisme de transfert de chaleur vers l’ustensile. Le type direct utilise directement le rayonnement solaire pour cuire, par contre le type indirect utilise un fluide caloporteur pour transférer la chaleur du collecteur vers l’ustensile de cuisine [1].

## I.3.5.2. Cuiseurs solaires type direct

C'est le type qui a une commercialisation très réussie, il y a le cuiseur solaire boîte et, le cuiseur solaire concentrateur.

## I.3.5.3. Cuiseurs solaires 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. La figure (I.20) illustre plusieurs configurations du cuiseur solaire boîte [1] :



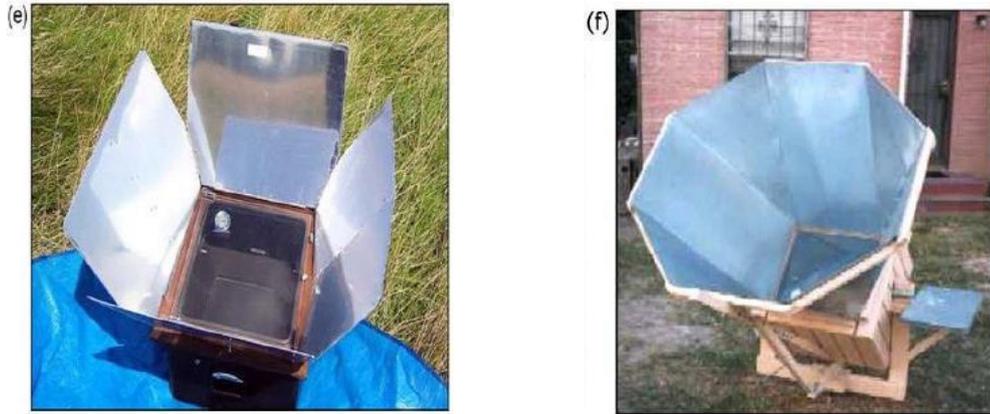


Figure I.20 : Cuiseurs solaires boîtes : (a) sans réflecteur, (b) avec réflecteur, (c) avec deux réflecteurs, (d) avec trois réflecteurs, (e) avec quatre réflecteurs, et (f) avec huit réflecteurs.

### I.3.5.4 Cuiseurs solaires à concentration

Dans les cuiseurs à concentration l'ustensile est placé au point de concentration d'un miroir parabolique. Ce type de cuiseur fonctionne sur deux axes pour capturer les rayons solaires, le rapport de concentration peut atteindre 50 et, la température dépasse les 300 °C, ce qui suffit assez largement pour cuire tout type d'aliment. Les cuiseurs à concentration utilisent des miroirs multi face, concentrateur Fresnel ou, des concentrateurs parabolique pour atteindre une telle haute température. Plusieurs configurations des cuiseurs solaires à concentration sont illustrées sur la figure (I.21) : [1]

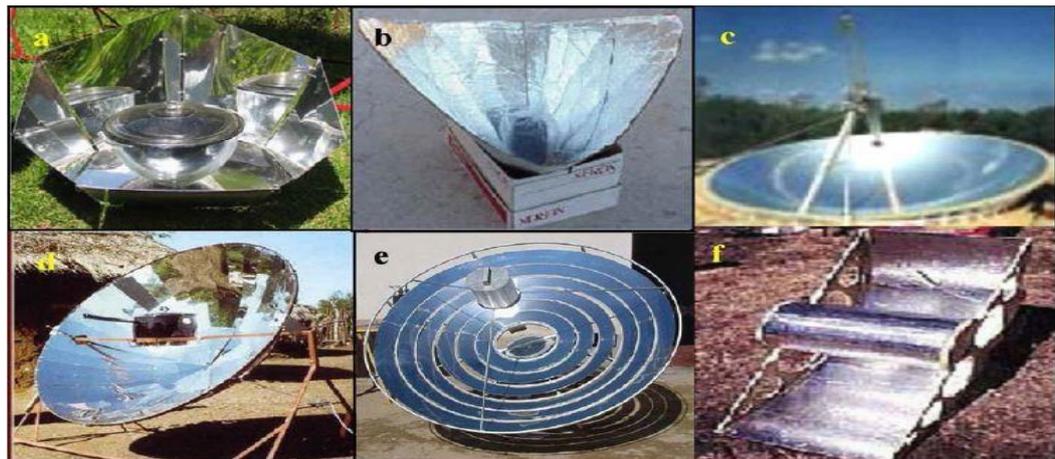


Figure I.21 : Cuiseurs à concentration : (a) cuiseur a panneaux, (b) cuiseur entonnoir, (c) réflecteur sphérique, (d) réflecteur parabolique, (e) concentrateur Fresnel, et (f) concentrateur cylindro- parabolique.

Les hautes températures atteintes par les cuiseurs solaires à concentration permettent de cuire tous les types des aliments dans des courtes durées. Les inconvénients des cuiseurs à concentration sont ; le volume excessif, le cout, le risque de bruler les aliments et surtout, les ajustements fréquent [1].

### I.3.5.5. Cuiseurs solaires type indirect

Dans les cuiseurs solaires indirects l'ustensile de cuisine est mis hors du collecteur, un dispositif pour transférer la chaleur vers l'ustensile de cuisine est requis. Les cuiseurs solaires avec capteur plan, les cuiseurs solaires avec capteur à tubes sous vide et, les cuiseurs solaires à concentrations sont les principaux cuiseurs solaires indirects comme montré sur la figure (I.22) [1]:

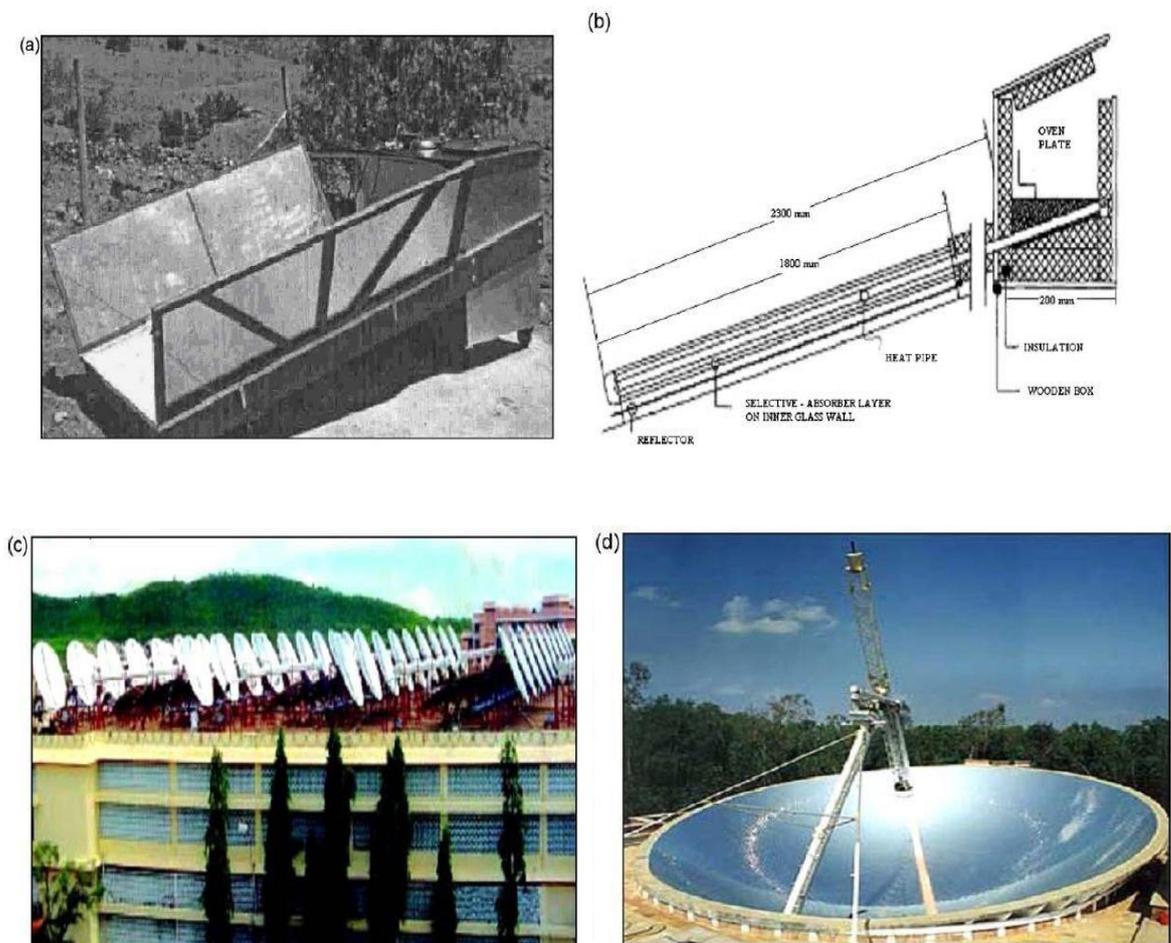


Figure I.22 : Cuiseurs solaires du type indirect, (a) avec capteur plan, (b) avec capteurs sous vides,(c) avec concentrateur parabolique, (d) avec concentrateur sphérique.

## I.3.6. Cuiseurs solaires avec stockage de chaleur

Le stockage de l'énergie thermique est essentiel chaque fois qu'il existe un décalage entre l'offre et la demande d'énergie. Les cuiseurs solaires doivent contenir un matériau accumulateur de chaleur pour stocker l'énergie thermique afin de résoudre le problème de la cuisson à l'extérieur et l'impossibilité de cuire les aliments en raison des nuages fréquents pendant la journée ou en dehors des heures de pointe. L'énergie thermique peut être stockée sous la forme d'une modification de l'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible, latente et thermochimique ou d'une combinaison de ces éléments [2].

### I.3.6.1. Stockage avec chaleur sensible

Dans ce cas l'énergie calorifique est stockée en augmentant la température d'un solide ou un liquide (Fig I.23) [9].

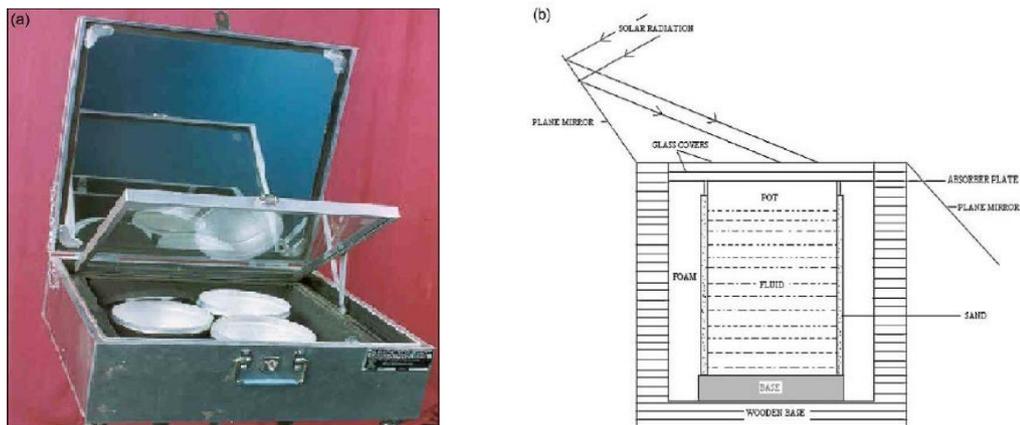


Figure I.23: Stockage par chaleur sensible : (a) avec l'huile des moteurs, (b) avec le sable.

### I.3.6.2. Stockage par chaleur latente

Dans le stockage par chaleur latente on utilise l'énergie stockée lors d'un changement de phase d'une substance (Fig I.24) : [9]

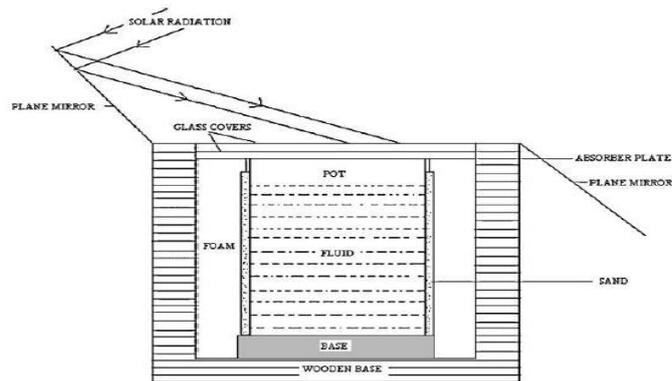


Figure I.24: Stockage par chaleur latente en utilisant  $\text{Ba}(\text{OH})_{28}\text{H}_2\text{O}$ .

## I.3.7. Les avantages et les inconvénients des cuiseurs solaires

### I.3.7.1. Les avantages des cuiseurs solaires

La cuisson avec un cuiseur solaire présente de nombreux avantages qui sont :

1. La cuisson solaire utilise une énergie propre, non polluante, gratuite et inépuisable.
2. Elle n'irrite ni les yeux ni les branches car elle ne produit ni cendres, ni fumée. Elle ne contribue pas ou réchauffement de la planète.
3. Comme à la cuisson vapeur ou à l'étouffée, les aliments cuits sont très goûteux. Cette cuisson qui ne nécessite pas l'ajout de matière grasse, est plus diététique que celle avec gras ajouté.
4. Cette cuisson préserve mieux les aliments qu'une cuisson à température élevée. Cuisinés à basse température, les aliments conservent une partie de leurs vitamines et de leurs sels minéraux, mais pas tous.
5. Les cuiseurs solaires sont pratiques, fabriqués à partir de matériaux légers, ils se transportent partout.
6. Les cuiseurs solaires offrent la possibilité de faire la cuisine à l'extérieur durant une grande partie de l'année.
7. Lorsque la cuisson dans le cuiseur solaire est en cours, vous disposez de votre temps pour d'autres occupations car votre présence n'est pas nécessaire.

8. La cuisson solaire permet de pasteuriser l'eau.
9. Les cuiseurs solaires commercialisés ont une longue durée de vie.
10. Cuiseurs peuvent être bricolés « maison » pour une somme modique.
11. Les marmites sont faciles à entretenir car la nourriture cuite à basse température ne s'accroche pas. Le four s'entretient très facilement

### **I.3.7.2. Les inconvénients des cuiseurs solaires**

1. Le récipient peut atteindre des températures très élevées, attention aux risques de brûlures.
2. Attention aux risques d'éblouissement lors de son utilisation.
3. Le temps de cuisson des aliments est souvent multiplié par deux comparativement à un mode de cuisson traditionnel.
4. Il nécessite d'être bien orienté, étant plus lourd à manipuler qu'un four solaire parabolique.
5. Il ne faut pas ouvrir le four avant la fin de la cuisson pour éviter les pertes de chaleur, la prise en main du four solaire nécessite un petit temps d'apprentissage.

### **I.4. Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons étudié le principe de base de l'énergie solaire et comment l'utiliser dans le domaine de la cuisine. 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 dans le cas des cuiseurs boîtes. 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**

# **Etude théorique et détermination des performances du cuiseur**

## **II.1. Introduction**

Comme pour toutes les applications à énergies solaires, il est important de connaître le gisement solaire, qui est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Alors dans ce chapitre, nous présentons des équations mathématiques du modèle M. Capderou pour estimer les composantes directes et diffuses de l'éclairement solaire, Programmé par Matlab avec une représentation des graphes.

Nous avons également visité l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables où nous avons rencontré l'équipe mini centrales thermodynamiques et nous avons fait notre étude théorique et expérimentale sur le cuiseur solaire parabolique.

## **II.2. Modélisation de l'éclairement solaire par Matlab**

### **II.2.1. Paramètres géographiques**

Les coordonnées géographiques utilisé pour se repérer à la surface de la planète, composés des éléments suivant :

#### **II.2.1.1. La latitude**

L'angle ( $\varphi$ ) de latitude est l'angle entre une ligne tracée à partir d'un point de la surface de la terre avec le centre de la terre et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée par la latitude  $0^\circ$ , le pôle nord par la latitude  $+90^\circ$  et le pôle sud par la latitude  $-90^\circ$ . Par convention, le signe (-) est attribué à tous les endroits de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les endroits de l'hémisphère sud. La latitude d'un lieu peut être comprise entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$  (Fig II.1) [15].

#### **II.2.1.2. Longitude**

La longitude ( $\lambda$ ) c'est l'angle formé par la méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude d'un lieu peut être comprise entre  $-180$  et  $180^\circ$ . A tout écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps (Fig II.1) [15].

### II.2.1.3. L' altitude

C'est la distance verticale ( $z$ ) exprimé en mètres entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer) [15].

### II.2.1.4. 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.1) [9].

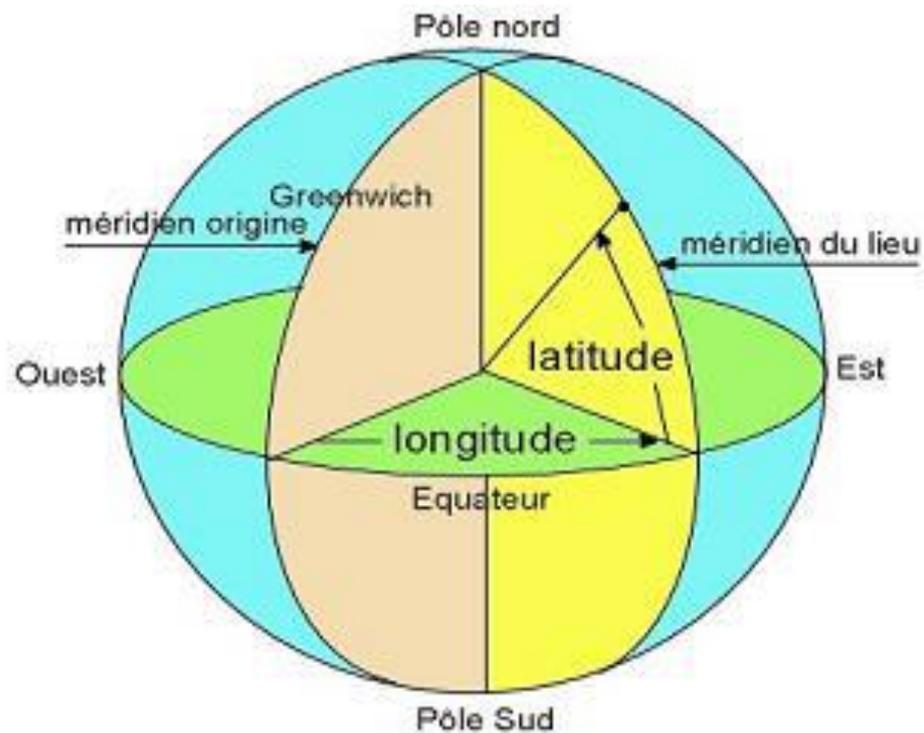


Figure II.1 : Cordonnée terrestre.

## II.2.2. Paramètres horaires

### II.2.2.1. Temps solaires

- **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 [16].

- **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 [16].

### II.2.2.2. Angle horaire

L'angle horaire  $\omega$  étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV, l'angle horaire s'exprime parfois en heures. Au midi solaire on a  $\omega = 0$ , ensuite chaque heure correspond à une variation de  $15^\circ$ , car la terre effectue un tour complet sur elle-même en 24h.  $\omega$  sera compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir. Pour calculer l'angle horaire, on utilise la formule suivante du M. CAPDEROU dans l'Atlas Solaire de l'Algérie [17]:

$$\omega = 15 \times (\text{TSV} - 12) \quad (\text{II.1})$$

Le temps solaire vrai TSV est donné par l'équation (II.4), avec DE est le décalage horaire, il est égale à 1 pour l'Algérie.

### II.2.2.3. Déclinaison solaire

La déclinaison du soleil  $\delta$  est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial

de la terre, la déclinaison varie de  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver à  $+23^{\circ}27'$  au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, M. Capderou a utilisé la formule (II.2) pour le calcul de la déclinaison [17]:

$$\sin(\delta) = 0.398 \times \sin\left[\frac{360}{365}\right] \times (N - 82) \times \sin\left[\frac{360}{365}(N - 2)\right] \quad (\text{II.2})$$

N est le jour Julian variant de 1 du 1 Janvier à 365 (366) du 31 Décembre. La variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année est décrite sur la figure (II.2):

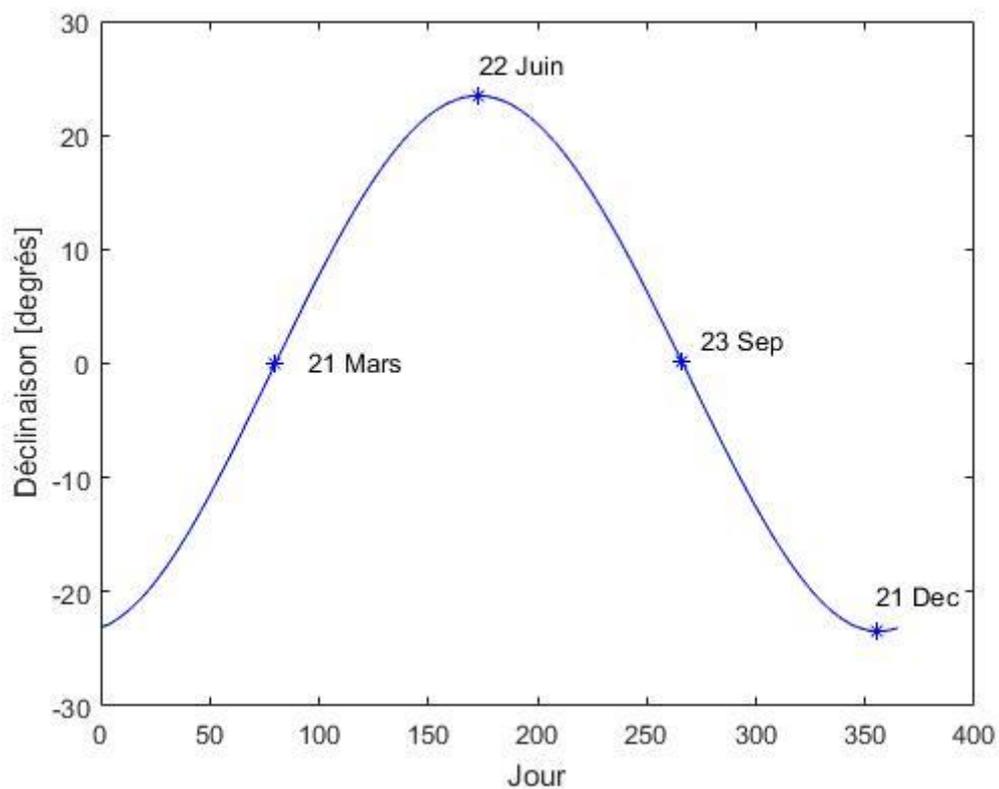


Figure II.2 : Variation de la déclinaison ( $\delta$ ) solaire en fonction du jour (N).

#### II.2.2.4. Equation du temps

La vitesse de la terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année, la somme des l'inégalités du temps solaire vrai TSV porte le nom de équation de temps ET avec :  $ET = TSV - TSM$ . L'écart entre TSV et TSM varie selon la date, mais est nul en moyenne. L'équation du temps est donnée en fonction du jour de l'année N avec une bonne précision par la formule suivante :

$$ET = 9.87 \times \sin(2 \times N') - 7.53 \times \cos(N') - 1.5 \times \sin(N') \quad (II.3)$$

Avec :

$$N' = \frac{360}{365} * (N - 81) \quad (II.4)$$

### II.2.3. Paramètres de position du soleil

Dans les applications à énergies solaires, la connaissance des paramètres géométriques de la trajectoire du soleil est important; vu à partir d'un point fixe de la terre (Fig II.3), la position du soleil est déterminée en fonction de deux angles donnés en radian: l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu (hauteur angulaire  $\gamma$ ) et l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil (azimut  $\chi_s$ ). Le complément de  $\gamma$  ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelée angle zénithal  $\theta_z$  [17].

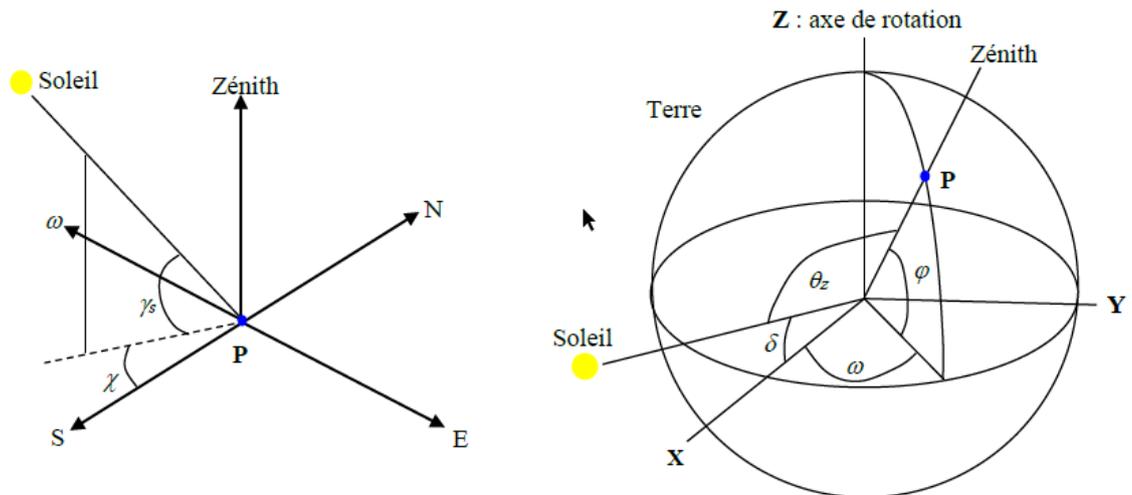


Figure II.3 : Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil) [17].

#### II.2.3.1. Hauteur du soleil

La hauteur du soleil  $\gamma_s$  est l'angle que fait, le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur  $\gamma_s = 0$  correspond au lever et au coucher du soleil, quand  $\gamma_s < 0$  c'est la nuit et quand  $\gamma_s > 0$  c'est le jour sur terre, la hauteur du soleil varie entre  $+90^\circ$  (zénith) et  $-90^\circ$  (nadir). La hauteur du soleil est bien représentée par une formule bien connue, qui avait été également adoptée par M. Capderou [17]:

$$\sin(\gamma_s) = \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta) \quad (\text{II.5})$$

La figure (II.4) représente la variation de la hauteur  $\gamma_s$  à midi sur le site de Ghardaïa durant une année.

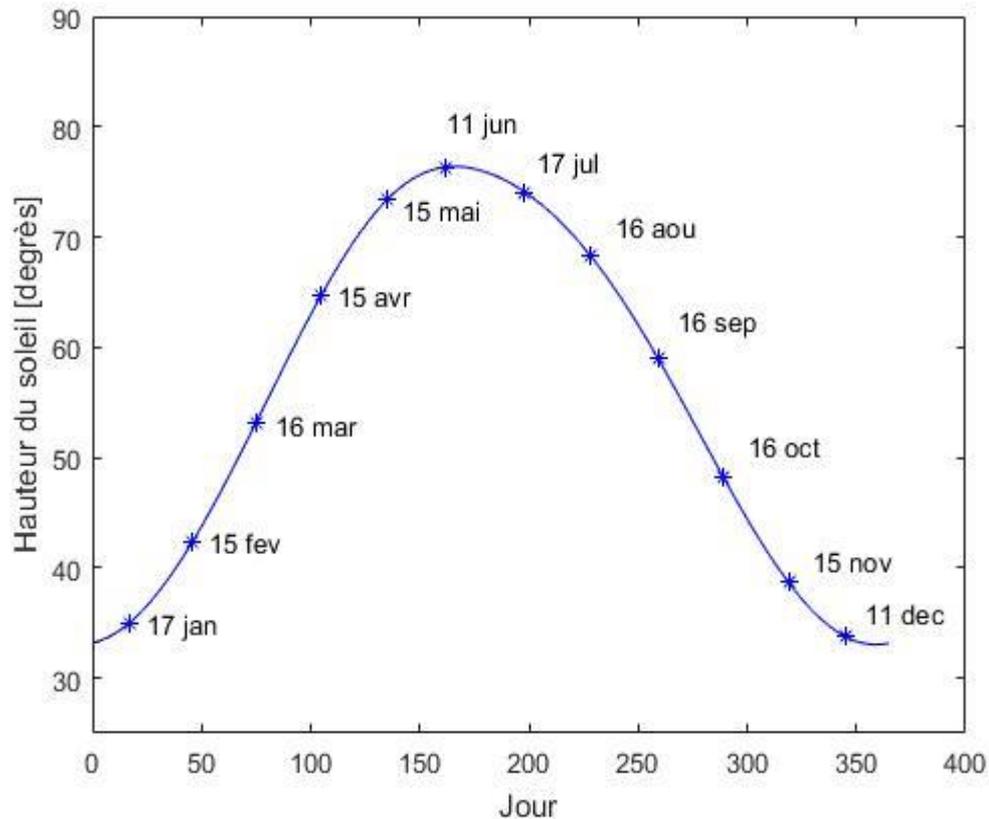


Figure II.4 : Variation de la hauteur du soleil ( $\gamma_s$ ) en fonction du jour (N).

### II.2.3.2. Azimut du soleil

L'azimut du soleil  $\chi_s$  est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut est compté positivement vers l'Ouest  $\chi_s > 0$  et négativement vers l'Est  $\chi_s < 0$ , à midi  $\chi_s = 0$ . L'azimut est compris entre  $-180 \leq \chi_s \leq 180^\circ$ . Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, M. Capderou a utilisé la formule (II.6) pour calculer l'azimut du soleil [17]:

$$\cos(\chi_s) = \frac{\cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \sin(\varphi) - \sin(\delta) \times \cos(\varphi)}{\cos(\gamma_s)} \quad (\text{II.6})$$

La variation de l'azimut du soleil en fonction du temps pour les mois de Avril, Juillet et Décembre sur le site de Ghardaïa est représentée sur la figure (II.5).

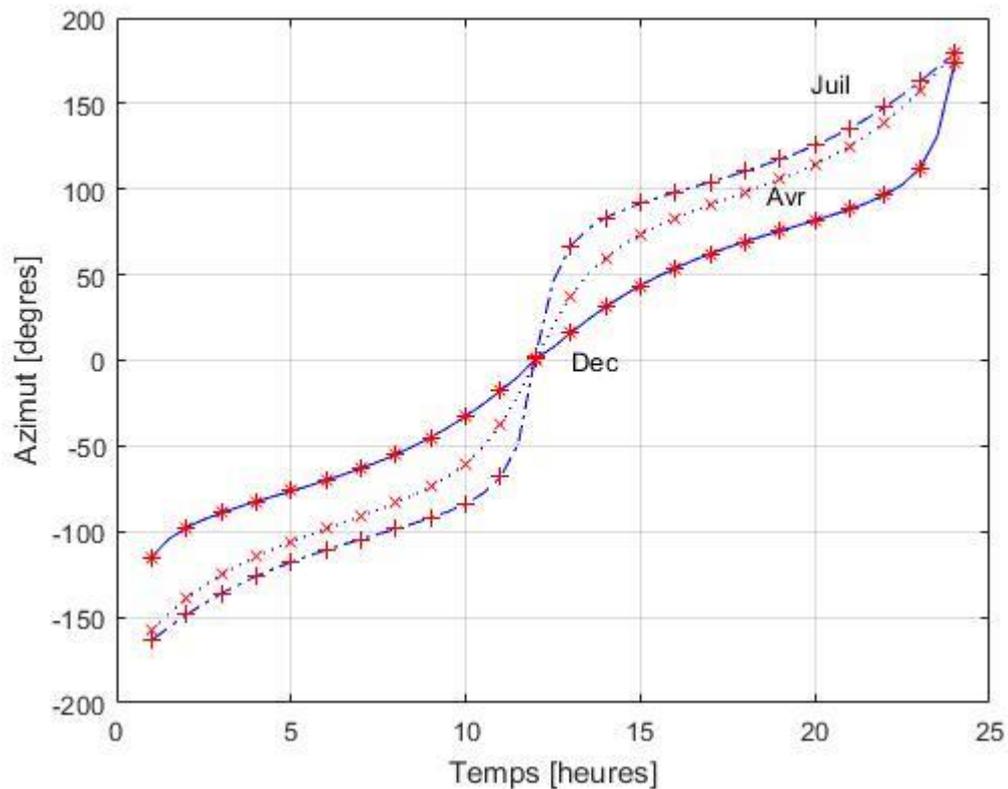


Figure II.5 : Variation de l'azimut solaire ( $\chi_s$ ) en fonction du temps.

## II.2.4. Paramètres de l'atmosphère

### II.2.4.1. L'atmosphère

L'atmosphère est composée de couches superposées les unes sur les autres. Depuis le sol, on distingue la troposphère, la stratosphère, puis la mésosphère, suivi de la thermosphère (Fig II.6). L'air sec est composé de 78% d'azote, de 21% d'oxygène, de 0.9 % d'argon et de 0.03% de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de gaz dont la concentration varie spatialement et au cours du temps, comme la vapeur d'eau H<sub>2</sub>O, le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> ...etc., Chacun des gaz constituant de l'atmosphère absorbe le rayonnement dans des longueurs d'onde sélectives délimitant ainsi de nombreuses bandes d'absorption. On rajoute à cela les aérosols qui sont des particules soit d'origine naturelle, tels que le sable, la suie, les cristaux de glace ou les

poussières volcaniques, soit d'origine artificielle telle que celles produites par l'industrie, l'automobile ou le chauffage [18].

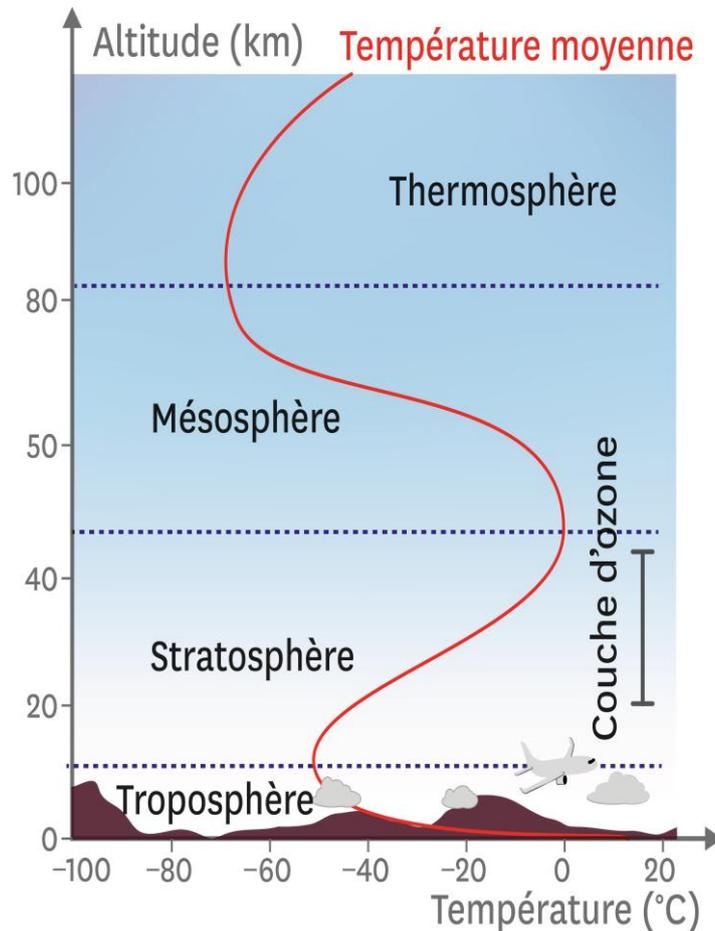


Figure II.6 : La structure verticale de l'atmosphère

#### II.2.4.2. Masse atmosphérique

On appelle masse d'air  $m_A$  la masse d'atmosphère traversée par l'éclairement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. 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 [17]:

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma_s)} \quad (\text{II.7})$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante (Fig II.7):

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma_s) + [9,40 \times 10^{-4} \times [\sin(\gamma_s) + 0,0678]^{-1.253}} \quad (\text{II.8})$$

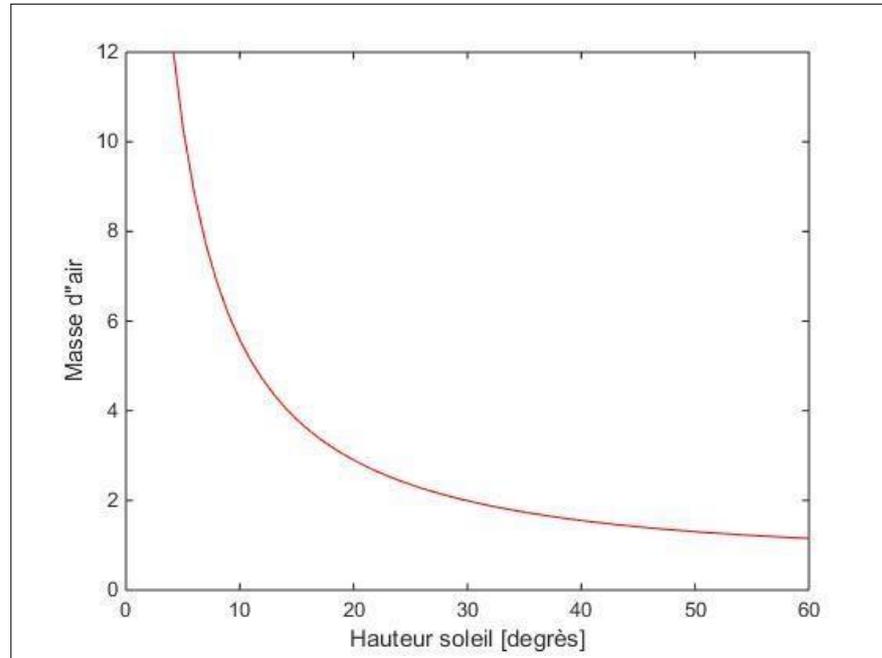


Figure II.7 : Variation de la masse d'air ( $m_A$ ) en fonction de la hauteur du soleil ( $\gamma_s$ ).

### II.2.4.3. Epaisseur optique de l'atmosphère (Epaisseur de Rayleigh)

En 1922, Linke 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 utilisa les données spectrales publiées par Feussner et Dubois en 1930 et proposa la formule (II.9) pour  $\delta_R$ , connue sous le nom de formule pyrhéliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte [17].

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \times m_A) \quad (\text{II.9})$$

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, 'A.S.A', utilisa la formule pyrhéliométrique de Kasten pour calculer l'éclairement direct incident sur un plan par ciel clair. En 1986, Louche ajouta l'absorption

par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4<sup>ème</sup> ordre pour la masse d'air.

$$(\delta_R)^{-1} = 6.5567 + (1.7513 \times m_A) - (0.1202 \times m_A^2) + (0.0065 \times m_A^3) - (0.00013 \times m_A^4) \quad (\text{II.10})$$

Louche démontra que la formule (II.10) 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  $\delta_R$ .

$$(\delta_R)^{-1} = 6.6296 + (1.7513 \times m_A) - (0.1202 \times m_A^2) + (0.0065 \times m_A^3) - (0.00013 \times m_A^4) \quad (\text{II.11})$$

La figure (II.8) représente la variation de l'épaisseur optique de Rayleigh  $\delta_R$  en fonction de la masse d'air.

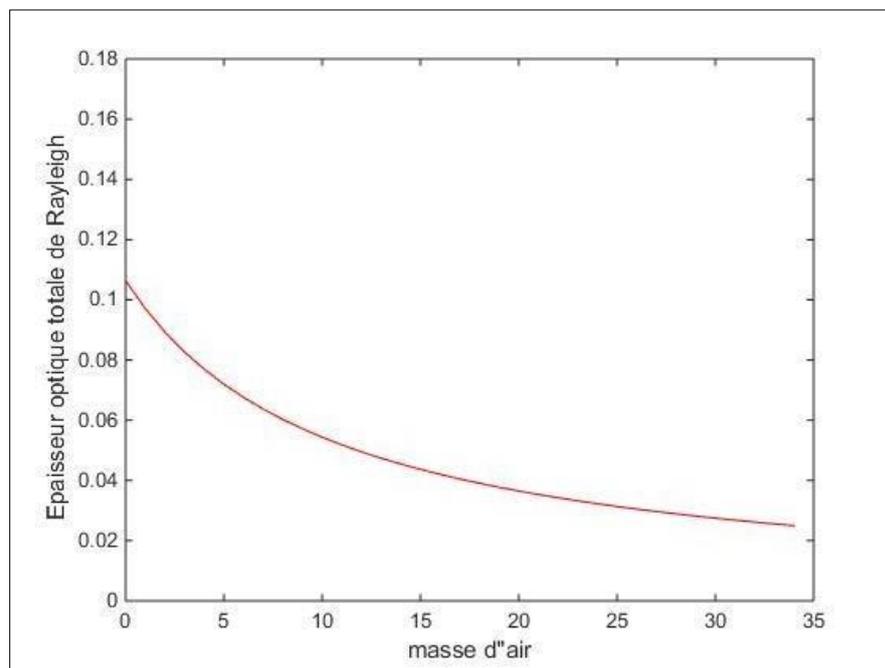


Figure II.8 : Variation de l'épaisseur optique ( $\delta_R$ ) de l'atmosphère en fonction de la masse d'air ( $m_A$ ).

## II.2.5. Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère

### II.2.5.1. Facteur de trouble de Linke

La méthodologie adoptée par la plus part des modèles calculant l'éclairement solaire est basée sur l'utilisation du trouble atmosphérique pour la détermination des composantes directe et diffuse de l'irradiation solaire d'un site, ceci nécessite un modèle mathématique du trouble atmosphérique indépendant de l'éclairement. En 1987 Capderou; dans l'Atlas Solaire (A.S.A.), proposa un modèle pour calculer le facteur de Linke en Algérie par ciel clair. Le coefficient de trouble atmosphérique total a été décomposé en trois facteurs de trouble auxiliaires: le trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau  $T_0$ , le trouble du à la diffusion moléculaire de Rayleigh  $T_1$  et le trouble relatif à la diffusion par les aérosols  $T_2$  [17].

avec :

$$T_0 = (2.4 - 0.9 \times \sin(\varphi) + 0.1 \times (2 + \sin(\varphi)) - (0.2 \times z) - [(1.22 + 0.14 \times A_{he}) \times (1 - \sin(\gamma_s))] \quad (\text{II.12})$$

$$T_1 = (0.89)^z \quad (\text{II.13})$$

$$T_2 = [0.9 + (0.4 \times A_{he})] \times (0.63)^z \quad (\text{II.14})$$

$z$  est l'altitude en km et  $A_{he}$  est l'alternance hiver été donnée par :

$$A_{he} = \sin\left[\frac{360}{365} \times (N - 121)\right] \quad (\text{II.15})$$

## II.2.6. Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal

### II.2.6.1. Eclairement hors atmosphère

En dehors de l'atmosphère l'éclairement solaire est d'intensité  $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ . Une surface exposée au soleil ne peut recevoir cette valeur d'intensité que si elle est placée perpendiculairement à la direction de l'éclairement, n'importe quel écartement à cette

orientation conduit à une réduction de le rayonnement incident. Dans le cas d'un plan horizontal situé en dehors de l'atmosphère, l'éclairement est décrit comme : éclairement solaire extraterrestre horizontal (Fig II.9).

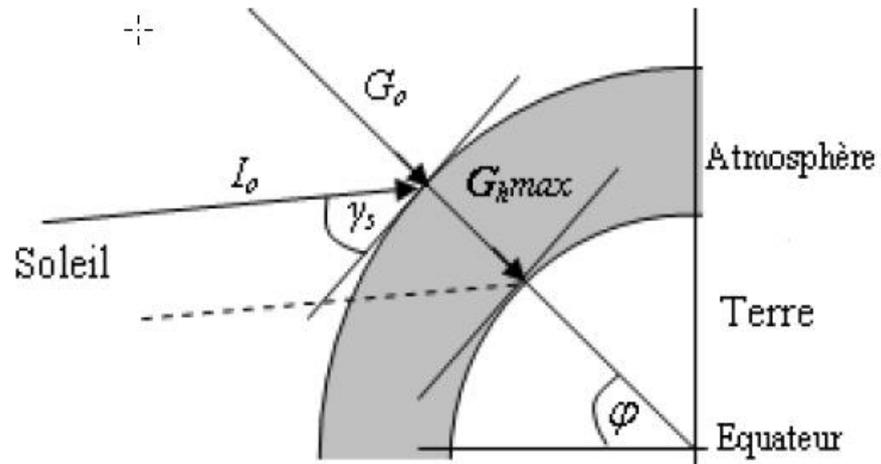


Figure II.9 : Eclairement solaire extraterrestre.

L'éclairement solaire extraterrestre fonction de la constante solaire et de la correction de distance entre la terre et le soleil, est donné par l'équation (II.16) [19] et sa variation en fonction du jour de l'année est illustrée sur la figure (II.10).

$$G_0 = I_0 \times \varepsilon \quad (\text{II.16})$$

$\varepsilon$  : est la correction de distance terre soleil, elle est donnée par :

$$\varepsilon = 1 + 0.3344 \times \cos(N - 0.048869) \quad (\text{II.17})$$

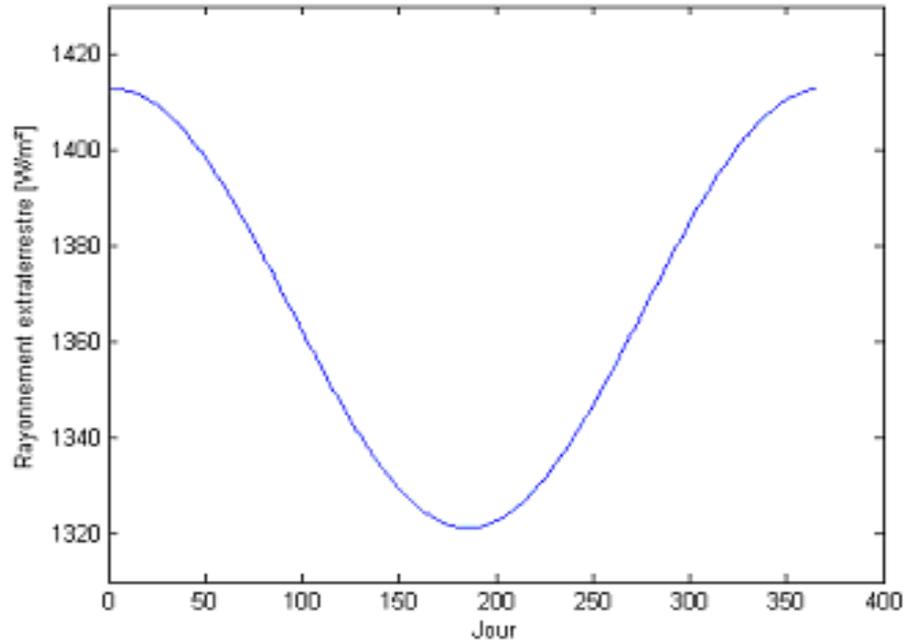


Figure II.10: Variation de le rayonnement solaire extraterrestre en fonction du jour.

### II.2.6.2. Eclairage direct incident sur un plan horizontal

Pour l'éclairage direct, Capderou utilisa la formule (II.8) pour la masse d'air  $m_A$  et la formule (II.10) pour l'épaisseur totale de l'atmosphère  $\delta_R$  et donna l'équation (II.18) qui permet de calculer l'éclairage direct incident sur un plan horizontal  $IB_h$  fonction de la hauteur du soleil  $\gamma$  et du facteur de trouble total de Linke  $T_L$  [17]:

$$IB_h = G_0 \times \sin(\gamma_s) \times \exp\left(-T_L / \left\{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} \times (\sin(\gamma_s))\right\}\right) \quad (II.18)$$

### II.2.6.3. Eclairage diffus incident sur un plan horizontal

L'éclairage diffus est le flux solaire reçu par un plan considéré qui traverse les nuages, provenant de la voûte céleste dans toutes les directions. Pour l'expression de l'éclairage diffus  $ID_h$ , Capderou utilisa le facteur de trouble diffusif  $T_L$  et donna ; en 1987, une l'équation (II.19) fonction de la hauteur du soleil  $\gamma_s$  [17]:

$$ID_h = G_0 \times \exp\left\{-1 + 1.06 \times \log[\sin(\gamma_s)] + a - \sqrt{a^2 + b^2}\right\} \quad (II.19)$$

Avec :

$$a = 1.1 \quad (II.20)$$

$$b = \log(T_L) - 2.80 + 1.02 \times [1 - \sin(\gamma_s)]^2 \quad (II.21)$$

#### II.2.6.4. Eclairement global incident sur un plan horizontal

L'éclairement global  $IG_h$  modélisé par Capderou est la somme du rayonnement direct et diffus :

$$IG_h = IB_h + ID_h \quad (II.22)$$

Les variations du rayonnement solaire direct, diffus et global en fonction de temps pour site de Ghardaïa sont représentées sur la figure (II.11).

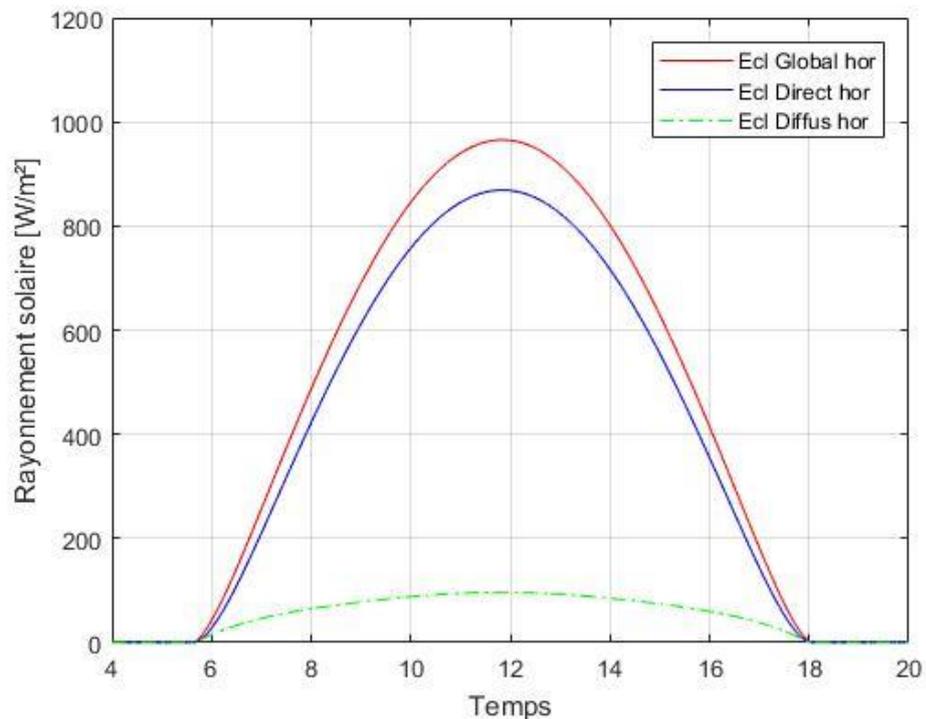


Figure II.11 : Variation des rayonnement incident sur un plan horizontal, en fonction de temps sur site de Ghardaïa.

## II.2.7. Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque

### II.2.7.1. Angle d'incidence

L'angle d'incidence  $\delta^i$  est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré, elle est définie par l'inclinaison du plan  $\beta$  et l'Azimut de la normal du plan  $\alpha$  (Orientation du plan),  $\alpha$  est compté dans le sens rétrograde ( $\alpha < 0$  vers l'Est,  $\alpha > 0$  vers l'Ouest). M. Capderou utilise la hauteur de la normal du plan  $\gamma$  pour calculer  $\cos(\delta^i)$  de l'angle d'incidence,  $\gamma$  est positive pour les plans tournés vers le haut et négative pour les plans tournés vers le bas, donc c'est les angles  $\alpha$  et  $\gamma$  qui déterminent la position du plan. L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donnée par Capderou par les formules suivantes [17]:

$$\cos(\delta^i) = [a' \times \sin(\omega)] + [b' \times \cos(\omega)] + c' \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$$a' = \cos(\delta) \times [\sin(a) \times \cos(\gamma_s)] \quad (\text{II.24})$$

$$b' = \cos(\delta) \times [\{\cos(a) \times \cos(\gamma_s) \times \sin(\varphi)\} + \{\sin(\gamma_s) \times \cos(\varphi)\}] \quad (\text{II.25})$$

$$c' = \sin(\delta) \times [\{-\cos(a) \times \cos(\gamma_s) \times \cos(\varphi)\} + \{\sin(\gamma_s) \times \sin(\varphi)\}] \quad (\text{II.26})$$

$$\beta = 90 - \gamma \quad (\text{II.27})$$

### II.2.7.2. Eclairement direct incident sur le plan quelconque

Capderou utilisera l'angle d'incidence donnée par l'équation (II.23) pour calculer l'éclairement direct à l'aide de l'équation suivante [17]:

$$IB_i = IN \times \cos(\delta^i) \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$IN = G_0 \times \exp\left(-T_L / \left\{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} \times (\sin(\gamma_s))\right\}\right) \quad (\text{II.29})$$

### II.2.7.3. Eclairage diffus incident sur le plan quelconque

L'éclairage diffus est décomposé en deux parties, ce qui est [17] :

- **Composante diffuse du sol**

La composante du diffus isotrope du sol est donnée par l'équation (II.30) en fonction de  $\delta_a$  qui est la composante due à l'albédo  $\rho_g$  :

$$ID_a^i = \delta_a = \frac{1 - \sin(\chi_s)}{2} \quad (II.30)$$

Avec :

$$\delta_a = \rho_g \times IB^h \quad (II.31)$$

- **Composante diffuse du ciel**

L'éclairage diffus du ciel est décomposé en trois parties : le diffus isotrope du ciel, le diffus directionnel et le diffus du cercle de l'horizon.

Le diffus isotrope du ciel est donné par l'équation suivante :

$$ID_i^i = (\delta_i + \delta_{i'}) \times \frac{1 + \sin(\chi_s)}{2} \quad (II.32)$$

Avec :

$$\delta_i = ID^h - \delta_d \times \sin(\gamma_s) \quad (II.33)$$

Où :  $\delta_i$  est la composante isotrope, elle correspond à un ciel de luminance uniforme.

Puisque le diffus du sol est rétrodiffusé, c'est-à-dire qu'une partie est diffusée à nouveau par le ciel vers le sol, Capderou a ajouté une composante  $\delta_{i'}$  :

Avec :

$$\delta_{i'} = 0.9 \times (\rho_g - 0.2) \times IB^h \times \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L}}\right) \quad (II.34)$$

Le diffus directionnel est donné en fonction de  $\delta_d$  par l'équation suivante :

$$ID_d^i = \delta_d \times \cos(\delta^i) \quad (II.35)$$

Où :  $\delta_d$  est la composante directe ou circumsolaire, elle provient du voisinage du soleil, dans un cône de demi angle. La formule donnant la composante du diffus directionnelle est représentée par l'équation suivante :

$$\delta_d = G_0 \times \exp(-0.48 - \sin(\gamma_s) + a_1 - \sqrt{4 \times b_1^2 + a_1^2}) \quad (II.36)$$

Avec :

$$b_1 = \log(T_L) - 2.28.05 \times \log(\sin(\gamma_s)) \quad (II.37)$$

$$a_1 = 3.1 - 0.4 \times b_1 \quad (II.38)$$

Le diffus du cercle de l'horizon est donné par l'équation suivante :

$$ID_h^i = \delta_h \times \cos(\chi_s) \quad (II.39)$$

$\delta_h$ : composante du cercle de l'horizon, elle provient du cercle de l'horizon d'une hauteur de  $6^\circ$ , elle semble associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques. La formule donnant la composante  $\delta_h$  est représentée par l'équation suivante:

$$\delta_h = G_0 \times \frac{-0.02 \times a_2}{a_2^2 + a_2 \times b_2 + 1.8} \times \exp(\sin(\gamma_s)) \quad (II.40)$$

Avec :

$$b_2 = \exp\{0.2 + 1.75 \times \log(\sin(\gamma_s))\} \quad (II.41)$$

$$a_2 = \log(T_L) - 3.1 - \log(\sin(\gamma_s)) \quad (II.42)$$

Donc le diffus du ciel est exprimé d'une manière générale par la l'équation suivante :

$$ID_{ciel}^i = (\delta_i + \delta_{i'} \times \frac{1 + \sin(\chi_s)}{2} + \delta_d \times \cos(\delta^i) + \delta_h \times \cos(\chi_s)) \quad (II.43)$$

Finalement, on retrouve que l'éclairement diffus total s'écrit sous la forme de quatre composantes :

$$ID_i = ID_i^i + ID_d^i + ID_h^i + ID_a^i \quad (II.44)$$

#### II.2.7.4. Eclairement global incident sur un plan quelconque

L'éclairement global  $IG_i$  modélisé par Capderou est donné par l'équation suivante :

$$IG_i = IB_i + ID_i \quad (II.45)$$

Les variations du rayonnement solaire direct, diffus et global en fonction de temps pour site de Ghardaïa sont représentées sur la figure (II.12).

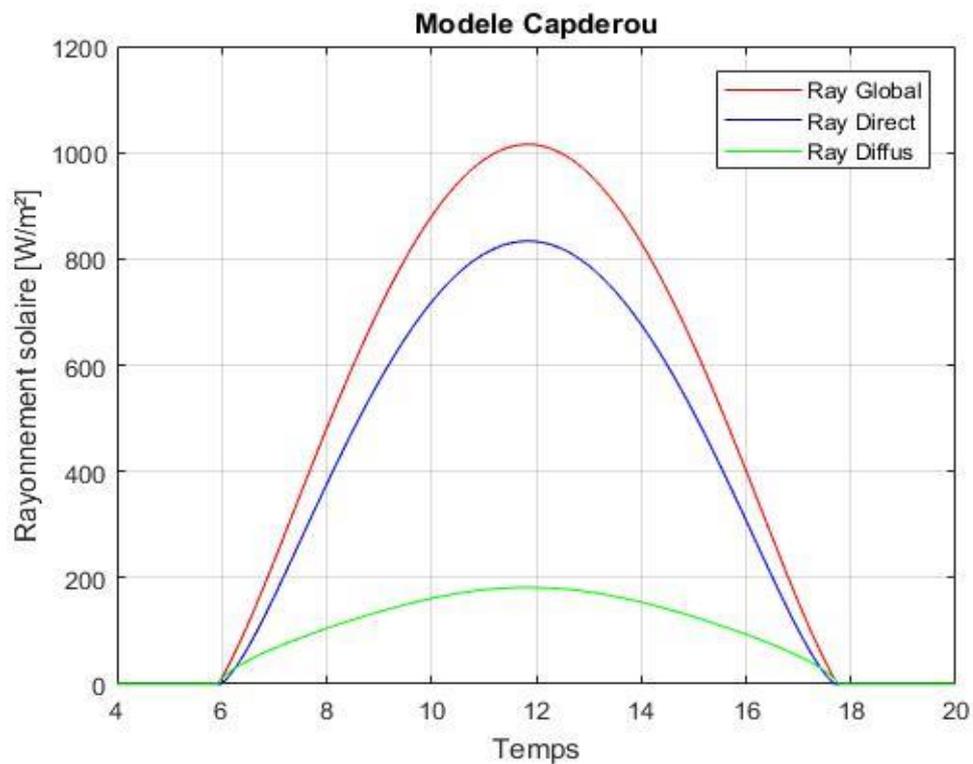


Figure II.12 : Variation des rayonnement incident sur un plan quelconque, en fonction de temps sur site de Ghardaïa.

On remarque que l'éclairement diffus incident sur un plan quelconque (Fig II.12) est supérieur à l'incident sur plan horizontal (Fig II.11).

### II.3. Conception mécanique et simulation optique du cuiseur

#### II.3.1. Conception mécanique par Solid Works

Solid Works est un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur, permet de réaliser de la modélisation 2D et 3D de manière très précise. Alors Pour la conception des cuiseurs, nous avons besoin de ce logiciel pour accomplir les formes requises et ensuite l'introduire à la réalité.

#### II.3.2. Simulation optique avec le logiciel TracePro

Pour la simulation, vous devez utiliser un logiciel de simulation optique. Les performances optiques et thermiques des cuiseurs solaires peuvent être optimisées si les cuiseurs sont orientés efficacement (Fig II.13); de telle sorte que les rayons solaires incidents tombent sur les récepteurs avec un angle d'incidences nulles, donc les pertes optiques seront minimisées [22].

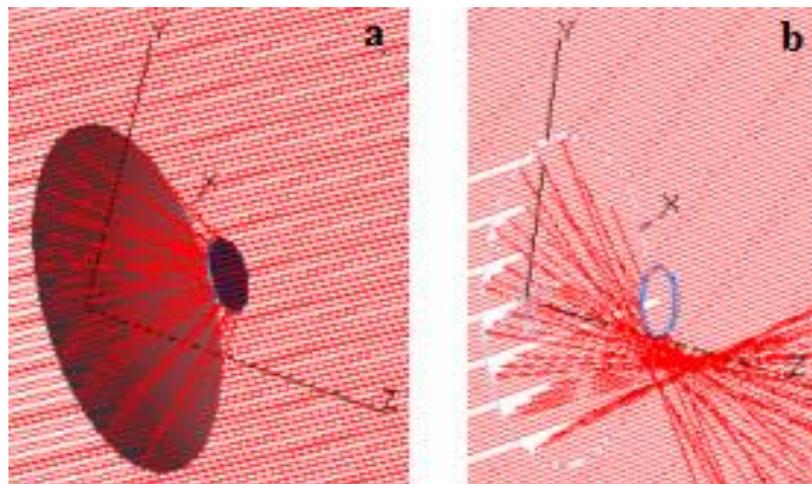


Figure II.13 : Schéma de la trajectoire des rayons solaires incidents sur le cuiseur dans cas d'une bonne orientation et d'une absence d'orientation (déviations des rayons).

## II.4. Présentation du lieu de stage

### II.4.1. Site de Ghardaïa

Le site de Ghardaïa (Fig II.14) est situé au centre de l'Algérie et distant de 600 km d'Alger à  $32.39^\circ$  de latitude Nord, de  $3.78^\circ$  de longitude Est, et à l'altitude de 463 mètres au niveau de la mer. Présentant un climat désertique, le site de Ghardaïa est limité du côté Nord par la Wilaya de Laghouat (200 km), à l'Est par la Wilaya de Ourgla (200 km), au Sud-Ouest par la Wilaya d'Adrar (800 km), à l'Ouest par la Wilaya d'El-Bayad (350 km). Le site est devenu une nouvelle structure scientifique, qui a été mise en place en 2002 par le ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, il s'agit de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER), affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) situé à Bouzaréah, Alger [2].

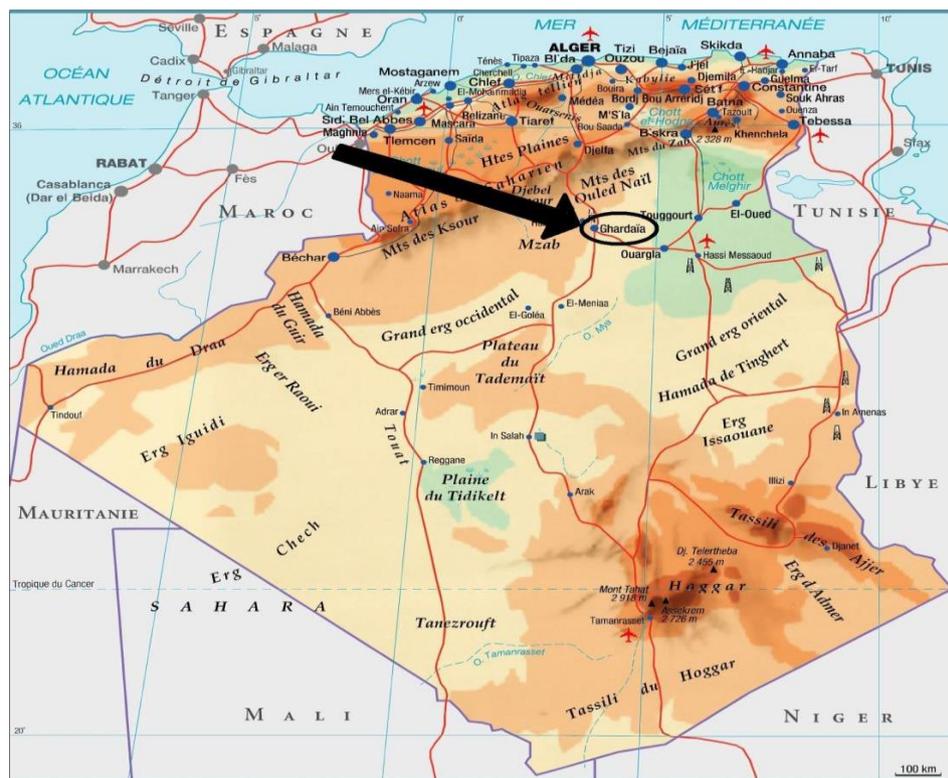


Figure II.14 : Site de Ghardaïa [2].

La caractérisation de sites se fait à travers l'analyse des paramètres météorologique et radiométrique, tel que : la précipitation, la température ambiante, l'humidité relative, le vent. En ce qui concerne le site de Ghardaïa, la pluviométrie est du type saharien avec une moyenne

annuelle de 67.37 mm. Le nombre de jours de pluie par an en moyen est de 20 à 30 jours, les vitesses moyennes annuelles du vent sont de 3.1 à 4.4 m/s mesurées à 10m du sol. Les températures moyennes maximales mensuelles varient de 14.9 °C en Janvier à 43.2 °C en Juillet, les températures moyennes minimales mensuelles varient de 3.4 °C en Janvier à 29.5 °C en Juillet. Les températures moyennes mensuelles varient de 9 °C en Janvier à 36.5 °C en Juillet avec une moyenne annuelle de 22.6 °C [2].

#### II.4.2. Aperçu sur l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER)

Inauguré en 1999, l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) (Fig II.15), affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) est située dans la ville de Ghardaïa (600 km d'Alger la capitale) et à 1 kilomètre de l'aéroport. Les moyens considérables mis dans la formation et la recherche dans le domaine des énergies renouvelables, comme le développement de l'équipement des laboratoires spécialisés ont permis à l'Algérie d'être un associé digne de confiance et expérimenté dans le domaine des énergies renouvelables. Aujourd'hui, deux divisions sont chargées des recherches [19] :

- La division Mini Centrales Solaires
- La division Application des Energies Renouvelables dans les Milieux Arides et Semi Arides.



Figure II.15 : Photo de l'Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER)  
Ghardaïa

### **II.4.3. Equipe Mini Centrales Thermodynamiques**

Les cuiseurs solaires existants au niveau de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables s'inscrivent dans le programme des projets de maîtrise et de développement des systèmes à cuisson solaire de l'équipe (MCSTH) Mini Centrales Solaire Thermodynamiques, dans laquelle nous avons exercé notre stage dont les objectifs de l'équipe sont principalement :

- 1- Développement et la maîtrise de la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques.
- 2- Développement, innovation et adaptation des systèmes de poursuite solaire au Sud Algérien.
- 3- Développement et amélioration d'échange de chaleur au niveau de l'absorbeur et du circuit de fluide caloporteur.
- 4- Développement et étude des effets climatiques de Sud algérien sur les héliostats dans les centrales à tour.
- 5- Développement des systèmes à moyenne températures tel que les concentrateurs paraboliques composés (CPC) pour la production d'eau chaude ainsi que pour la création du froid solaire.

### **II.4.4. Données utilisées**

Actuellement ; en Algérie, la mesure des données de l'éclairement solaire est effectuée d'une manière instantanée, constante et sur certains sites seulement de l'Algérie. Nous avons choisi le site de Ghardaïa pour cette étude, le choix du site s'est porté sur la disponibilité des données radiométriques recherchées. En effet, les données de l'éclairement solaire (global, diffus, global incliné et direct normal) utilisées provient de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, 'URAER'. Le rayonnement solaire global est mesuré avec un pyranomètre CMP21 de Kipp & Zonen, tandis que rayonnement solaire direct normal est mesuré avec un pyréliomètre CHP1 de Kipp & Zonen (Fig II.16). Les données sont enregistrées par pas de 1 minute et stockées sur disque d'un micro-ordinateur.

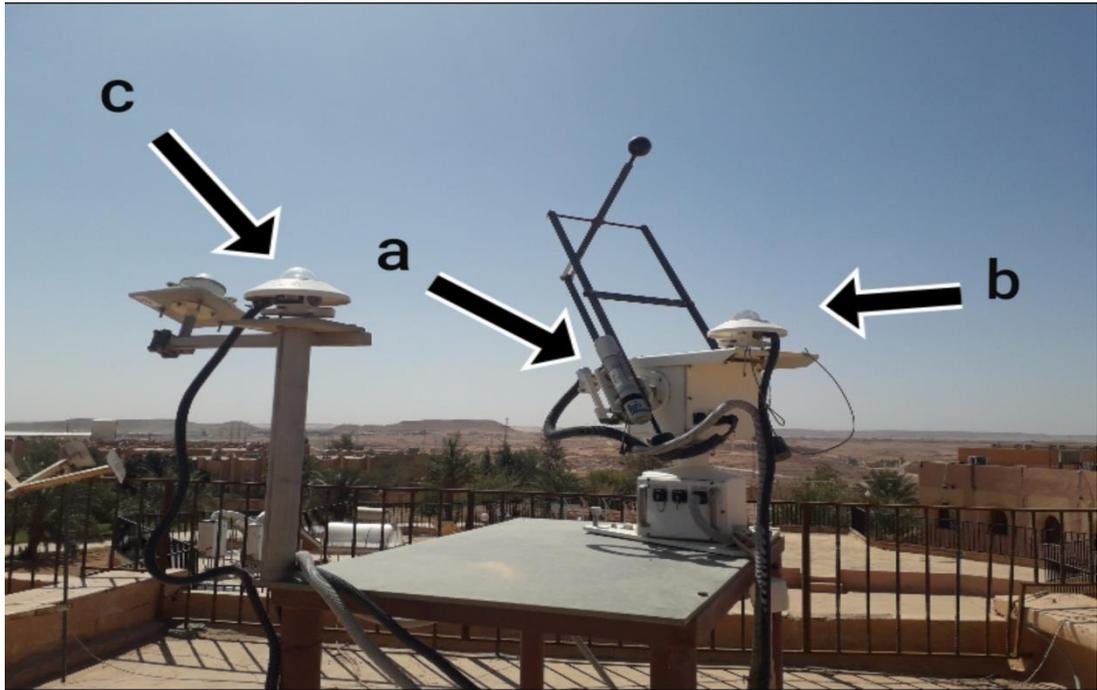


Figure II.16 : Instruments de mesure du rayonnement solaire ; (a): Pyrhéliomètre (mesure du rayonnement direct), (b): Pyranomètre (mesure du rayonnement global), (c): Pyranomètre (mesure du rayonnement diffus).

## II.5. Méthodologies de test adoptées

### II.5.1. Méthode de tests suggérée par Mullick et al.

Selon cette procédure de test, les performances du cuiseur solaire parabolique ont été évaluées par deux paramètres de performance, à savoir le facteur de perte de chaleur  $F'UL$  et le facteur d'efficacité optique  $F'\eta_o$ . Il existe deux tests distincts pour la détermination de ces facteurs de performance. Le facteur de perte de chaleur  $F'UL$  est obtenu à partir d'un test de refroidissement. La valeur du facteur de perte de chaleur dépend principalement de la température de l'eau de l'ustensile, de la vitesse du vent et de la surface de l'ustensile de cuisson. Le facteur d'efficacité optique  $F'\eta_o$  est déterminé à partir du test de chauffage. Cela dépend éventuellement de la qualité de la surface du réflecteur, de la réflectivité de la surface du concentrateur, de la surface d'interception et de l'absorption de la surface extérieure de l'ustensile de cuisson, ainsi que de l'orientation du concentrateur [20].

Mathématiquement, le facteur d'efficacité optique  $F'\eta_o$  [20] est défini comme suivant :

$$F'\eta_o = \frac{F'UL}{c} \frac{\left[ \left( \frac{T_{w2} - \bar{T}_a}{\bar{I}_b} \right) - \left( \frac{T_{w1} - \bar{T}_a}{\bar{I}_b} \right) e^{-\tau/\tau_o} \right]}{\left( 1 - e^{-\tau/\tau_o} \right)} \quad (II.46)$$

Avec C représente le rapport de la surface d'ouverture de la parabole  $A_p$  à la surface de l'ustensile de cuisson  $A_t$ .  $T_{w1}$  et  $T_{w2}$  sont les températures initiale et finale de l'eau respectivement pendant l'intervalle de temps  $\tau$  qui est de 10 minutes,  $\bar{T}_a$  est la température ambiante moyenne de l'air toutes les 10 minutes, et  $\bar{I}_b$  est la moyenne du rayonnement solaire direct chaque 10 minutes.

Le facteur de perte de chaleur  $F'UL$  est alors déterminé comme suivant :

$$F'U_L = \frac{(MC)'_w}{\tau_o \cdot A_t} \quad (II.47)$$

Où  $A_t$  est la surface de l'ustensile de cuisine.  $(MC)'_w$  est la puissance calorifique combinée de l'eau et de l'ustensile de cuisson qui est équivalente à [20] :

$$(MC)'_w = M_w \cdot C_w + M_p \cdot C_p \quad (II.48)$$

Où  $M_w$  est la masse d'eau,  $C_w$  est la capacité calorifique spécifique de l'eau ( $C_w = 4190 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $M_p$  (1kg) est la masse de pot et  $C_p$  (921 J / kg) est la capacité calorifique spécifique du pot. Puisque l'ustensile est fait d'aluminium, ceci implique que  $C_p$  est la capacité calorifique spécifique de l'aluminium.

### II.5.2. Méthode de tests suggérée par Funk

Les performances thermiques des cuiseurs solaires peuvent être évaluées selon la procédure du Standard International développé par Funk. Selon ce Standard, la puissance de cuisson P du cuiseur solaire peut être calculée quand une masse d'eau bien déterminée est maintenue à l'intérieur de l'ustensile de cuisson et le cuiseur solaire est mis en service selon certaines conditions décrites dans le Standard de Funk. Et comme l'eau va se réchauffer durant le fonctionnement, sa température moyenne est surveillée et relevée pendant une durée de temps de 10 min durant un intervalle particulier ( $\Delta t = 600 \text{ s}$ ). Quand la température de

l'eau atteint les 95 °C ou quand 4 heures de temps sont écoulés du début du test, l'expérimentation est arrêtée (l'une ou l'autre des deux conditions est satisfaite). La puissance moyenne délivrée durant cet intervalle est exprimée par la formule suivante [20] :

$$P = \frac{(M_w \cdot C_w) \cdot \Delta T_w}{\Delta T} \quad (\text{II.49})$$

### II.5.3. Calcul du temps d'ébullition

Ayant obtenu les valeurs de  $\overline{F'\eta_o}$  et  $F'UL$ , il est possible de prédire, au moins approximativement, la période de chauffage sensible du cuiseur dans toutes les conditions climatiques ( $I_b$  et  $T_a$ ). la période de chauffage sensible de l'eau depuis la température ambiante jusqu'à 100 °C peut être obtenus par l'équation (II.50) [20] :

$$\tau_{boil} = \tau_o \ln \left[ \frac{1}{1 - \frac{F'UL}{\overline{F'\eta_o}} - \frac{1}{c} \left( \frac{100 - T_a}{I_b} \right)} \right] \quad (\text{II.50})$$

Où:

$T_a$ : valeur de température ambiante correspondant à  $T_w = \tau_{boil}$ ,

$I_b$ : valeur du rayonnement solaire direct correspondant à  $T_w = \tau_{boil}$ ,

Le temps nécessaire pour faire bouillir la quantité d'eau le matin n'est pas le même temps que celui qui sera nécessaire pour faire bouillir la même quantité d'eau dans l'après-midi. Par conséquent, afin de connaître le temps d'ébullition de l'eau plusieurs fois par jour, il intéressant d'essayer de faire bouillir deux litres d'eau à partir du lever du soleil jusqu'au coucher du soleil. Pour chaque fois et quand la quantité d'eau atteint le point d'ébullition, nous prenons une nouvelle quantité et nous la faisons bouillir.

### II.5.4. Détermination du rendement énergétique du cuiseur

La première loi de la thermodynamique, donne le rendement énergétique ( $\eta$ ) comme étant le rapport entre l'énergie de sortie ( $E_o$ ) par rapport à l'énergie d'entrée ( $E_i$ ). Le rendement

énergétique d'un cuiseur solaire parabolique est calculé en utilisant l'équation (II.51) ci-dessous :

$$\eta = \frac{E_o}{E_i} = \frac{(MC)_w \cdot (T_{wf} - T_{wi})}{I_b \cdot \Delta t \cdot A_p} \quad (II.51)$$

## II.6. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons essayé de donner un aperçu générale du gisement solaire avec la modélisation des l'éclairéments par le modèle Capderou, pour à la fin obtenir plusieurs courbes graphiques appartenant au site de Ghardaïa, (déclinaison solaire, hauteur et azimut du soleil), où nous avons conclu que Ghardaïa est parmi les meilleures régions ensoleillées avec des valeurs importantes du rayonnement solaire direct, diffus et global.

Nous avons également fait la description du cuiseur solaire étudié, qui est un cuiseur solaire de type parabolique ; et les différentes méthodes de tests, suivant les standards internationaux ; qui permettent l'évaluation des performances du cuiseur en question. Les tests entrepris sur le cuiseur vont être représentés et discutés sur le chapitre 3.

---

## **CHAPITRE III**

# **Etude expérimentale, résultats obtenus, interprétation et discussion**

### **III.1. Introduction**

Un cuiseur solaire est une technologie qui peut fournir de la chaleur de façon naturelle et renouvelable, pour la cuisson, il utilise souvent la technique de concentration des rayons solaires et/ou le phénomène de l'effet de serre. La concentration du rayonnement solaire permet, pour une surface de capteur donnée, de diminuer la surface de réception effective et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur. Ainsi la température atteinte après transformation en chaleur est plus élevée que pour des dispositifs à capteurs sans concentration. Les principaux dispositifs optiques qui permettent de concentrer l'énergie solaire mettent en œuvre des surfaces réfléchissantes (miroirs). La forme géométrique qui donne la meilleure concentration est la parabole. Dans le troisième chapitre, une évaluation des performances thermiques d'un cuiseur solaire parabolique testé à l'URAER, Ghardaïa est effectuée.

### **III.2. Etude expérimentale du cuiseur solaire parabolique**

Dans cette étude expérimentale, les températures mesurées au niveau du cuiseur à travers l'unité d'acquisition de donnée AGILENT 34972A seront visualisées numériquement et graphiquement sur l'écran d'un micro-ordinateur. Par ailleurs, des tests sont réalisés durant plusieurs jours avec différentes conditions climatiques et le temps d'ajustement du cuiseur est effectué d'une manière bien étudiée. Les résultats issus des tests réalisés seront discutés et interprétés pour vérifier aussi bien le bon fonctionnement de l'ensemble et sa faisabilité/rentabilité. Les paramètres caractérisant le cuiseur seront bien déterminés selon les conditions climatiques locales de la région, le rendement énergétique du cuiseur est également calculé. La courbe de chauffage et refroidissement caractérisant ce cuiseur sera également obtenue.

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

Comme le montre la figure (III.1), le concentrateur solaire parabolique (PSC) se réfère aux systèmes à concentration en un point focal, il comprend le réflecteur et l'absorbeur, dans lequel l'ustensile ; qui est l'absorbeur, est placé dans la zone focale. La forme du concentrateur est du type parabolique ayant un diamètre d'ouverture de 0.9 m, la zone réfléchissante du concentrateur

solaire est de 0.63 m<sup>2</sup>, la distance focale du concentrateur est de 0.5 m tandis que la zone focale du concentrateur est de 0.10 m<sup>2</sup>.

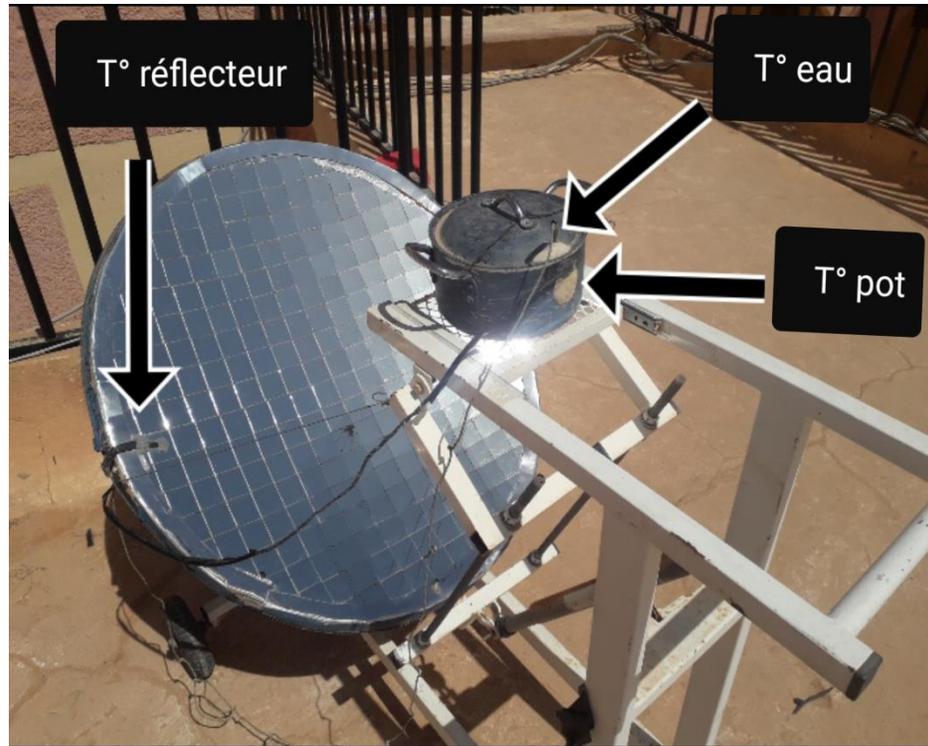


Figure III.1 : Une vue prise lors de test du cuiseur parabolique à l'URAER.

Le rapport de concentration du concentrateur est calculé d'environ 20 dans lequel des petits segments de miroirs sont rassemblés pour former le collecteur, la réflectivité des segments de miroirs est de 0,80. Le pot de cuisson en aluminium (20 cm de diamètre et 10 cm de hauteur) rempli d'eau et équipé d'un couvercle noir a été placé au point focal du cuiseur (Fig III.2).

La distance focale du concentrateur ainsi que la surface d'ouverture de la parabole sont données par les équations suivantes :

$$f = \frac{d^2}{16h} \quad (\text{III.1})$$

$$A_p = \frac{8\pi \times f^2}{3} \left[ \left( \left( \frac{d}{4f} \right)^2 + 1 \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right] \quad (\text{III.2})$$

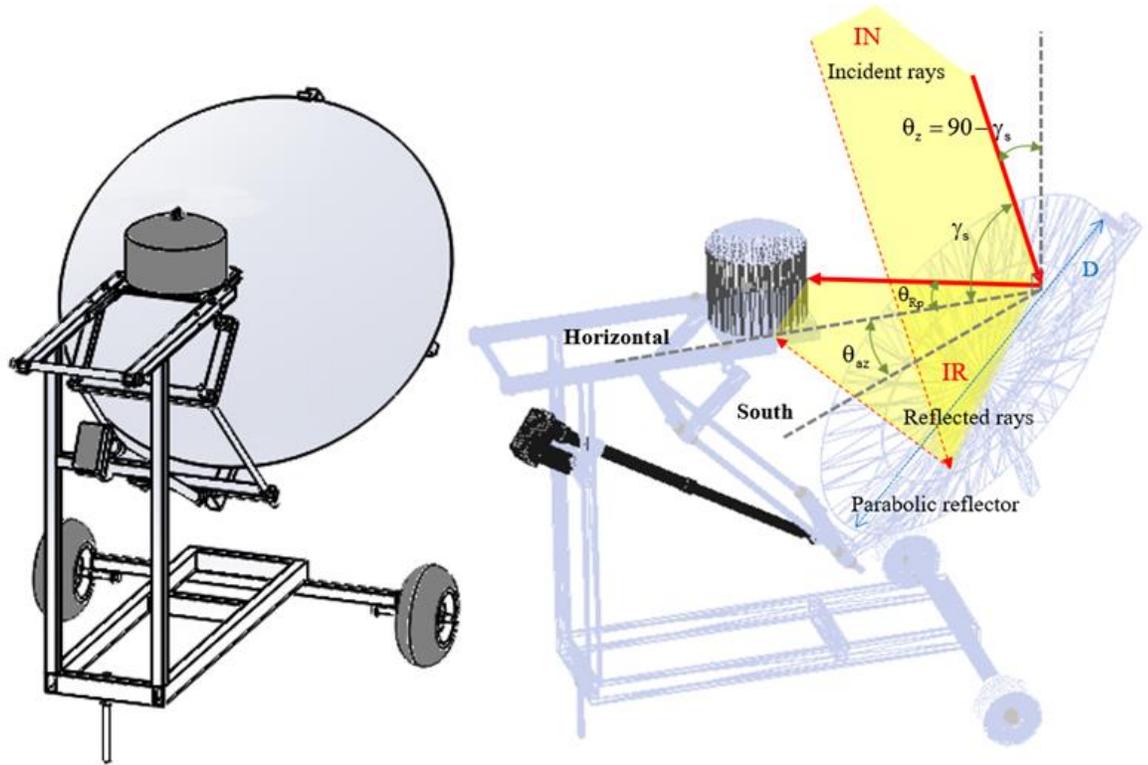


Figure III.2 : Schéma du cuiseur parabolique de l'URAER, Ghardaïa et les différentes composantes du rayonnement incident sur le concentrateur.

### III.2.2. Temps d'ajustement du cuiseur

L'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 cuiseurs solaires doivent être réorientés en continu vers le soleil, en suivant sa course pendant la cuisson.

Un suivi manuel est effectué à différents intervalles pendant le temps de cuisson. Notre CSP suit les mouvements du soleil manuellement pendant 10 min d'intervalle à partir d'une position initiale du réflecteur à 9.5h du matin jusqu'à la position finale à 14h de l'après midi, heure d'arrêt

des tests. La figure (III.3) illustre une vue prise à deux moments différents, où l'on observe le changement de direction du CSP par suivi du soleil.



Figure III.3 : Vue du cuiseur parabolique lors d'un test du mois de Mai 2021 pris à deux heures différentes à 10:30h AM et 12:30h AM.

### III.2.3. Schéma synoptique de la chaîne de mesure

La figure (III.4), ci-après représente le schéma synoptique de notre installation, cette dernière comporte plusieurs thermocouples de Type K implémentés à divers endroits du cuiseur solaire, d'autres capteurs permettant la mesure des paramètres climatiques (température ambiante, éclairement solaire et vitesse du vent) sont utilisés, liés à une unité d'acquisition de données de type AGILENT 34972A [21], connectée à son tour à un micro-ordinateur par le baie d'un port USB. Le port USB, permet un grand nombre d'application avec une faible contrainte d'encombrement au point de vue fils de connexion.

La chaîne d'acquisition de données, comporte les instruments de mesure suivants :

- Thermocouple Type K pour mesurer les températures à différents endroits du cuiseur.

- Pyranomètre pour mesurer l'éclairement solaire.
- Station météorologique (mesure des paramètres climatiques ...etc.).
- Unité d'acquisition de donnée de type Agilent 34972A.

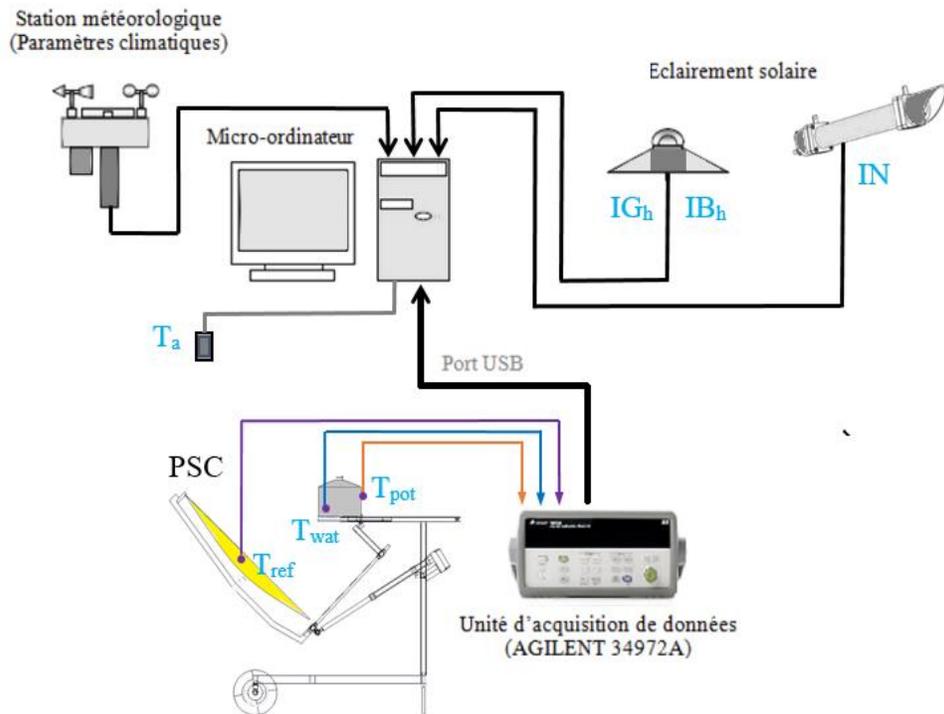


Figure III.4 : Schéma synoptique de l'installation des cuiseurs solaires.

### III.2.4. Montage des capteurs de mesures et accès aux données par ordinateur

Le contrôle du comportement thermique du cuiseur solaire nécessite un suivi régulier des températures à plusieurs points du cuiseur durant son fonctionnement. Pour cela, divers capteurs sont utilisés pour la mesure des températures, liés à une unité d'acquisition de données de type Agilent 34972A représentées sur la figure (III.5), indiqué par la forme ovale de couleur rouge. D'autres dispositifs sont nécessaires tel qu'un pyranomètre pour la mesure de l'éclairement solaire global, direct et diffus, une station météorologique professionnelle pour la mesure de la vitesse, la direction du vent et l'humidité. Les données collectées ; en temps réel, sont affichées

sous forme numérique et graphique et sauvegardées sur un fichier qu'on peut importer sur Excel. Ces données sont toutes affichées sur l'écran de l'ordinateur (Fig III.5).



Figure III.5 : Visualisation des températures sur un micro-ordinateur connecté à une unité d'acquisition de donnée.

### III.2.5. Description des tests effectués

Les tests expérimentaux ont été réalisés à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables, située à Ghardaïa, Sud de l'Algérie (32.39 °N, 3.78 °E, 463 m au niveau de la mer) de 9.5 h à 14 h (ALT). Au cours de la période expérimentale, la température ambiante ( $T_a$ ), la température de l'eau dans le pot ( $T_w$ ), la température sur la surface externe du l'ustensile ( $T_u$ ) et la température sur la surface interne du réflecteur, concentrateur ( $T_r$ ), l'éclairement solaire direct normal incident sur le concentrateur ( $I_n$ ), et la vitesse du vent ( $W_s$ ) ont été relevés et enregistrés à un intervalle de temps régulier. L'éclairement solaire global incident a été mesuré à l'aide d'un pyranomètre Kipp&Zonen CMP21 et l'éclairement solaire direct normal est mesuré avec un pyrhéliomètre K & Z CHP1, en  $W/m^2$ . La vitesse du vent (en m/s) a été mesurée en utilisant un anémomètre NRG 40H. La précision de l'anémomètre est de l'ordre de  $1\% \pm 0.1$  m/s. Pour les

tests retenu, la vitesse du vent a toujours été inférieure à 1.3 m/s, elle est reconnue comme faible ; ainsi, l'effet du vent et sa direction serait négligeable et sans effet sur nos mesures. La température ambiante (en °C) et l'humidité relative (en %) ont également été mesurées avec un capteur de température du type Campbell CS215 et une sonde de mesure d'humidité ainsi qu'une station météorologique. Trois thermocouples sont placés à des endroits spécifiques et différents du cuiseur parabolique et sont utilisés pour mesurer la température au niveau du réflecteur et de l'absorbeur. Un thermocouple spécial a été inséré depuis un trou percé dans le couvercle du l'ustensile peint en noir et immergé dans l'eau à l'intérieur du l'ustensile de cuisson à 20 mm au-dessus du fond de celui-ci. La mesure des paramètres climatiques et expérimentaux est ensuite réalisée à travers le système d'acquisition de données par ordinateur (data-logger AGILENT 34972A) pour un intervalle de 1 minute.

### III.3. Résultats et discussion de la partie éclairement solaire

#### III.3.1. Influence du facteur TL sur le rayonnement solaire

Les variations au niveau de la mer du rayonnement direct et diffus en fonction du temps (hauteur du soleil) pour la ville de Ghardaïa (latitude est 32.39°) pour un jour type du printemps et pour différentes valeurs du facteur de trouble sont représentées sur la figure (III.6) :

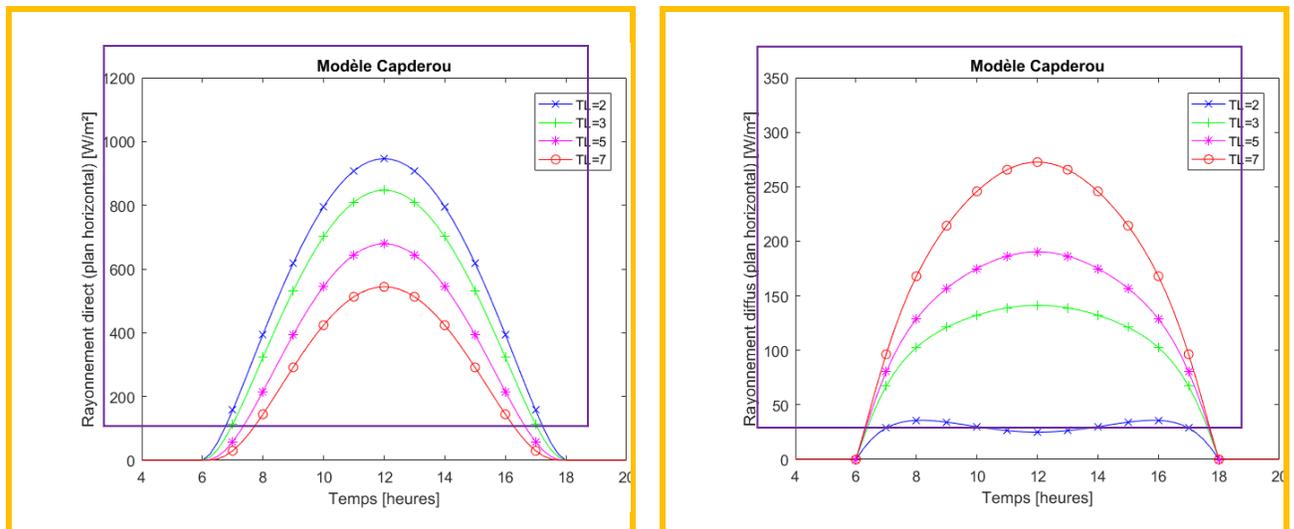


Figure III.6 : Variations du rayonnement direct et diffus horizontal (Modèle Capderou).

Sur la figure (III.6) on remarquera d'une manière générale que l'évolution du rayonnement direct horizontal est grandement influencé par le facteur de trouble de Linke. En effet, les variations de ces composantes sont inversement proportionnelle à ce facteur, une légère augmentation de ce dernier engendrera une diminution considérable de ces composantes, par exemple une augmentation de 1 du facteur  $T_L$  diminuera le rayonnement  $IB_h$  d'environ 100 à 120  $W/m^2$ , ce qui est une diminution importante dans la quantité du rayonnement direct (ces valeurs peuvent être considérées comme égales au rayonnement diffus). Pour la composante du rayonnement diffus horizontale, c'est le cas inverse, autrement dit les variations du rayonnement diffus sont proportionnelles au facteur de trouble (une augmentation de 20 à 25  $W/m^2$  est constatée). Un ordre de grandeur de ce facteur est donné pour le site de Ghardaïa, comme étant entre 2.2 à 2.2 en hiver et de 5.5 à 5.5 en été.

### **III.3.2. Application du modèle au site de Ghardaïa**

Les résultats de la programmation Matlab du modèle Capderou pour l'estimation du rayonnement solaire, sur le site de Ghardaïa sont présentés comme suit :

Les figures ci-après (Figure III.7, III.8), illustrent l'évolution des composantes directe et diffuse horizontale, du rayonnement global horizontal, du rayonnement direct normal et du rayonnement global incliné suivant différents angles  $\alpha$ ,  $\beta$ . Les courbes ont été dressées sur le même graphique, les résultats de la saison hivernale et estivale sont représentés :

- Plan horizontal  $(\alpha, \beta) = (0, 0)$  et plan incliné  $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

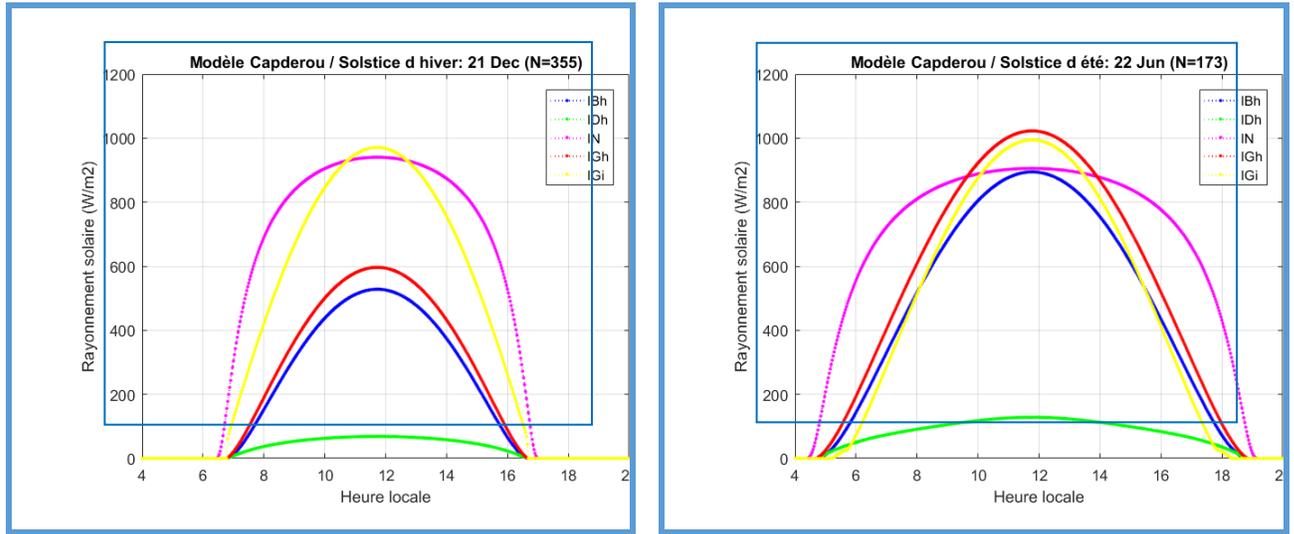


Figure III.7 : Rayonnement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude  $(32^\circ)$  pour un jour type du mois de Décembre et de Juin.

- Plan vertical Sud :  $(\alpha, \beta) = (0, 90^\circ)$  et vertical Est :  $(\alpha, \beta) = (-90^\circ, 90^\circ)$

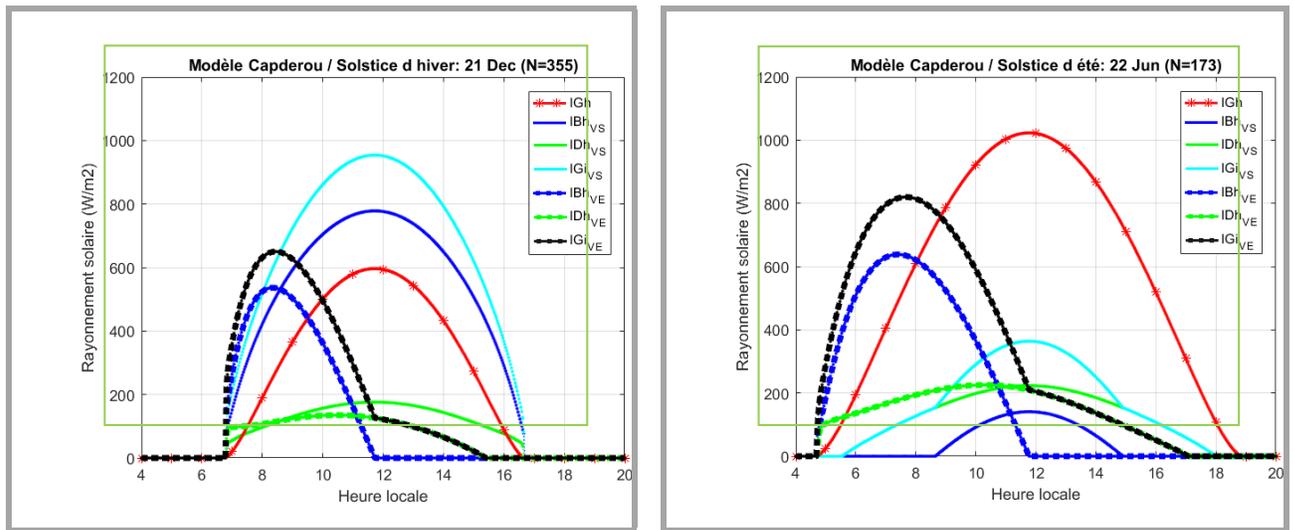


Figure III.8 : Eclairage incident sur un plan vertical Sud et un plan vertical Est pour un jour type du mois de Décembre et de Juin.

### III.3.3. Validation et discussion des résultats

Pour obtenir une validation du rayonnement solaire, nous allons confronter quelques valeurs du rayonnement solaire délivrées par la programmation du modèle Capderou et les valeurs mesurées sur le site de Ghardaïa. Deux dates sont retenues pour être présentées, une période hivernale du 11 Décembre pour le jour le plus court de l'année et une autre estivale correspondante au 30 Juin pour le jour le plus long de l'année. On présentera sur les figures suivantes (Figure III.9 - III.11), des graphes comparatifs relatifs aux résultats du rayonnement solaire, pour une journée hivernale et estivale :

- Jour d'hiver avec  $(\alpha, \beta) = (0, 0)$  : Global horizontal ( $IG_h$ ) et Direct horizontal ( $IB_h$ )

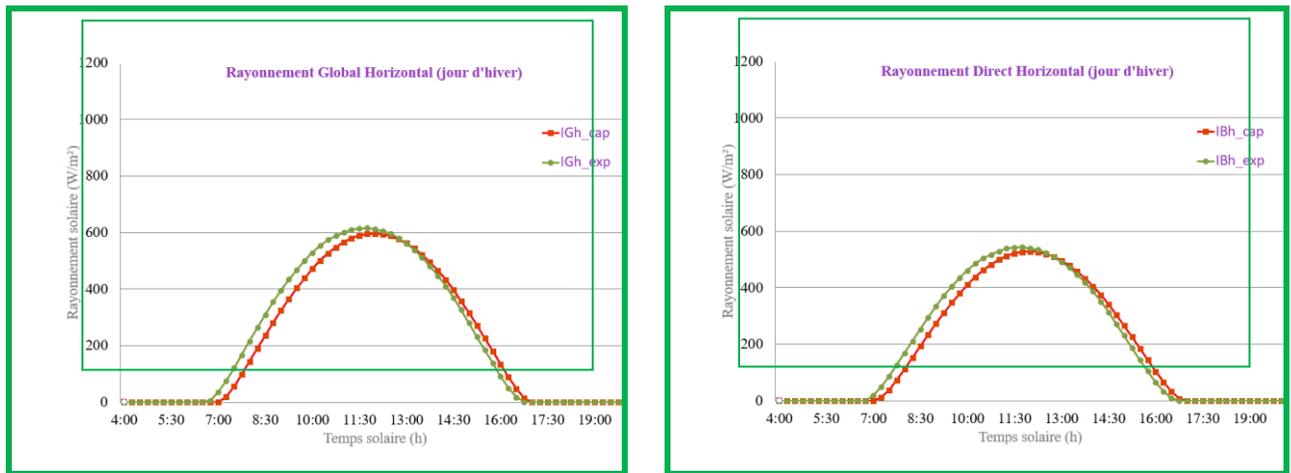


Figure III.9 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.

- Jour d'hiver : Direct normal (IN) avec poursuite 2 axes et Global incliné ( $IG_i$ ),  $(\alpha, \beta) = (0, 32^\circ)$

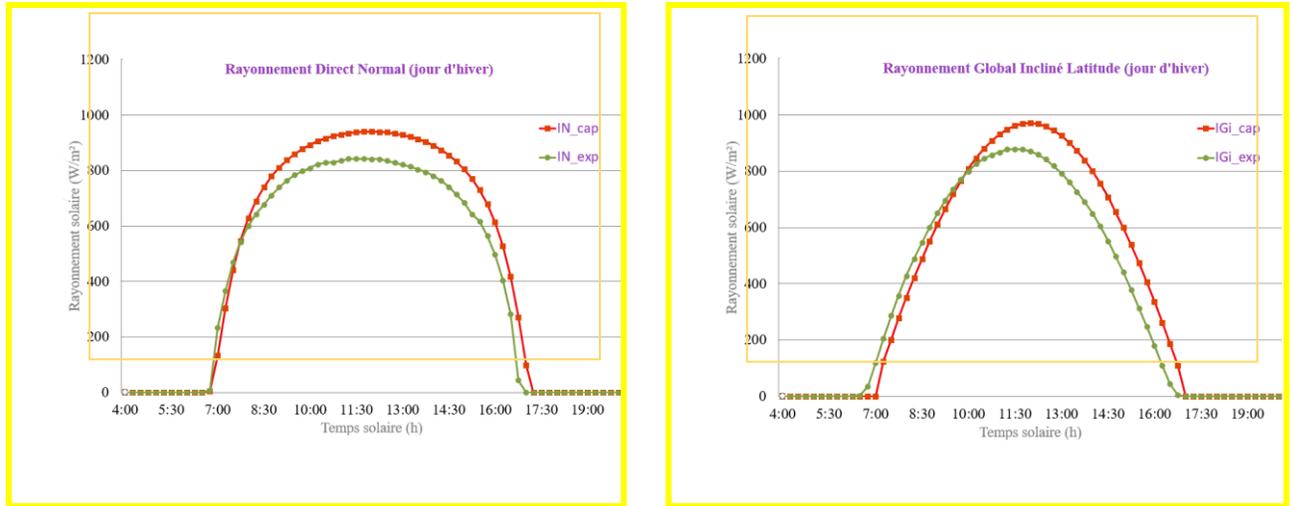


Figure III.10 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement direct normal et global incliné pour un jour clair d'hiver.

- Jour d'été avec  $(\alpha, \beta) = (0, 0)$  : Global horizontal ( $IG_h$ ) et Direct horizontal ( $IB_h$ )

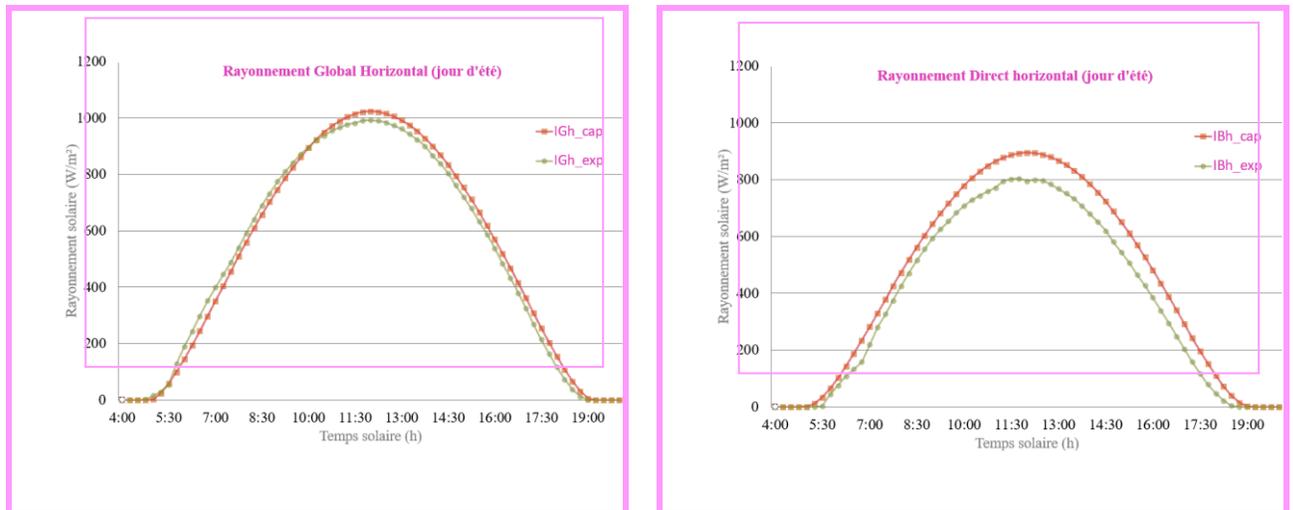


Figure III.11 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.

Pour une période hivernale (Fig III.9), on remarquera que le modèle Capderou sous-estime la composante directe horizontale et le rayonnement global avec une petite erreur. Par ailleurs, sur la figure (III.10), le modèle Capderou s'écarte de l'expérimental et surestime l'éclairement dans

les deux cas avec un écart important qui peut atteindre les  $100 \text{ W/m}^2$ . En période estivale (Figures III.11), le modèle Capderou présente un bon rapprochement de valeurs mesurées. Le traitement des graphes des figures (III.9 - III.11) montre que d'une manière générale, on peut dire que le modèle de Capderou donne une bonne estimation du rayonnement solaire pour la période hivernale par rapport à la période estivale pour le site de Ghardaïa. La conclusion la plus importante relative à notre étude est qu'on peut utiliser le modèle de Capderou pour une évaluation des performances de notre cuiseur solaire en cas d'absence de données expérimentales.

#### **III.4. Résultats et discussion de la partie cuiseur solaire**

Dans cette partie de l'étude expérimentale du système à cuiseur solaire parabolique, des tests ont été réalisés principalement pendant les jours à ciel clair et mi-clairs durant le mois de Mai et Juin 2021. Les paramètres suivants ont été enregistrés : la température ambiante ( $T_a$ ), la température de l'eau dans le pot ( $T_u$ ), la température sur la surface externe du l'ustensile ( $T_w$ ) et la température sur la surface interne du réflecteur, concentrateur ( $T_r$ ), l'éclairement solaire direct incident sur le concentrateur ( $I_b$ ), l'éclairement solaire direct normal incident sur le concentrateur ( $I_n$ ), et la vitesse du vent ( $W_s$ ).

##### **III.4.1. Tests d'évolution des températures de l'eau**

Pour ce type de tests, l'étude expérimentale du système à cuiseur solaire parabolique a été réalisée principalement pendant les jours de ciel clair et mi- clair au mois d'été. Les paramètres suivants ont été enregistrés : température ambiante  $T_a$ , température du fluide de cuisson  $T_w$ , rayonnement solaire direct  $I_B$  et rayonnement solaire direct normal  $I_N$ .

La cuisson nécessite souvent l'ébullition de l'eau ou le chauffage des aliments à haute teneur en eau. Les figures (III.12) présente les profils de la température mesurée pour le chauffage de 1.5 d'eau en fonction du temps avec la variation du rayonnement solaire durant le jour correspondant au test.

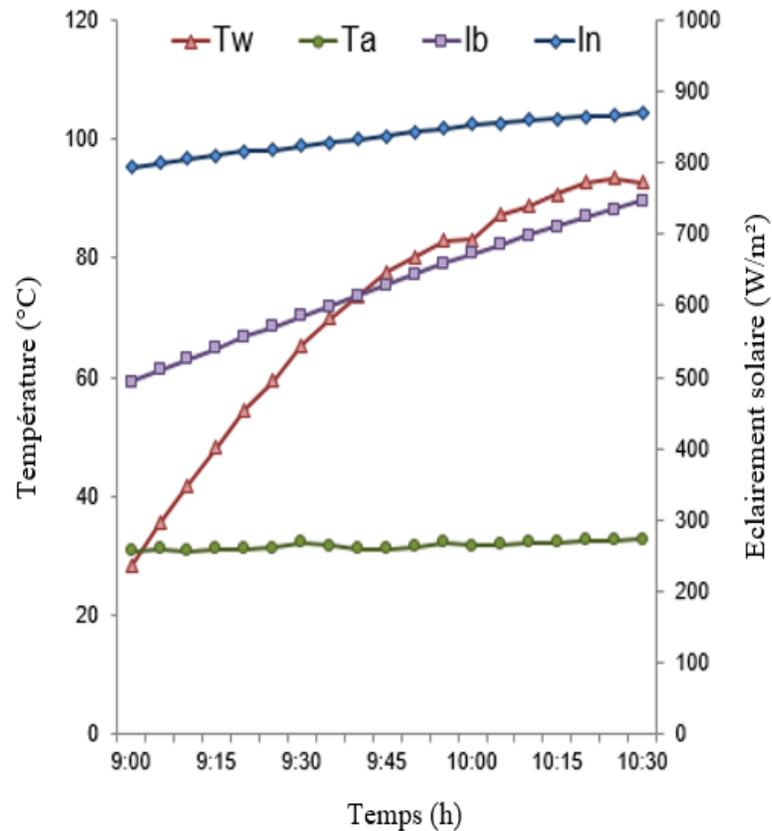


Figure III.12 : Variation des températures de l'eau dans l'ustensile et l'éclairement solaire avec le temps dans le cas d'une charge de 1 kg.

### III.4.2. Tests relatifs aux chauffages

Pour ce type de tests, le cuiseur solaire parabolique sera orienté vers le soleil (Fig III.13), et l'ustensile de cuisson est positionné au point focal du concentrateur. La charge d'eau étant de 1 L et les résultats de l'évolution des températures en fonction du temps sont illustrés sur la figure (III.14). La courbe de l'éclairement solaire relatif au premier test est donnée sur la figure (III.15). Pour une charge de 1.5, les résultats du test sont illustrés sur la figure (III.16) et les courbes de rayonnement correspondantes sont tracées sur la figure (III.17).



Figure III.13 : Vue du cuiseur durant les deux tests de chauffage du 8 et 9 juin.

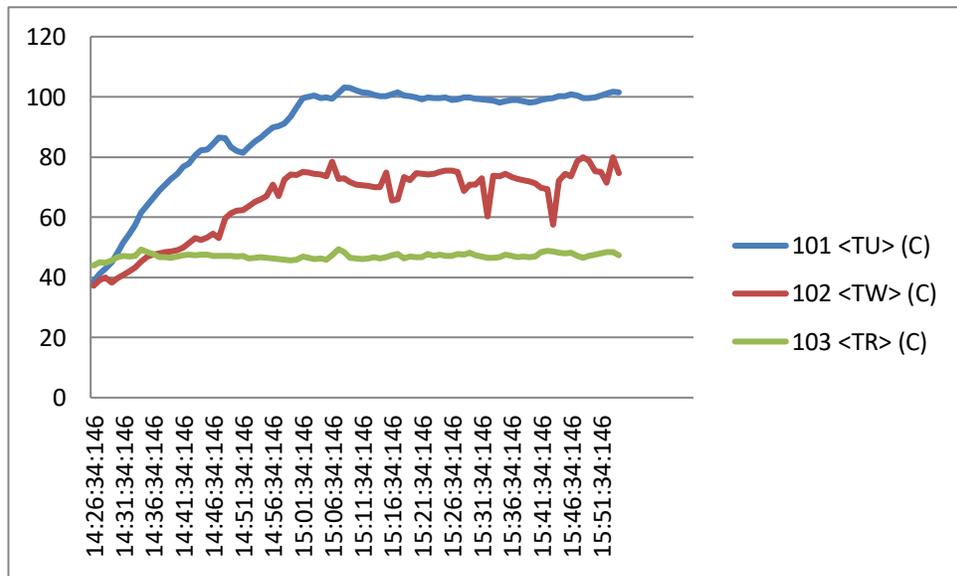


Figure III.14 : Evolution de la température de l'eau au niveau de l'ustensile de cuisson pour le test de chauffage de 1 litre d'eau de la journée du 8 Juin 2021.

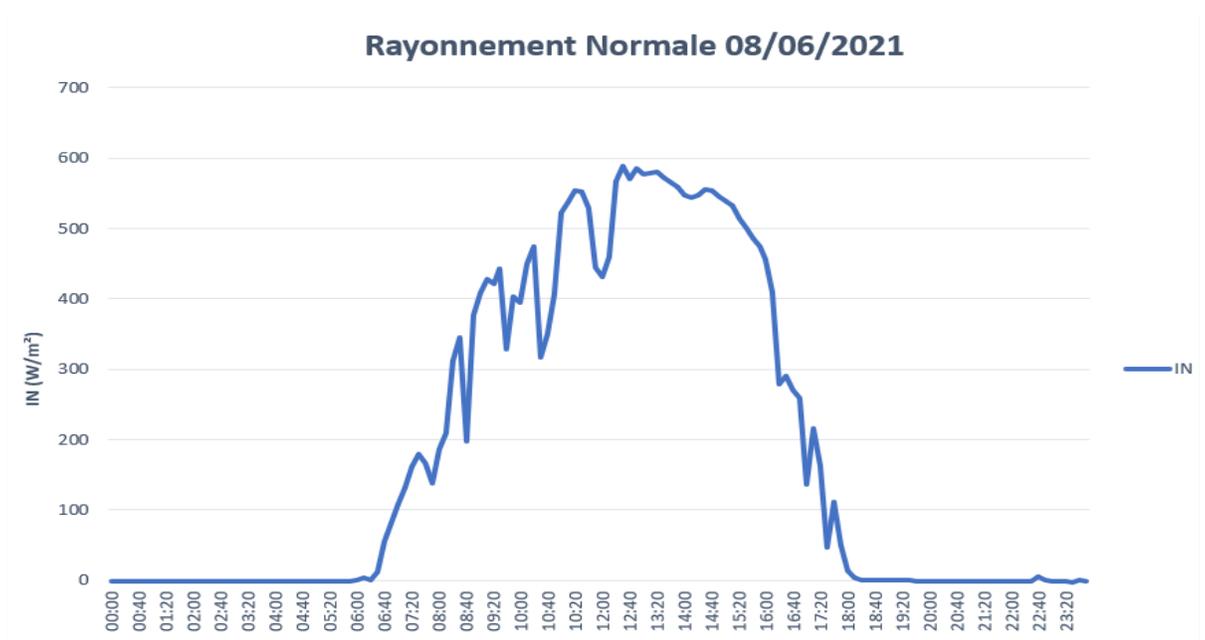


Figure III.15 : Evolution des valeurs du rayonnement solaire pour la journée du test du 8 Juin.

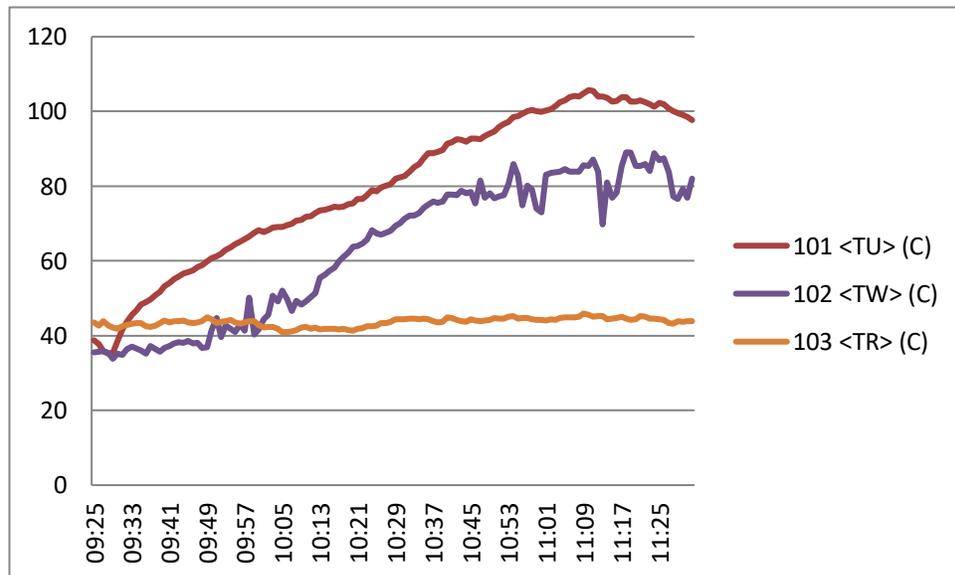


Figure III.16 : Evolution de la température de l'eau au niveau de l'ustensile de cuisson pour le test de chauffage de 1 litre et demi d'eau de la journée du 9 Juin 2021.

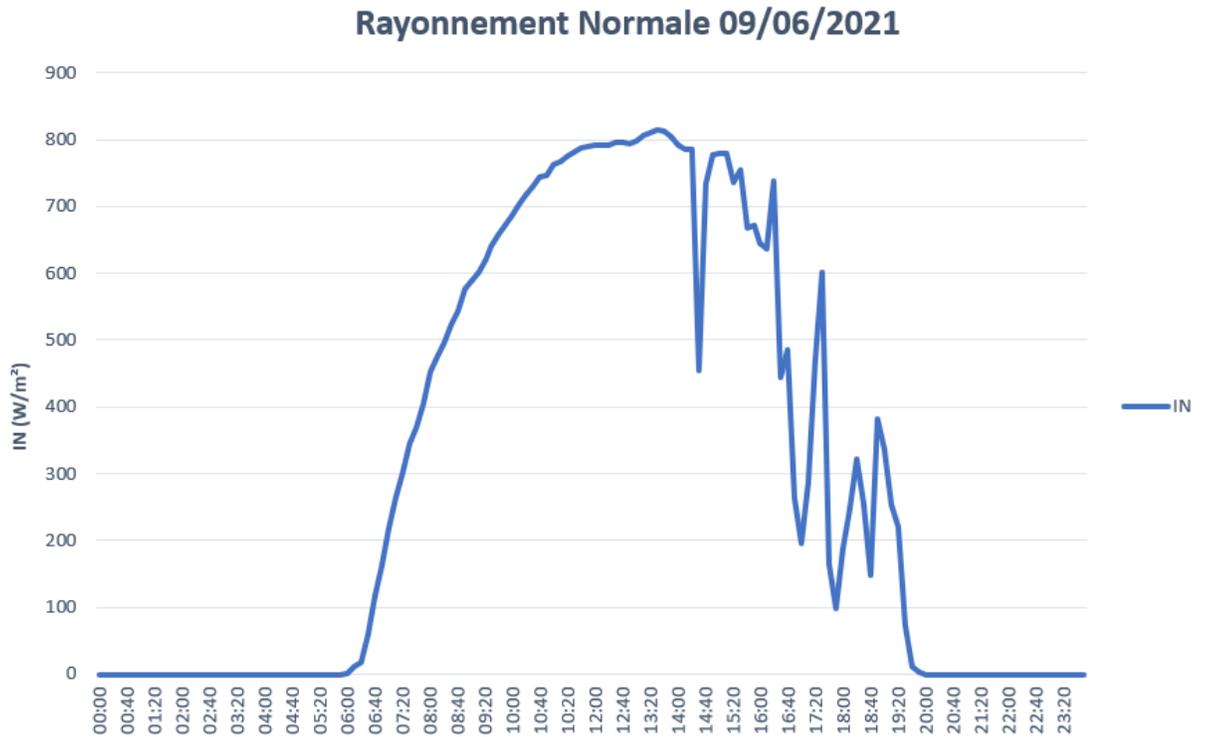


Figure III.17 : Evolution des valeurs du rayonnement solaire pour la journée du test du 9 Juin.

### III.4.3. Tests relatifs refroidissements

Pour ce type de tests, le cuiseur solaire parabolique ne sera pas orienté vers le soleil, il sera ombré par un grand parapluie (Fig III.18), et l'ustensile de cuisson sera l'abri de l'éclairement solaire. La charge d'eau étant de 1 L et les résultats de l'évolution des températures en fonction du temps sont illustrés sur la figure (III.19). La courbe de l'éclairement solaire relatif au premier test est donnée sur la figure (III.20). Pour une charge de 1.5, les résultats du test sont illustrés sur la figure (III.21) et les courbes de rayonnement correspondantes sont tracées sur la figure (III.22).



Figure III.18 : Vue du cuiseur durant les deux tests de refroidissement du 17 et 20 Mai.

D'après ces tests de chauffage et de refroidissement on remarque d'une manière générale que le cuiseur parabolique atteint des températures acceptables, il serait préférable que le jour soit clair puisque durant le deuxième test la journée n'était vraiment claire et les températures prennent beaucoup de temps pour atteindre la stagnation. L'effet de la charge est inversement proportionnel aux températures du cuiseur : plus la charge est importante plus le cuiseur prend du temps à chauffer l'eau.

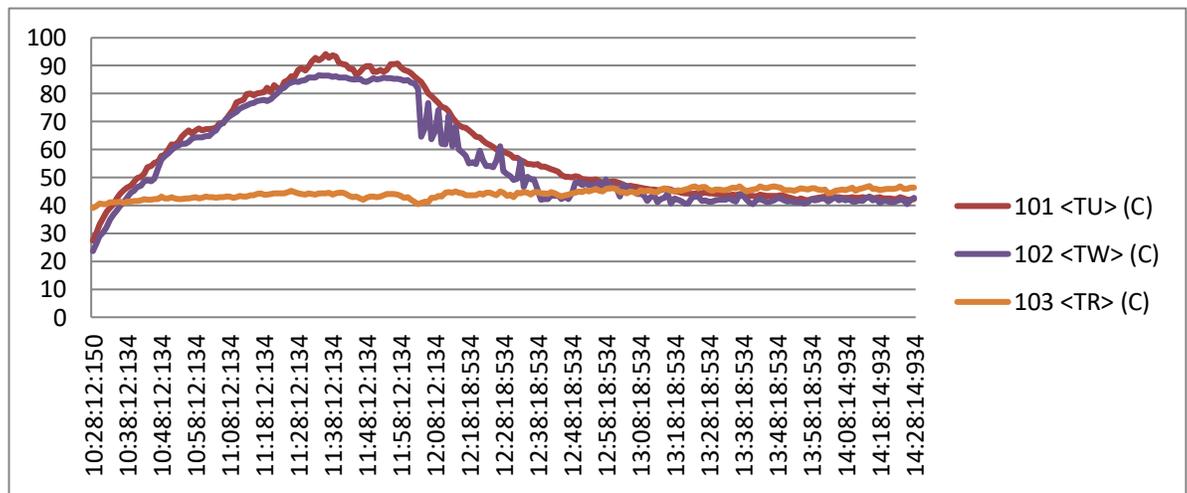


Figure III.19 : Evolution de la température de l'eau au niveau de l'ustensile de cuisson pour le test de refroidissement de 1 litre d'eau de la journée du 17 Mai 2021.

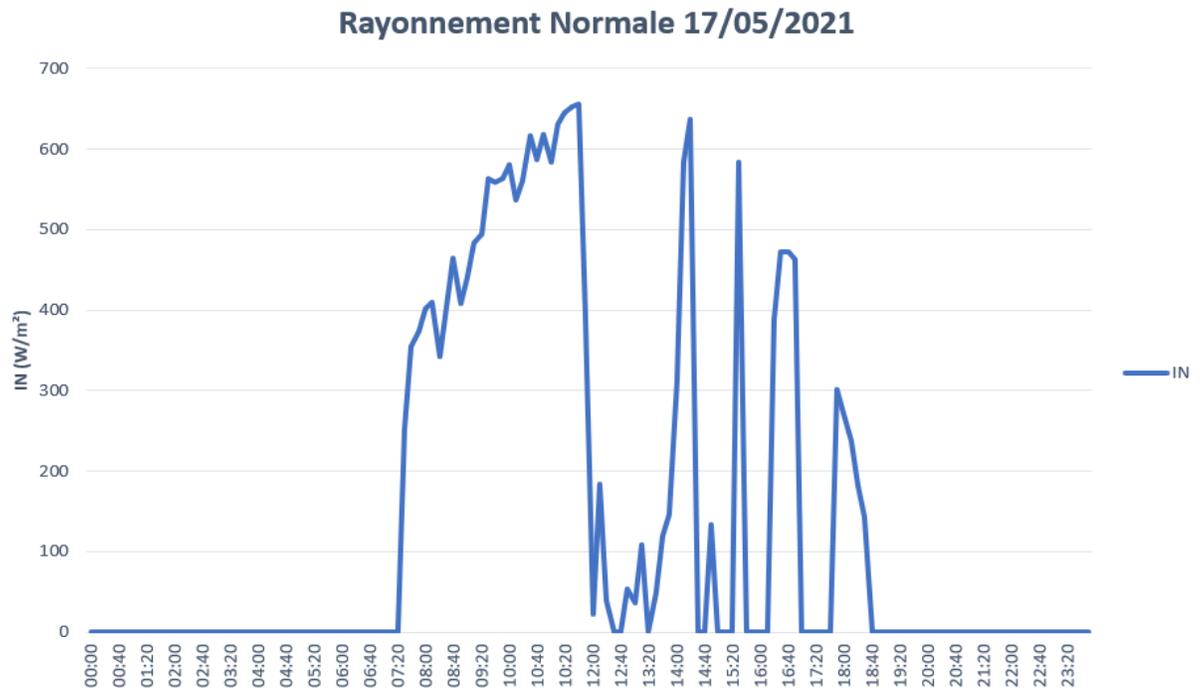


Figure III.20 : Evolution des valeurs du rayonnement solaire pour la journée du test du 17 Mai.

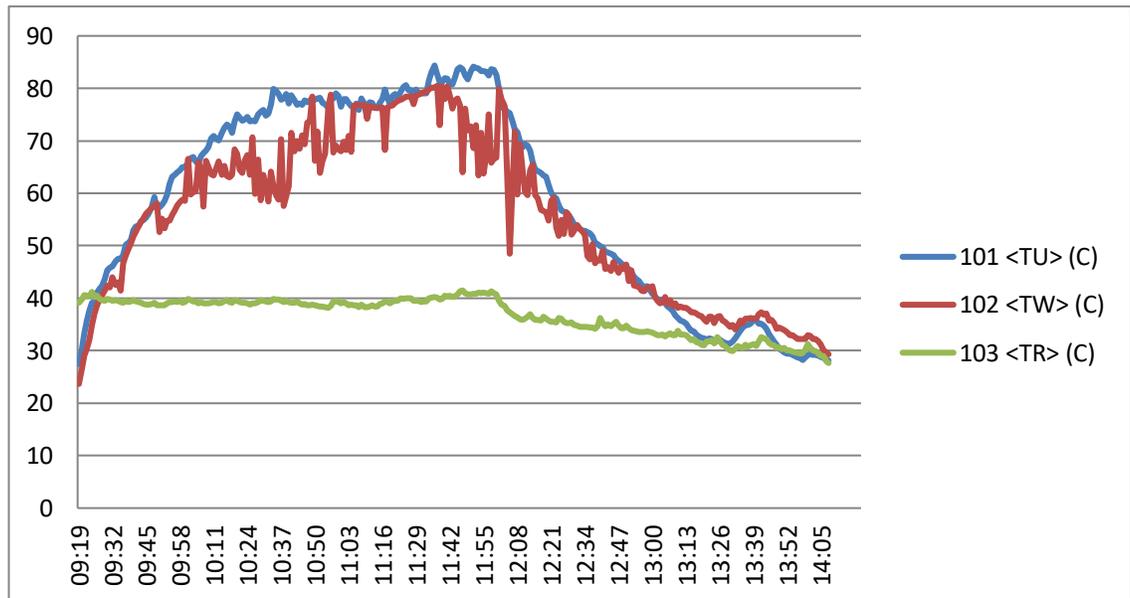


Figure III.21 : Evolution de la température de l'eau au niveau de l'ustensile de cuisson pour le test de refroidissement de 1 litre et demi d'eau de la journée du 20 Mai 2021.

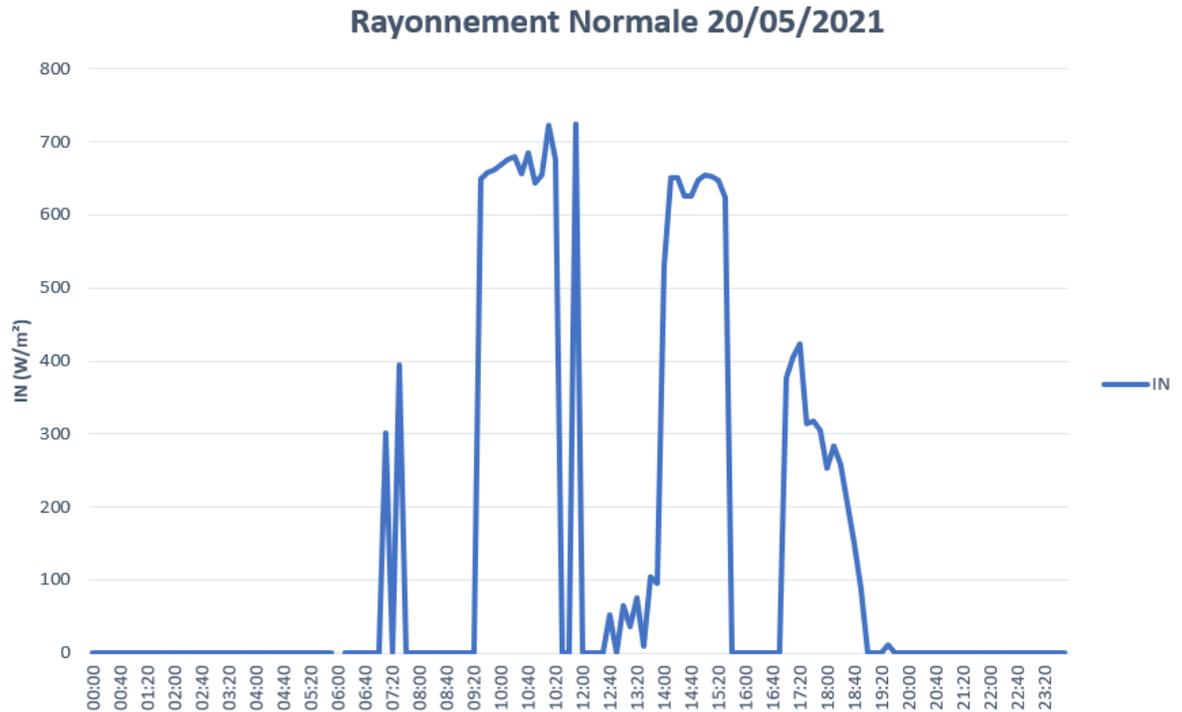


Figure III.22 : Evolution des valeurs du rayonnement solaire pour la journée du test du 20 Mai.

#### III.4.4. La puissance de cuisson du cuiseur parabolique

Les tests concernant le cuiseur parabolique utilisé pour cuisson, comme application ; sont effectués pour illustrer deux types de performances : la puissance de cuisson en fonction de la différence de température pour 1.5 et 2 kg de charge d'eau et le rendement instantané en fonction de  $\Delta T / I_n$ . Les paramètres de performance associés à la méthode de Funk sont évalués graphiquement.

Afin d'évaluer les paramètres de performance thermiques associés, une courbe entre la puissance de cuisson  $P$  et la différence de température ( $\Delta T = T_w - T_a$ ) a été tracée sur la figure (III.23). La pente de la ligne donne la valeur du coefficient global de perte de chaleur,  $U_L$ , tandis que le gradient de la ligne représente la puissance de cuisson du cuiseur parabolique.

On constate que la valeur du coefficient global de perte de chaleur,  $U_L$ , de l'ustensile du concentrateur parabolique varie entre 12.25 et 12.64  $W/m^2\text{°C}$  pour la charge de 1.5 et 2 kg,

respectivement. On a également observé que le coefficient global de perte de chaleur,  $UL$ , augmente progressivement avec la charge.

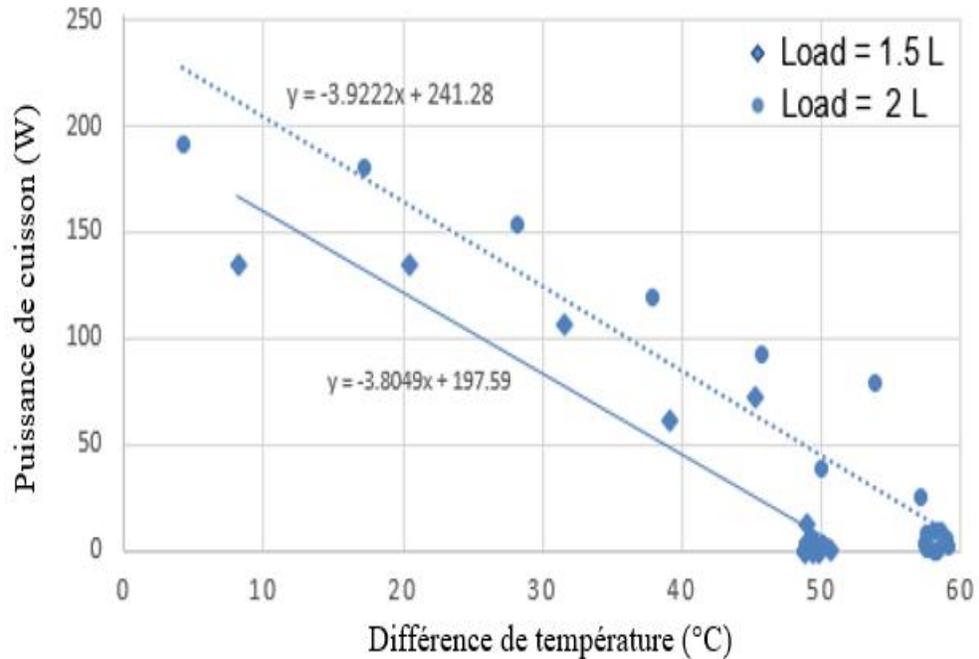


Figure III.23 : Effet de la température sur la puissance de cuisson du cuiseur solaire parabolique sous des conditions de test de chauffage suivant la méthode suggéré par Funk.

### III.4.5. Le rendement instantané du cuiseur parabolique

La figure (III.24) illustre des droites du rendement instantané du cuiseur solaire parabolique en fonction de  $(\Delta T / I_n)$ , au cours des deux tests.

L'équation de la courbe pour 1.5 kg de charge est :

$$P_s = 57.4 - 798.7 \Delta T / I_n \quad (\text{III.3})$$

L'équation de la courbe pour 2 kg de charge est :

$$P_s = 48.2 - 691.8 \Delta T / I_n \quad (\text{III.4})$$

Le rendement maximale, qui se séduit à l'intersection de l'axe des y, est de 57% (1.5 kg) et 49% (2 kg), ce qui signifie une efficacité initiale élevée.

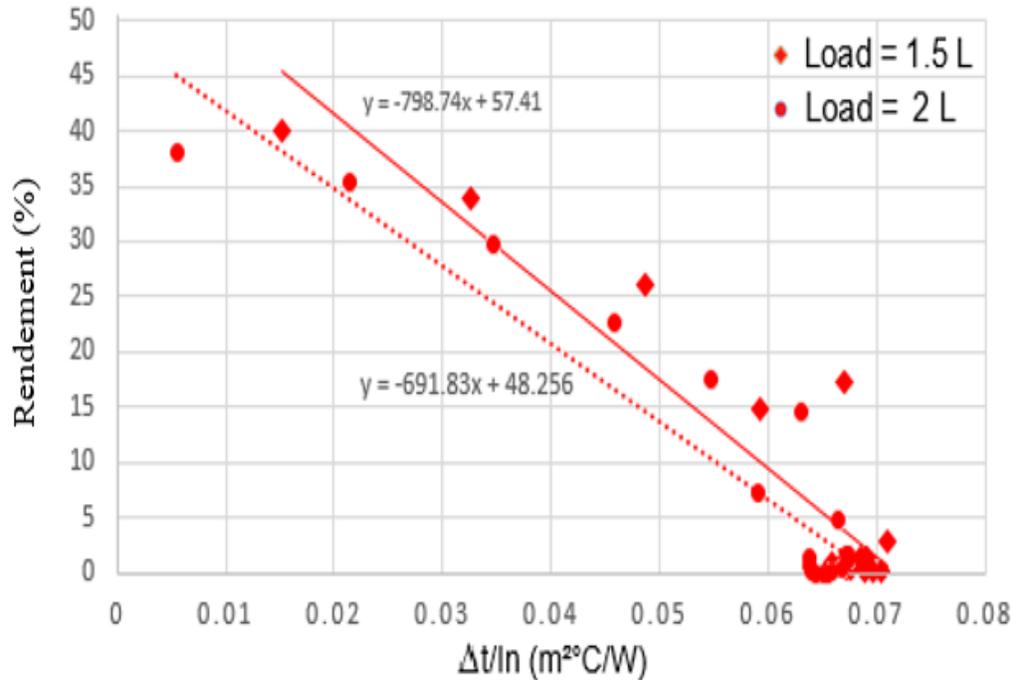


Figure III.24 : Rendement instantané en fonction de ( $\Delta T/In$ ) pour les deux tests effectués sur le cuiseur solaire parabolique.

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une évaluation des performances du cuiseur parabolique réalisé suivant les Normes Internationaux est présentée. Des séries de tests du cuiseur parabolique sont effectuées afin de démontrer l'efficacité du cuiseur parabolique à accomplir la tâche de cuisson par rapport aux cuiseurs boites. Les résultats des tests effectués sur le cuiseur solaire parabolique correspondant sont illustrés et discutés. A partir des résultats des tests, il est démontré que le temps pour atteindre la stagnation est plus court dans les cuiseurs parabolique, ceci à un bénéfice sur les temps de cuisson qui sont réduits. La cuisson solaire reste une réalité, qui permet un mode de cuisson sain aux aliments avec des économies d'énergie et un respect à l'environnement ; dont il faut extraire les moindres avantages et essayer d'apporter de probables améliorations dans l'avenir.

---

# Conclusion Générale

## CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans notre présent mémoire est l'étude d'un cuiseur solaire parabolique dont le fonctionnement consiste à réfléchir le rayonnement solaire vers le foyer. A la fin de ce stage, nous pouvons dire que ce dernier a été très bénéfique pour nous, aussi bien du côté théorique que du point de vue pratique.

A l'aide du logiciel Matlab nous avons simulé les paramètres géométriques et atmosphériques tels l'angle horaire, la déclinaison solaire, la hauteur du soleil, l'azimut solaire, la masse atmosphérique, l'épaisseur atmosphérique ensuite une modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal est réalisé en prenant en compte l'éclairement hors atmosphère, l'éclairement direct et diffus et enfin l'éclairement global. Une comparaison entre les valeurs du rayonnement solaire pour différentes régions de l'Algérie est enfin réalisée avec une validation des résultats par des données expérimentales.

Ensuite, une évaluation des performances du cuiseur solaire parabolique est effectuée. Les températures mesurées au niveau du cuiseur à travers l'unité d'acquisition de donnée AGILENT 34972A; à savoir : température de l'eau à l'intérieur de l'ustensile, température du réflecteur et la température du récepteur seront visualisées numériquement et graphiquement sur l'écran d'un micro-ordinateur. Par ailleurs, des tests sont réalisés durant plusieurs jours avec différentes conditions climatiques. Les paramètres caractérisant le cuiseur seront bien déterminés selon les conditions climatiques locales de la région, le rendement énergétique cuiseur est également calculé.

Les tests expérimentaux sont réalisés dans le but démontrer l'efficacité du cuiseur parabolique à accomplir la tâche de cuisson. A partir des résultats des tests, il est démontré que le temps pour atteindre la stagnation est plus court dans les cuiseurs parabolique, ceci à un bénéfice sur les temps de cuisson qui sont réduits.

Il est temps pour notre pays de songer à s'investir très sérieusement dans les énergies renouvelables tant que les moyens financiers existent encore, un retard en plus risque de nous d'être fatal. Et comme perspectives, il serait intéressant d'ajouter un système de poursuite solaire automatique afin de suivre la course du soleil.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] YETTOU. F. ‘Conception et réalisation d’un système de cuisson solaire destiné au site saharien (Ghardaïa, Algérie)’, Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté de Technologie Département d’Electrotechnique, Université Hadj Lakhdar Batna, 2015.
- [2] CHIKH Mohammed EL-amine et BENRAMDANE Ahmed Yasser, Analyse des Profils Thermiques de Deux Cuiseurs Solaires Expérimentés Sous Climat Aride du Sud Algérien (Etude expérimentale-Centre de recherché GHARDAIA), Mémoire de MASTER 2018/2019, Université de Tlemcen.
- [3] Amelin, D., & Souriau, C. (2014). Fabrication de cuiseurs et de séchoirs solaires. CTA.
- [4] Site internet : <http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php> title Four\_et\_cuiseur\_solaire .
- [5] Site internet : [https://fr.wikipedia.org/wiki/C3\\_89nergie\\_solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/C3_89nergie_solaire).
- [6] Site internet : <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-solaire-6679/>.
- [7] Site internet : <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-thermique>.
- [8] Site internet : <https://www.connaissancedesenergies.org/>.
- [9] DJEBARA Amel et GUETTAF Zineb Etude Comparative Entre Deux Cuiseurs Solaires Testés Sous Conditions Climatiques De Ghardaïa, Mémoire de MASTER 2018/2019, Université de Batna 2.
- [10] Site internet : <https://www.algerie-eco.com/2018/04/04/energie-solaire-lalgerie-enfin-determinee-a-exploiter-son-enorme-potentiel/>.
- [11] Alain FERRIERE et Gilles FLAMANT IMP-CNRS, Centre du Four Solaire, BP5, 66125 Font- Romeu, Captation, transformation et conversion de l’énergie solaire par les technologies.
- [12] Site internet : [www.atlascuisinesolaire.com](http://www.atlascuisinesolaire.com).

- [13] Pierre Garcia, Outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur, thèse de doctorat, université de Perpignan, France, (2007).
- [14] P. Bessemoulin, J.Oliviéri, Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, France:Document Meteo-France (Service central d'exploitation de la meteorology and Centre radiométrique de Carpentras), 2000.
- [15] BOUDEN Abdelmalek, 'Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque', Thèse doctorat Université Mentouri Constantine, 2008.
- [16] Mesri Mokhtaria, Cheknane Ali, Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications.
- [17] YETTOU Fatiha, 'Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude', Mémoire de magister, Département d'électronique électricité solaire, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER, 2009.
- [18] Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie.
- [19] J. Hofierka and M. Sári, 'The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications', Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy, 11- 13 September 2002.
- [20] GAMA AMOR et al. , ' Détermination des performances d'un cuiseur solaire boîte suivant les procédures de mullick et funk', Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg. Vol. 62, 2, pp. 159–164, Bucarest, 2017.
- [21] «34972A LXI Data Acquisition,» keysight, 2000-2014. [En ligne]. Available: <http://www.keysight.com/ja/pd-1756491-pn-34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switchunit?& cc=DZ&lc=eng>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [22] F. Yettou, B. Azoui and A. Malek, Determination of adjustment tracking time in two types of solar cookers by ray-tracing method, Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG),2013.DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635716, 2013, Page(s): 822-827.

[23] A. Dizier, F. Pignon, «Manuel de cuisson solaire,» Edition commune SCI / iD COOK, Paris, France, 2005.

[24] Dr Alan Bigalow, Martha Port, Jennifer Gasseret, «Bases de cuisson solaire».