



*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 : BOUMEGOUAS Seif el islam et SAHRAOUI Chahrazed  
zhor**

## **Thème**

**Investigation expérimentale pour la réalisation  
d'un cuiseur solaire à réflecteur composé (CPC)  
avec tube sous vide**

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

**Devant le jury :**

<b>BOUAROUR Kamel</b>	MAA	Université Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>KHATARA Abdelhadi</b>	MAB	Université Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>GAMA Amor</b>	MRA	URAER. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
<b>YETTOU Fatiha</b>	MRA	URAER. Ghardaïa	<b>Co-encadreur</b>

# REMERCIEMENTS

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

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

Merci pour votre contribution que nous a permis d'accomplir ce mémoire.

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

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

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

# Dédicace

Ce travail modeste est dédié :

A mes parents Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de nos études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer nos respects, nos considérations et nos profonds sentiments envers eux.

Nous prions Allah de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de nous.

Et à tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science.

Et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

Boumegouas Seif El Islam

# Dédicace

Je dédie ce travail à ma chère mère Hakkoum Noura  
Qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études  
Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde  
reconnaissance.

Al'ame de mon père Sahraoui Sahraoui.

A mes frères ( Mohamed, Islam, Taha ).

A ma grande mère et ma tante Aicha elles m'ont  
chaleureusement supporté et encouragé toujours.

A mon Seif islam Boumegouas pour tous leur efforts et  
patience pour ma réussite et mon excellence dans mes  
études.

Aussi à ma chère amie lemdak kaima qui m'a aidé et  
supporté dans les moments difficiles.

Sahraoui ChahraZed  
Zhour

## ملخص

يتطلب التحويل المباشر للطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية أجهزة بسيطة وفعالة لتحويل الطاقة المشعة إلى حرارة قابلة للاستخدام لأغراض التدفئة أو الطبخ أو التجفيف، إلخ. ومع زيادة عدد سكان العالم، أصبحت هذه التطبيقات أكثر جاذبية خاصة وأن الطلب على الطاقة يزداد بصورة مذهلة وبالمقابل استنفاد الموارد الأحفورية. يعد الطهي بالطاقة الشمسية أحد أهم تطبيقات الطاقة الشمسية في تلبية احتياجات الطبخ لدى المستخدمين. في الجزائر، يؤدي استغلال الأخشاب لأغراض الطهي إلى استنزاف موارد الغابات وبالتالي تعطيل النظام البيئي، ومن ناحية أخرى يؤدي استخدام الطاقة التقليدية (الغاز الطبيعي) إلى مشاكل بيئية خطيرة. كجزء من هذا المشروع، اقترحنا تطوير نظام طهي جديد يتكون من أنبوبين مفرغين ومرآيا عاكسة من نوع فرينل. يتم بداية انجاز التصميم النظري للنموذج، متبوعاً بالحاكاة البصرية، في النهاية يتم صنع المطبخ الشمسي تطبيقاً ثم يتم إجراء الاختبارات على النظام في ظل ظروف مناخية مختلفة في جنوب الجزائر للتحقق من الأداء الجيد للطبخ وإمكانية طهي العديد من العناصر باستخدام هذا النموذج الجديد للطبخ.

**كلمات مفتاحية :** إشعاع شمسي ، طبخ شمسي ، مجمّع أنبوب مفرغ ، عاكسات فرينل ، اختبارات تجريبية.

## RÉSUMÉ

La conversion directe de l'énergie solaire en énergie thermique nécessite des dispositifs de conversion simples et efficace de l'énergie rayonnée en chaleur exploitable à des fins de chauffages, cuisson ou séchage etc... Et avec l'augmentation de la population mondiale, ces applications devient de plus en plus répondees notamment que la demande énergétique augmente d'une manière exponentielle et les ressources fossiles s'épuisent autant. La cuisson solaire est l'une des applications la plus importante de l'énergie solaire qui permet de répondre au besoin de cuisson des utilisateurs. En Algérie, l'exploitation du bois pour la cuisson entraîne l'épuisement des richesses forestières et donc la perturbation de l'écosystème, d'autre part l'utilisation de l'énergie traditionnelle (gaz naturel) mène à des problèmes environnementaux sérieux. Dans le cadre de ce projet, on s'est proposé de faire la réalisation d'un nouveau système de cuisson composé de deux tubes sous vides et des miroirs réflecteurs de type Fresnel. Une conception mécanique du système est envisagée, suivi d'une simulation optique et en fin de la réalisation expérimentale. Des tests seront entrepris sur l'ensemble sous différentes conditions climatique du Sud de L'Algérie pour vérifier aussi bien le bon fonctionnement du système et la faisabilité de la cuisson avec ce nouveau design de cuiseur.

**Mots clés :** Rayonnement solaire, cuiseur solaire, capteur tube sous vide, réflecteurs de Fresnel, tests expérimentaux.

## ABSTRACT

The direct conversion of solar energy into thermal energy requires simple and efficient devices for converting the radiated energy into usable heat for heating, cooking or drying purposes, etc. With the increase of the world population, these applications is becoming more and more attractive especially that the energy demand increases exponentially and fossil resources are depleted according to that. Solar cooking is one of the most important applications of solar energy in meeting users' cooking needs. In Algeria, the exploitation of wood for cooking leads to the depletion of forest resources and therefore the disruption of the ecosystem, on the other hand the use of traditional energy (natural gas) leads to serious environmental problems. As part of this project, we proposed to build a new cooking system consisting of two evacuated tubes and Fresnel-type reflecting mirrors. A conceptional design of the system is considered, followed by an optical simulation, at the end the experimental realization of the design. Tests will be undertaken on the system under different climatic conditions in Southern Algeria to verify the well-functioning of the cooker and the feasibility of cooking several items with this new cooker design.

**Keywords:** Solar radiation, solar cooker, evacuated tube collector, Fresnel reflectors, experimental tests.

---

---

## Chapitre I

Fig I.1 : Modélisation de l'inégale répartition de l'énergie solaire dans le monde.....	09
Fig I.2 : Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011).....	10
Fig I.3 : Domaine des ondes électromagnétiques selon leur longueur d'onde dans le vide....	11
Fig I.4 : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.....	11
Fig I.5 : Deux prototypes de cuiseurs solaires réalisés et testés à l'URAER Ghardaïa.....	14
Fig I.6 : Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs.....	15
Fig I.7 : Le cuiseur a panneaux type boîte.....	16
Fig I.8 : Le cuiseur boîte réflecteur mémoire.....	17
Fig I.9 : Le cuiseur parabolique.....	18
Fig. I.10 : (a) Cuiseur cylindro-parabolique étudié par Richard Petela,(b) schéma du cuiseur cylindro-parabolique testé par Ozturk.....	18
Fig. I.11 : (a) Cuiseur parabolique avec des miroirs de Fresnel réalisé par Sonune et Philip, (b) cuiseur parabolique composé et réalisé par Franco et al.....	19
Fig. I.12 : (a) Cuiseur parapluie réalisé par José M. Arenas, (b) cuiseur parabolique réalisé par Grupp et al.....	19
Fig. I.13 : (a) Cuiseur cylindro-parabolique; (b) système de poursuite solaire, réalisés par Al- Soud et al.....	20
Fig. I.14 : (a) Cuiseur parabolique; (b) système de poursuite solaire (b), réalisés par Abu- Malouh et al.....	20
Fig. I.15 : (a) Schéma du cuiseur solaire indirect contenant des réfrigérants étudié par Esen, (b) unité de stockage de chaleur latente avec PCM réalisé par Sharma et al.....	21

## Chapitre II

Fig.II.1 : Illustration de vecteur des latitude-longitude-coordonnées.....	23
Fig.II.2 : Les coordonnés horaire.....	24
Fig.II.3 : Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.....	25
Fig.II.4 : Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.....	26
Fig. II. 5 : Variation de masse d'air en fonction de hauteur soleil.....	27
Fig. II. 6 : Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air...	28
Fig.II.7 : Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.....	29
Fig.II.8 : Éclairement solaire hors atmosphère.....	30
Fig.II.9 : Variation de l'éclairement solaire extraterrestre en fonction du jour.....	31
Fig.II.11 : Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de linke et du temps pour le jour le plus court et le plus long de l'année.....	33
Fig.II.10 : Variation de l'énergie reçue (en Wh/m <sup>2</sup> ) par un concentrateur solaire en fonction du jour.....	33
Fig I.12: Fig.II.11 : Variations des valeurs du rayonnement solaire en fonction de temps au solstice d'été (21 Juin): <b>(a)</b> site de Tamanrasset; <b>(b)</b> site de Ghardaïa.....	34
Fig I.11: Fig.II.12 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.....	35
Fig I.12: Fig.II.13 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.....	35

## Chapitre III

Fig.III.1 : La situation géographique de la willaya de Ghardaïa.....	38
Fig.III.2 : Réflecteur composé CPC avec un tube sous vide.....	40
Fig.III.3 : La configurations de la source lumineuse et le choix des options du mapping de l'éclairement concentré.....	41
Fig.III.4 : Insertions des réflecteurs pour la simulation optique.....	42
Fig.III.5 : La simulation du comportement optique des rayons solaires reçus par les miroirs et réfléchis au niveau du tube sous-vide.....	42
Fig.III.6 : Résultats de la simulation optique du cuiseur solaire avec son tube sous vide par logiciel TracPro.....	43
Fig.III.7 : Réflecteur composé de deux tubes sous-vides et des miroirs réfléchissants.....	44
Fig.III.8 : Dimensionnement de support réalisé.....	45
Fig.III.9 : Vue des deux tubes sous vides utilisés pour notre cuiseur.....	46
Fig.III.10 : Concentrateur de Fresnel avec huit miroirs.....	46
Fig.III.11 : Les angles des réflecteurs par rapport aux tubes sous vides.....	47
Fig.III.12 : Les thermocouples de type K utilisé à L'URAER-CDER.....	48
Fig.III.13 : Installation des thermocouples et d'un thermomètre.....	49
Fig.III.14 : Réflecteur Fresnel du nouveau cuiseur solaire.....	50
Fig.III.15 : Evolution de la température de l'eau dans les deux tubes séparément.....	51
Fig.III.16 : Evolution des valeurs du rayonnement solaire direct, direct normal et global de la journée du 08 Juin 2021.....	51
Fig.III.19 : Illustration de différence entre la couleur de l'huile avant le début du test (à gauche) et après la fin du test (à droite).....	54
Fig.III.20 : Relevé des températures, en fonction du temps ; du fluide caloporteur situé à l'intérieur des tubes sous vide et posé à l'abri de l'éclairement.....	55
Fig.III.21 : Evolution de la température de l'huile mesurée au cours du 2 <sup>ième</sup> test.....	56
Fig.III.22 : Mesure des températures du fluide caloporteur situé à l'intérieur d'un tube sous vide à l'aide d'une caméra thermique.....	56



NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
t	Temps	Heure
N	Numéro du jour	[-]
Np	Angle journalier	rad
$\varphi$	Latitude du lieu	rad
$\lambda$	Longitude du lieu	rad
z	Altitude du lieu	m
$\omega$	Angle horaire	rad
$\delta$	Déclinaison solaire	rad
ys	Hauteur du soleil	rad
$\theta_z$	Angle zénithal	rad
$\theta_{az}$	Azimut du soleil	rad
$\theta_i$	Angle d'incidence des rayons solaires	rad
$\theta_{vp}$	Angle entre la surface verticale contenant la normal sur le plan et la verticale passant par le centre du disque	rad
$\gamma_p$	Inclinaison du plan	rad
$\theta_p$	Orientation du plan	rad
TL	Facteur de trouble de Linke	[-]
TLc	Facteur de trouble de Linke corrigé par pression atmosphérique	[-]
BA	Coefficient d'Angstrom	[-]
Wv	Hauteur d'eau condensable	cm
mA	Masse d'air optique	[-]
$\delta_R$	Épaisseur totale optique de Rayleigh	[-]
p	Pression atmosphérique	Pa
P0	Pression atmosphérique au niveau de la mer	Pa
$\varepsilon$	Facteur d'excentricité	[-]
I0	Constante solaire	W/m <sup>2</sup>
G0	Eclairement extraterrestre	W/m <sup>2</sup>
IBh (ys,TL)	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
IDh (ys,TL)	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
IGh (ys,TL)	Eclairement global incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
IN (ys,TL)	Eclairement direct normal	W/m <sup>2</sup>
IBi (ys,TL)	Eclairement direct incident sur un plan quelconque	W/m <sup>2</sup>
IDi (ys,TL)	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque	W/m <sup>2</sup>
IGi (ys,TL)	Eclairement global incident sur un plan quelconque	W/m <sup>2</sup>
Trb (ys,TL)	Transmittance de l'éclairement direct	[-]
Trd (TL)	Transmittance de l'éclairement diffus	[-]

## 3TABLE DES MATIERES

<b>RESUME</b>		
<b>LISTE DES FIGURES</b>		
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>		
<b>NOMENCLATURE</b>		
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>		<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES ET ETAT DE L'ART DES SYSTEMES DE CUISSON SOLAIRE</b>		
<b>I.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>I.2.</b>	<b>Les Energies renouvelables</b>	<b>3</b>
I.2.1.	Définition des énergies renouvelables	3
I.2.2.	Importance des énergies renouvelable	3
I.2.2.1.	Changement climatique	3
I.2.2.2.	Augmentation de la demande d'énergie	4
I.2.3.	Classement des énergies renouvelables	4
I.2.3.1.	Énergie solaire	4
I.2.3.2.	Énergie éolienne	5
I.2.3.3.	Énergie hydraulique	5
I.2.3.4.	Biomasse	5
I.2.3.5.	Géothermie	5
I.2.4.	Avantages et inconvénients des énergies renouvelables	6
I.2.4.1.	Les énergies renouvelables et les émissions de CO <sub>2</sub>	6
I.2.4.2.	Stockage et efficacité énergétique des énergies renouvelables	6
<b>I.3.</b>	<b>Energie solaire</b>	<b>7</b>
I.3.1.	Le solaire	7
I.3.2.	Energie solaire	7
I.3.3.	Les applications de l'énergie solaire	7
I.3.3.1.	Le solaire passif	7

I.3.3.2.	Le solaire actif	8
I.3.4.	Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire	8
I.3.4.1.	Les avantages qui caractérisent l'énergie solaire	9
I.3.4.2.	Les inconvénients de l'énergie solaire	9
I.3.5.	Energie solaire dans le monde	9
I.3.6.	Energie solaire en l'Algérie	10
I.3.7.	Le rayonnement solaire	10
I.3.7.1.	Classification des rayonnements électromagnétiques	10
I.3.7.2.	Rayonnement solaire	11
I.3.8.	Les différents types de rayonnement	12
I.3.8.1.	Le rayonnement direct	12
I.3.8.2.	Le rayonnement diffus	12
I.3.8.3.	Le rayonnement global	12
<b>I.4.</b>	<b>Les cuiseurs solaires</b>	<b>12</b>
I.4.1.	Histoire des cuiseurs solaires	12
I.4.2.	Principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire	14
I.4.3.	Les températures et temps de cuisson	15
I.4.4.	Les modèles de base des cuiseurs solaires	16
I.4.4.1.	Le cuiseur à panneaux	16
I.4.4.2.	Le cuiseur boîte	16
I.4.4.3.	Le cuiseur parabolique	17
I.4.5.	Développement des cuiseurs solaires à travers le monde	18
I.4.5.1.	Cuiseurs à concentration de type cylindro-parabolique	18
I.4.5.2.	Cuiseurs à concentration de type parabolique	18
I.4.5.3.	Cuiseurs suiveurs du soleil	20
I.4.5.4.	Cuiseurs solaires indirects	20
I.4.6.	Les avantages et les inconvénients des cuiseurs solaires	21
I.4.6.1.	Les avantages des cuiseurs solaires	21
I.4.6.2.	Les inconvénients des cuiseurs solaires	21
<b>I.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>22</b>

<b>CHAPITRE II : MODELISATION DE L'ECLAIREMENT REÇU ET VALIDATION DES RESULTATS OBTENUS</b>		
<b>II.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>23</b>
<b>II.2.</b>	<b>Modélisation mathématique de l'éclairement solaire</b>	<b>23</b>
II.2.1.	Paramètres géométriques et atmosphériques	<b>23</b>
II.2.1.1.	Les coordonnées géographiques terrestres	<b>23</b>
II.2.1.2.	L'angle horaire ( $\omega$ )	<b>23</b>
II.2.1.3.	La déclinaison du soleil ( $\delta$ )	<b>24</b>
II.2.1.4.	La hauteur du soleil ( $\gamma_s$ )	<b>25</b>
II.2.1.5.	L'azimut du soleil ( $\chi$ )	<b>26</b>
II.2.1.6.	Masse atmosphérique	<b>26</b>
II.2.1.7.	Epaisseur optique de l'atmosphère	<b>27</b>
II.2.1.8.	Facteur de trouble de Linke	<b>28</b>
II.2.1.9.	Angle d'incidence	<b>29</b>
<b>II.3.</b>	<b>Rayonnement solaire incident sur un plan</b>	<b>29</b>
II.3.1.	Eclairement hors atmosphère	<b>29</b>
II.3.2.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	<b>31</b>
II.3.3.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	<b>31</b>
II.3.4.	Eclairement reçu sur une surface avec poursuite solaire	<b>32</b>
II.3.4.1.	Suivi continu du soleil	<b>32</b>
II.3.4.2.	Modélisation de l'énergie solaire reçue	<b>33</b>
<b>II.4.</b>	<b>Validation des résultats obtenus</b>	<b>34</b>
II.4.1.	Comparaison entre valeurs du rayonnement solaire pour deux régions de l'Algérie	<b>34</b>
II.4.2.	Validation et discussion des résultats	<b>35</b>
<b>II.5.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>36</b>

	<b>CHAPITRE 3 : ETUDE THEORIQUE, REALISATION EXPERIMENTALE DU SYSTEME DE CUISSON ET RESULTATS ET DISCUSSION</b>	
<b>III.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>37</b>
<b>III.2.</b>	<b>Présentation du lieu de stage</b>	<b>37</b>
III.2.1.	Site de Ghardaïa	37
III.2.2.	Aperçu sur l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER)	38
III.2.3.	Equipe Mini Centrales Thermodynamiques	39
<b>III.3.</b>	<b>Conception mécanique et simulation optique du cuiseur</b>	<b>39</b>
III.3.1.	Conception mécanique par Solid Works	40
III.3.2.	Simulation optique avec le logiciel TracePro	40
<b>III.4.</b>	<b>Réalisation expérimentale du cuiseur solaire</b>	<b>43</b>
III.4.1.	. Description du prototype	43
III.4.1.1.	Le support	43
III.4.1.2.	Les tubes sous-vides	44
III.4.1.3.	Les réflecteurs (miroirs)	45
III.4.2.	Implémentation des thermocouples	48
<b>III.5.</b>	<b>Les tests effectués, résultats obtenus et discussion</b>	<b>49</b>
III.5.1.	Evaluation de la température au niveau du foyer	49
III.5.1.1.	Test N° 1 - Utilisation de l'eau comme fluide caloporteur	50
III.5.1.2.	Test N°2 –Utilisation d'une huile synthétique comme fluide caloporteur	52

<b>III.5.1.3</b>	<b>Test N°3 – Refroidissement des tubes sous vides</b>	<b>54</b>
<b>III.5.2.</b>	<b>Evaluation de la température à l'aide d'une caméra thermique</b>	<b>55</b>
<b>III.6.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>55</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>		<b>57</b>

---

# Introduction Générale

### INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre de développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis-à-vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire [1].

Les principales sources d'énergie renouvelable sont le soleil, le vent, la biomasse, les marées, Les vagues marines et océaniques et la chaleur des profondeurs de la terre. L'énergie solaire est en tête de la liste des sources en raison de son abondance, mais aussi en raison de sa distribution dans la nature, plus que tout autre type d'énergie renouvelable. Vu qu'on a une forte consommation mondiale d'énergie, D'où la nécessité de trouver de nouvelles sources d'énergie [2].

Les applications solaires sont très diverses et on peut citer à titre d'exemples : la production d'électricité, le séchage solaire, la cuisson solaire, le chauffage solaire et la réfrigération domestique et industrielle et la liste n'est pas exhaustive [3].

Dans les régions isolées du Sahara où l'approvisionnement en gaz butane est très difficile, l'homme est contraint de compter sur l'exploitation du bois des quelques arbustes restants tels que les acacias et les palmiers pour cuire sa nourriture et ça entraîne l'épuisement des richesses forestières et donc la perturbation de l'écosystème.

L'utilisation de la cuisson solaire apparaît comme une alternative intéressante pour répondre à ce besoin vital sans compromettre la biodiversité végétale saharienne et en limitant les émissions de gaz à effet de serre. Le cuiseur solaire est une technologie qui permet de fournir de la chaleur de manière naturelle et renouvelable, pour la cuisson, il utilise souvent la technique de la concentration des rayons solaires et/ou le phénomène de l'effet de serre [2].

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à une des applications les plus prometteuses de l'énergie solaire ; à savoir la cuisson solaire. En effet, le cuiseur solaire contribue à résoudre deux des problèmes majeurs dans le monde :

L'aggravation du manque d'énergie pour la cuisson et le fléau des maladies liées à l'eau. La moitié de la population mondiale cuisine à l'aide du feu de bois et vit dans des régions favorables à l'exploitation de l'énergie solaire [3].

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et réalisation expérimentale d'un cuiseur solaire à réflecteur composé avec tube sous vide ; au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables, et qui sera testé sous les conditions climatiques de la ville de Ghardaïa, Algérie. Le but principal étant de vérifier la faisabilité d'un tel système pour la cuisson des aliments nécessitant des températures supérieures à 100 °C (comme les fritures, les grillades, les rôtis etc...), ce qui n'est pas possible avec les cuiseurs de types boites.

Notre mémoire se présentera selon le plan suivant :

Premièrement, une introduction définissant le contexte du travail ;

Un premier chapitre dédié à la recherche sur l'état de l'art des systèmes à cuisson solaires, commençant par des généralités sur l'énergie solaire et ces applications et suivi d'un bref historique de l'évolution de cuiseurs solaires à travers le monde.

Un second chapitre concerne principalement le vecteur principal de la conversion solaire-thermique qui est l'éclairement solaire, où nous avons effectué une modélisation de l'éclairement solaire incident sur le réflecteur de notre cuiseur pour différentes inclinaison et orientations. Les résultats de l'étude théorique (modélisation par Matlab) est validé par les données expérimentales existant au niveau de l'URAER-CDER, Ghardaïa.

Un dernier chapitre est consacré pour la partie réalisation de notre cuiseur, passant par une conception mécanique du design et une simulation optique du comportement de ce dernier. Les différentes étapes de réalisation sont bien présentées dans ce chapitre ainsi que les tests entrepris et leur discussion entrepris.

Finalement, une conclusion générale vient clôturer ce travail avec des perspectives envisagées pour la suite de ce travail.

---

## CHAPITRE I

# Généralités sur les énergies renouvelables et état de l'art des systèmes de cuisson solaire

## **I.1. Introduction**

C'est en 1987 qui a été défini le concept du développement durable comme suit :

« Satisfaire les besoins du présent sans hypothéquer la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins ».

Ce concept implique de s'intéresser au développement de nouvelles sources d'énergie et de minimiser les rejets affectant l'environnement [2].

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 [5].

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

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

Les énergies renouvelables (ou EnR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres » [6].

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

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

Cette concentration anormale de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, due aux activités humaines, provoque un réchauffement de la planète. Entre 1880 et 2012, la température

moyenne a déjà augmenté de 0,85° C. Si rien n'est fait pour limiter ces émissions, la température pourrait augmenter de 3,7 à 4,8° C d'ici la fin du 21e siècle.

Si ces chiffres peuvent paraître anecdotiques, les conséquences locales d'un tel réchauffement à l'échelle global sont dramatiques et déjà à l'œuvre : hausse du niveau des mers qui obligerait des centaines millions d'habitants de se déplacer, insécurité alimentaire, événements météorologiques extrêmes (cyclones, canicules, typhons..) de plus en plus fréquents, développement de nouvelles maladies, risques de conflits accrus... Le changement climatique est considéré par beaucoup comme étant un des enjeux les plus importants du 21e siècle [7].

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

Malgré l'essor des énergies renouvelables, les combustibles fossiles garderont une place prépondérante dans le mix énergétique de 2040. Il va donc falloir trouver des solutions pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub> qu'elles vont continuer de générer. Le captage et la réutilisation du CO<sub>2</sub> pourraient permettre de relever ce défi. C'est pourquoi Veolia mène des expérimentations avec Carbon Clean Solutions Limited (CCSL), une start-up anglo-indienne qui a développé une technologie de captage de CO<sub>2</sub> 30 à 40% moins chère que les technologies jusqu'à présent disponibles. L'installation phare de CCSL concerne une centrale à charbon située dans le Tamil Nadu en Inde, qui est devenue la première installation industrielle au monde à réutiliser l'intégralité de ses émissions de CO<sub>2</sub> [8].

Les réserves connues de gaz naturel sont de plus de 60 ans à consommation inchangée et l'on trouve chaque année plus de gaz que nous n'en consommons. Mais si l'on remplaçait le pétrole et le charbon par le gaz pour réduire les émissions à effet de serre, les réserves ne seraient plus que de 17 ans. L'abandon du nucléaire au profit du gaz par certains pays pourrait accélérer la consommation des ressources. Le charbon est le combustible fossile dont les réserves sont les plus importantes. Ces réserves sont estimées à plus de 200 ans [2].

### **I.2.3. Classement des énergies renouvelables**

#### **I.2.3.1. Énergie solaire**

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaire est captée est rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité [6].

### **I.2.3.2. Énergie éolienne**

Dans le cas de l'énergie éolienne, l'énergie cinétique du vent entraîne un générateur qui produit de l'électricité. Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables éoliennes : les éoliennes terrestres, les éoliennes off-shore, les éoliennes flottantes... Mais le principe reste globalement le même pour tous ces types d'énergies renouvelables [6].

### **I.2.3.3. Énergie hydraulique**

L'énergie cinétique de l'eau (fleuves et rivières, barrages, courants marins, marées) actionne des turbines génératrices d'électricité. Les énergies marines font partie des énergies hydrauliques [6].

### **I.2.3.4. Biomasse**

L'énergie est issue de la combustion de matériaux dont l'origine est biologique (ressources naturelles, cultures ou déchets organiques). On en distingue trois catégories principales :

- Le bois
- Le biogaz
- Les biocarburants [6].

### **I.2.3.5. Géothermie**

L'énergie est issue de la chaleur émise par la Terre et stockée dans le sous-sol. Selon la ressource et la technologie mise en œuvre, les calories sont exploitées directement ou converties en électricité [6].

## **I.2.4. Avantages et inconvénients des énergies renouvelables**

### **I.2.4.1. Les énergies renouvelables et les émissions de CO2**

L'exploitation des énergies renouvelables génère théoriquement peu de polluants : notamment, l'électricité d'origine renouvelable émet très peu de CO2 notamment lorsqu'on la compare aux énergies fossiles comme le charbon. Pour cette raison, les EnR sont notamment un vecteur privilégié de la lutte contre le réchauffement climatique. Elles sont aussi considérées comme un facteur de résilience car elles permettent des productions décarbonnées et décentralisées.

Pour mesurer les émissions de CO2 des énergies renouvelables, on utilise l'outil d'ACV (Analyse de Cycle de Vie) qui permet de connaître les émissions de CO2 par kWh d'électricité produite, en intégrant les émissions de CO2 issues de la fabrication des infrastructures, de l'extraction des ressources et de la fin de vie. D'après le rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Étude du Climat), les énergies renouvelables bénéficient d'ACV favorables par rapport à beaucoup d'énergies.[6].

### **I.2.4.2. Stockage et efficacité énergétique des Énergies renouvelables**

En effet, les énergies renouvelables sont parfois critiquées pour leur plus faible efficacité énergétique par rapport aux énergies fossiles. Les coûts de production sont également souvent considérés comme plus élevés à court terme. Mais surtout, elles sont caractérisées par une disponibilité plus aléatoire : par exemple, le solaire et l'éolien ne produisent pas en permanence de l'électricité. On appelle ce phénomène l'intermittence : une éolienne ne produit que par intermittence, quand il y a du vent.

De ce fait, pour être utilisables à grande échelle, les énergies renouvelables intermittentes doivent être accompagnées d'une infrastructure de stockage d'électricité. Autrement dit, il faut être capable de stocker l'énergie que l'on produit en surplus pendant les périodes propices (quand il y a beaucoup de soleil et de vent) afin de la redistribuer pendant les périodes creuses, où la production est basse.

Cela implique donc de construire des batteries ou des systèmes de stockage complexes qui nécessitent de nombreuses ressources naturelles et augmentent la pollution liée aux énergies renouvelables [6].

### **I.3. Energie solaire**

#### **I.3.1. Le solaire**

Le soleil c'est une étoile sphérique qui fournit la plus grande partie de l'énergie que nous utilisons. En effet, à part l'énergie géothermique et l'énergie nucléaire, toutes les énergies viennent du soleil. Cette étoile est particulièrement importante car elle fournit l'essentiel de l'énergie que les planètes du système solaire reçoivent. Néanmoins, elle reste relativement banale comparée à l'ensemble des autres étoiles située à environ 150 millions de kilomètres de la terre. Cette étoile est formée de 99.1% d'hydrogène, 7.8% d'hélium, 0,061% oxygène, 0,03 Carbone, 0,0084% azote, 0,0076% néon, 0,0037% fer, 0,0031% silicium, 0,0024% magnésium, 0,0015% soufre, 0,0015% Tous les autres composants [4].

#### **I.3.2. Energie solaire**

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).

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques [9].

#### **I.3.3. Les applications de l'énergie solaire**

##### **I.3.3.1. Le solaire passif**

L'énergie solaire passive désigne l'ensemble des techniques où la chaleur solaire peut être utilisée sur place, sans être transférée au moyen d'un caloporteur (air ou eau). Elle est directement liée aux techniques de construction qui permettent des économies d'énergie pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage.

Elle concerne la conception de bâtiments et la mise en place de composants de construction permettant d'utiliser le rayonnement solaire, à la fois pour l'éclairage naturel et le chauffage des espaces habitables. En plus de limiter la consommation d'énergie, l'énergie solaire passive peut contribuer au confort ressenti par les résidents.

Les maisons solaires passives, sont d'abord des bâtiments très bien isolés, pour lesquels les pertes de chaleur sont réduites au plus bas niveau possible. Dans les cas les plus poussés, elles n'ont pas besoin d'un système de chauffage. Ces maisons exploitent d'abord les apports solaires mais font aussi appel à des principes comme ceux de l'inertie thermique du bâtiment, l'éclairage naturel, l'ombrage en été, etc [3].

### **I.3.3.2. Le solaire actif**

Le système d'énergie solaire active utilise des capteurs solaires pour capter l'énergie du soleil et produire de l'électricité afin d'alimenter des pompes et des ventilateurs qui distribuent de l'eau et de l'air chaud, telle que les systèmes à chauffe-eau solaires, qui utilisent les capteurs plans vitrés ou non vitrés pour chauffer de l'eau ou le chauffage des locaux et la ventilation solaire qui utilisent aussi des capteurs vitrés ou un bardage perforé pour chauffer l'air. Un autre exemple est celui qui utilise les centrales électriques solaires [3].

### **I.3.4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire**

#### **I.3.4.1. Les avantages qui caractérisent l'énergie solaire**

Bon nombre d'avantages sont liés à l'exploitation de l'énergie solaire. Cette dernière intègre avant tout la grande famille des énergies renouvelables. Elle permet également la production d'électricité, sans conséquence sur l'environnement, et ne nécessite aucune matière première. Ses autres points forts sont :

- Elle peut être mise en place à la campagne comme en ville ;
- Les panneaux solaires peuvent être fixés sur différentes surfaces comme la toiture, les murs, etc. ;
- L'énergie solaire est modulable, car elle permet de répondre à plusieurs besoins (alimentation d'appareillages électroménagers, chaudière, chauffage...);
- Cette source est entièrement gratuite et pratique, permettant la fourniture de courant électrique, même dans des zones isolées ;
- Le prix de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques est assez bas. En plus, ils sont conçus pour être résistants aux aléas climatiques et ne nécessitent que peu d'entretien;
- Elle permet la revente d'une surproduction d'électricité, amortissant ainsi l'investissement initial à long terme [10].

### I.3.4.2. Les inconvénients de l'énergie solaire

L'inconvénient premier de l'énergie solaire concerne essentiellement le coût des installations. Vous devez dépenser plus ou moins 13 000 € pour l'achat d'un panneau solaire photovoltaïque d'une puissance de 3kW. Les autres points faibles sont :

- La variation du rendement des panneaux solaires, car le niveau d'ensoleillement dans chaque région diffère. La puissance réelle obtenue ne correspond pas tout à fait aux chiffres déclarés. Par ailleurs, le rendement affiché par les panneaux baisse au fil des années ;
- Le coût des panneaux solaires est plus élevé en cas d'utilisation d'une batterie pour emmagasiner l'énergie électrique [10].

### I.3.5. Energie solaire dans le monde

Les sources d'énergie renouvelables dans les pays au bord de la méditerranée à elles seules peuvent faire face à la demande énergétique mondiale croissante. En effet, la ressource d'énergie la plus importante dans ces pays est l'irradiation solaire, avec un potentiel qui peut satisfaire la demande en l'électricité du monde entier.

Les technologies solaires utilisant les systèmes à concentration pour la production électrique exigent l'ensoleillement normal direct, qui représente entre 50 % et 90 % de la totalité du rayonnement solaire. Plus abondante dans une zone géographique appelée communément la ceinture solaire indiquée sur la figure (I.1), la ressource en rayonnement solaire direct est considérable à l'échelle planétaire [5].

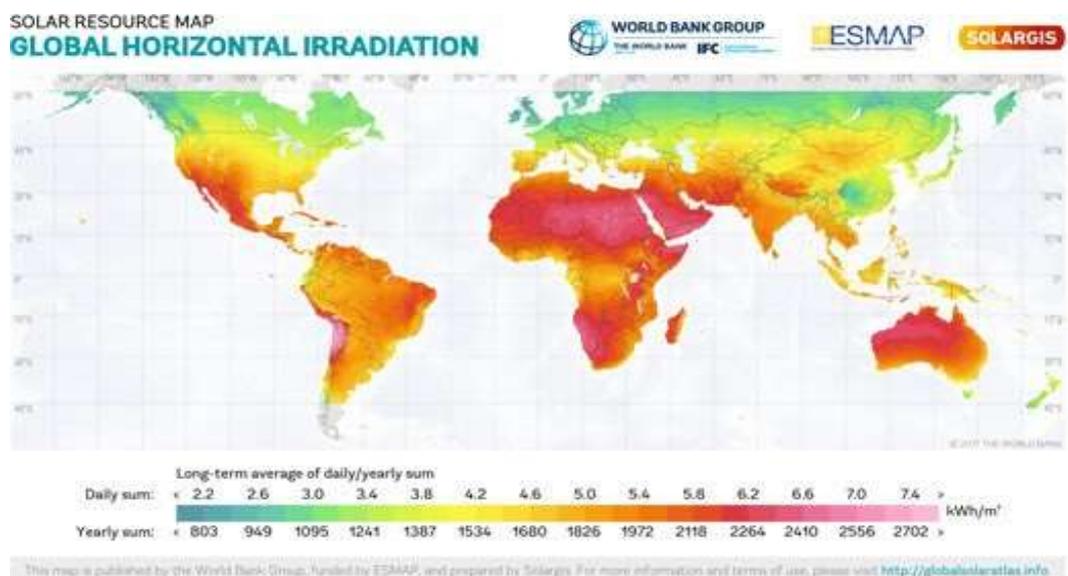
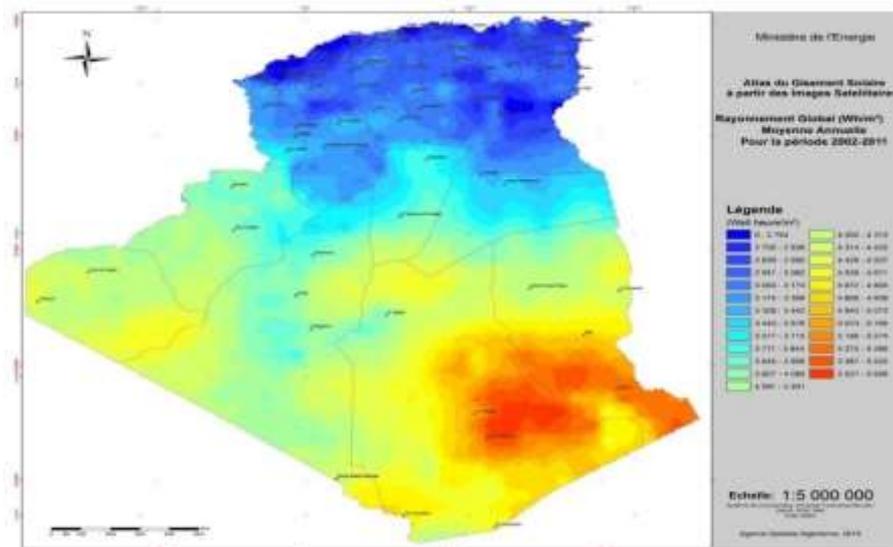


Fig. I.1 : L'inégale répartition de l'énergie solaire dans le monde. [11].

### I.3.6. Energie solaire en l'Algérie

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde est montré sur la figure (I.2). La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  soit près de  $3\text{ KWh/m}^2$  au nord et dépasse  $5,6\text{ KWh/m}$  au Grand Sud [12].



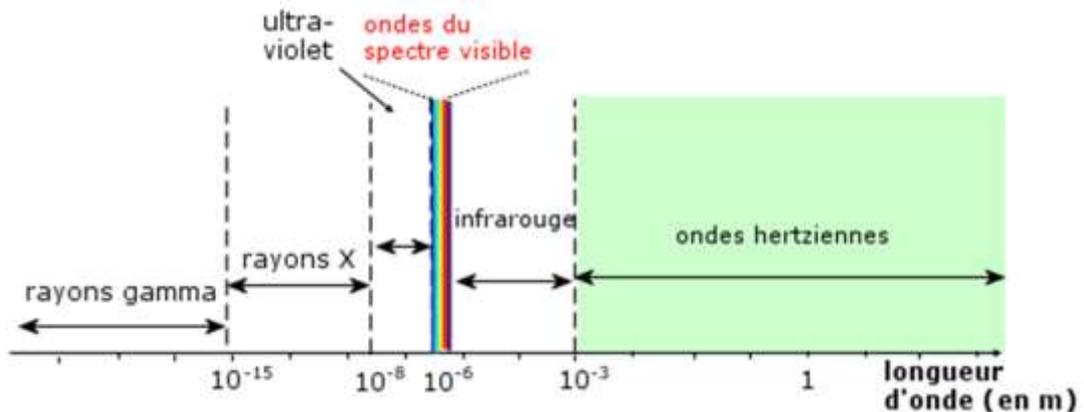


Fig.I.3 : Domaine des ondes électromagnétiques selon leur longueur d'onde dans le vide [14].

### I.3.7.2. Rayonnement solaire

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que  $1354 \text{ w/m}^2$  (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%).

Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus figure (I.4) L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc [15].

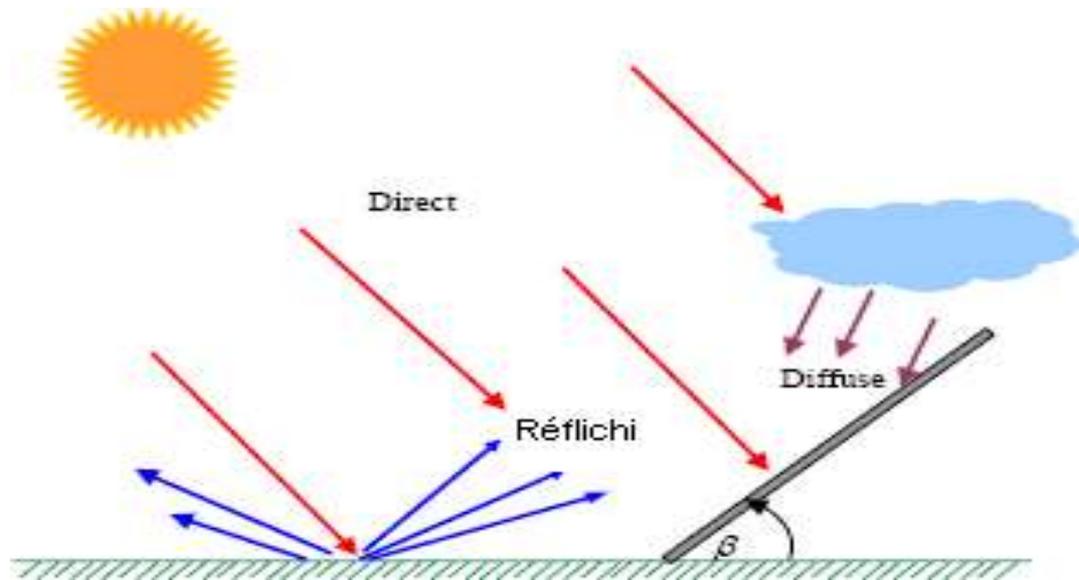


Fig.1.4 : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné [17].

### **I.3.8. Les différents types de rayonnement**

#### **I.3.8.1. Le rayonnement direct**

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair [15].

#### **I.3.8.2. Le rayonnement diffus**

Est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année [15].

#### **I.3.8.3. Le rayonnement global**

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus. Nous exposons dans ce qui suit les expressions et les principales caractéristiques des deux composantes du rayonnement global [15].

### **I.4. Les cuiseurs solaires**

#### **I.4.1. Histoire des cuiseurs solaires**

Depuis des siècles, les gens ont séché au soleil, fruits, légumes, poissons et viandes pour les préserver. En 1767 le Français et Suisse Horace-Bénédict de Saussure a cuit des fruits dans un boîtier recouvert de trois carreaux en verre, et fait à partir de deux boîtes en bois d'épinette et de la laine comme matériel isolant. L'astronome britannique John Herschel a utilisé un cuiseur de type boîte en

Afrique du Sud en 1830. La première utilisation de cuiseurs solaire aux États-Unis date de 1881 au cours de l'ascension de Samuel P. Langley au Mont Whitney, en Californie. Pendant les années 1860, Mouchot en Algérie a cuit avec un concentrateur concave. Charles Abbot a fabriqué une boîte avec des armatures réfléchissantes en forme de parabole qu'il a dirigée sur un récipient d'huile de moteur. Ce dernier fut chauffé à 177°C et la chaleur résiduelle a permis la cuisson plus tard en soirée. Dans les années 1900, Maria Telkes des États-Unis, a fait de la recherche sur plusieurs prototypes de cuiseurs solaires à panneaux. En général, ces premiers modèles de cuiseurs solaires étaient chers et inconfortables.

La disparition des arbres ainsi que les pénuries de pétrole des années 1970 ont éveillé l'intérêt mondial dans les alternatives au pétrole. Les gouvernements de l'Inde et de la Chine ont développé et ont assuré la promotion des cuiseurs de type boîte et des concentrateurs paraboliques. En 1976 dans l'état de l'Arizona aux États-Unis, Barbara Kerr et Sherry Cole ont développé des cuiseurs de type boîte faciles à construire à domicile. Elles ont aussi travaillé sur des modèles de dessiccateurs et stérilisateurs solaires de nourriture.

Le professeur Robert Metcalf, de l'Université de Californie à Sacramento continue même aujourd'hui à faire des études scientifiques sur la pasteurisation solaire de l'eau et de partager ses connaissances dans beaucoup de pays. Kerr, Cole, Metcalf et d'autres ont fondé Solar Cookers International (SCI) en 1987 pour diffuser la cuisson solaire pour le bénéfice des peuples et des environnements à travers le monde. Aujourd'hui plusieurs centaines d'ingénieurs, d'éducateurs, de coopérants et bénévoles, de fonctionnaires, de clubs, d'universités, de groupes religieux et de programmes pour réfugiés partagent leurs connaissances de cuisson solaires qui est devenu très répandue à travers le monde, surtout dans les régions isolées, pauvres et en voie de développement où plusieurs organisations internationales entretiennent des programmes d'aide et de promotion de la cuisson solaire au profit des populations locales.

Les graves sécheresses des années 1990 en Afrique ont incité SCI à améliorer un cuiseur solaire ultra simple initialement développé par Roger Bernard (France). Ce développement a conduit à diffuser les plans pour la fabrication du nouveau CookKit à travers le monde entier et de distribuer le CookKit à plus de 30000 familles de réfugiés en Afrique orientale. [5]

En 2017, l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa) a également porté un grand intérêt au développement et à la vulgarisation des cuiseurs solaires, en lançant un programme ambitieux, s'inscrivant dans le cadre de ces activités ; qui porte sur la conception et la réalisation de nouveaux de cuiseurs solaires, qui a abouti à la proposition d'un cuiseur solaire de type boîte avec une surface réceptrice inclinée, et la réalisation d'un cuiseur solaire parabolique (Fig I.5), des cartes des efficacités des cuiseurs à travers le territoire national ont été proposées à cet effet [2].



Fig. I.5 : Deux prototypes de cuiseurs solaires réalisés et testés à l'URAER Ghardaïa [2].

#### **I.4.2. Principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire**

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

Dans certains cas, les apports solaires sont multipliés par l'ajout de miroirs. L'énergie utilisée par les cuiseurs solaires est une énergie renouvelable qui provient du Soleil.

Ce rayonnement solaire est un ensemble d'ondes électromagnétiques constituées de photons. La Terre qui est située à près de 150 millions de kilomètres du Soleil, reçoit en permanence une énergie solaire de 170 millions Gigawatt parmi laquelle environ 30% est réfléchiée par les nuages l'atmosphère et le sol, et 20% est absorbés par l'atmosphère et les nuages.

Le rayonnement solaire est ensuite converti en chaleur par un absorbeur, dont sa surface est généralement sombre. Dans la plupart des cuiseurs solaires, cette fonction est assurée par le récipient contenant les aliments. Dans un souci d'efficacité, la chaleur doit être conservée au maximum. Les cuiseurs solaires de type "boîte" 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 [3].

### I.4.3. Les températures et temps de cuisson

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

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.

Cependant, des températures comprises entre 80 et 90°C suffisent pour cuire les nourritures et gardent leur goût, humidité et éléments nutritifs (Fig I.6) [3].

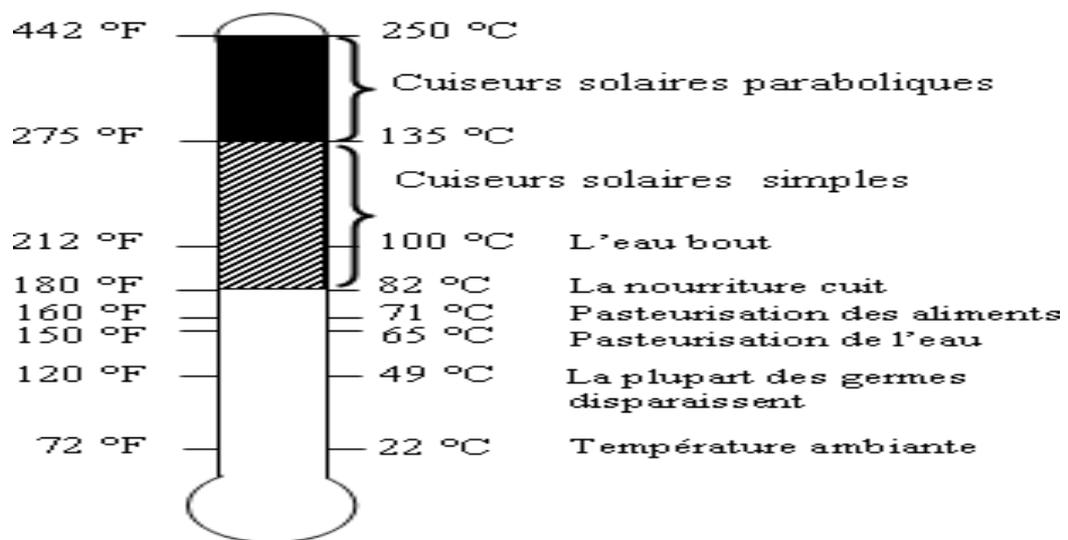


Figure I.6: Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs [3].

Les temps de cuisson sont très variables, ils varient considérablement en fonction de divers facteurs notamment la période de l'année, le moment de la journée, le degré d'ensoleillement, la force du vent, le type de récipient utilisé et la quantité de nourriture préparée.

Les surfaces foncées absorbent mieux la lumière du soleil que les surfaces claires. C'est pourquoi les aliments cuisent mieux dans des récipients en métal foncé, peu profonds, fermés par des couvercles adaptés afin de maintenir la chaleur et l'humidité.

Il y'a de nombreux facteurs jouent sur la durée de cuisson dans un cuiseur solaire, notamment la période de l'année, le moment de la journée, le degré d'ensoleillement, le type de récipient

utilisé et la quantité de nourriture préparée. Le tableau suivant fait une synthèse de ces différents facteurs [3].

#### **I.4.4. Les modèles de base des cuiseurs solaires**

##### **I.4.4.1. Le cuiseur à panneaux**

- Ce modèle est constitué de différents panneaux qui concentrent les rayons du soleil sur un pot placé sous une cloche en verre (effet de serre).
- L'avantage de ce modèle est sa simplicité.
- Dans ce dispositif, les panneaux sont constitués de morceaux de carton recouvert d'un papier réflecteur comme de l'aluminium. Différents panneaux concentrent grossièrement les rayons du soleil sur un pot qui se trouve sous un bol en verre ou en plastique pour créer de l'effet de serre. Ils permettent de cuire des petites quantités de nourriture (pour une personne) ou bien de nettoyer de l'eau en la chauffant au-delà de 65 degrés Celsius.
- Ce cuiseur utilise à la fois le principe d'effet de serre du four solaire de type "boîte" et les bénéfices du réflecteur parabolique du cuiseur parabolique.
- Ce type de cuiseur est relativement facile à construire et utilise des matériaux peu coûteux. [16].



Fig. I.7 : Le cuiseur à panneaux type boîte [18].

##### **I.4.4.2. Le cuiseur boîte**

Ce modèle est constitué d'un ou plusieurs panneaux réfléchissants qui concentrent les rayons du soleil sur une boîte qui maintient la chaleur et vitrée au-dessus.

- Ce type de four a l'avantage de cuire de façon lente et uniforme de grandes quantités de nourriture.

- Élément réfléchissant : réflecteurs/miroirs
- Eléments du cuiseur : Il est constitué d'une boîte dont l'intérieur est tapissé de réflecteurs et d'une couverture transparente sur le dessus. Le rayonnement pénètre à l'intérieur de la boîte et est réfléchi sur un récipient dont la surface absorbe les rayons. La couverture transparente permet d'isoler l'intérieur du four de l'extérieur et de piéger le rayonnement afin de garder le maximum de chaleur. C'est le principe de l'effet de serre. Parfois, il est composé d'un ou plusieurs réflecteurs positionnés de manière à apporter davantage de rayonnement solaire.
- Les températures : La température atteinte par les fours de type « boîte » est généralement comprise entre 100 et 200 °C et dépend tout d'abord du nombre et de la taille des panneaux utilisés. [16]

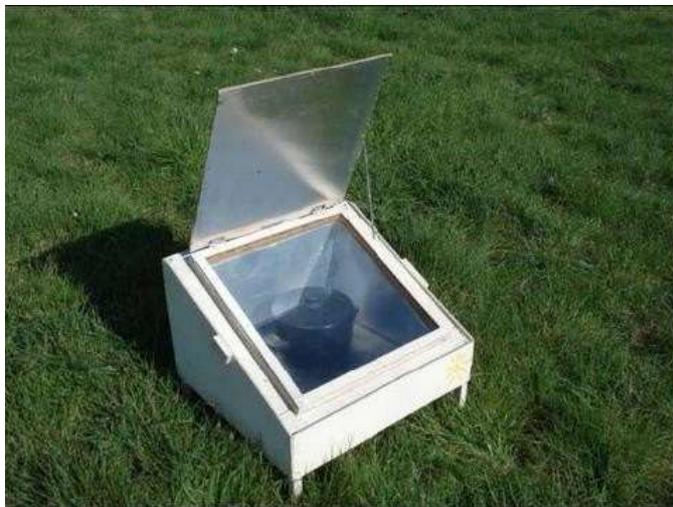


Figure I.8 : Le cuiseur boîte réflecteur mémoire [19].

#### **I.4.4.3. Le cuiseur parabolique**

Le cuiseur solaire parabolique repose sur le principe de la concentration des rayons: le faisceau de rayons parallèles du soleil se reflète sur le miroir parabolique et les rayons ne convergent en un même point, le foyer de la parabole.

- Élément réfléchissant : miroir souple.
- Eléments d'assemblages : équerres, vis, boulons...
- Le cuiseur parabolique permet d'obtenir une température plus élevée et plus rapidement. Sa puissance dépend essentiellement de la surface du réflecteur. Malgré ses bonnes performances, le cuiseur a continuellement besoin de la lumière directe du soleil et il doit donc être constamment orienté face au soleil [16].



Fig. I.9 : Le cuiseur parabolique [19].

## I.4.5. Développement des cuiseurs solaires à travers le monde

### I.4.5.1. Cuiseurs à concentration de type cylindro-parabolique

Richard Petela a présenté une analyse théorique de l'exergie d'un cuiseur solaire cylindro-parabolique (Fig I.10.a), ainsi que la distribution des pertes exégétiques dans le cuiseur et l'analyse exégétique de la surface exposée au rayonnement solaire qui absorbe le flux radiatif des différentes températures. En 2004, Ozturk a appliqué les normes internationales pour tester les performances d'un cuiseur solaire et les a exploités à la détermination expérimentale des rendements de l'énergie et de l'exergie d'un cuiseur solaire cylindro-parabolique (Fig I.10.b).

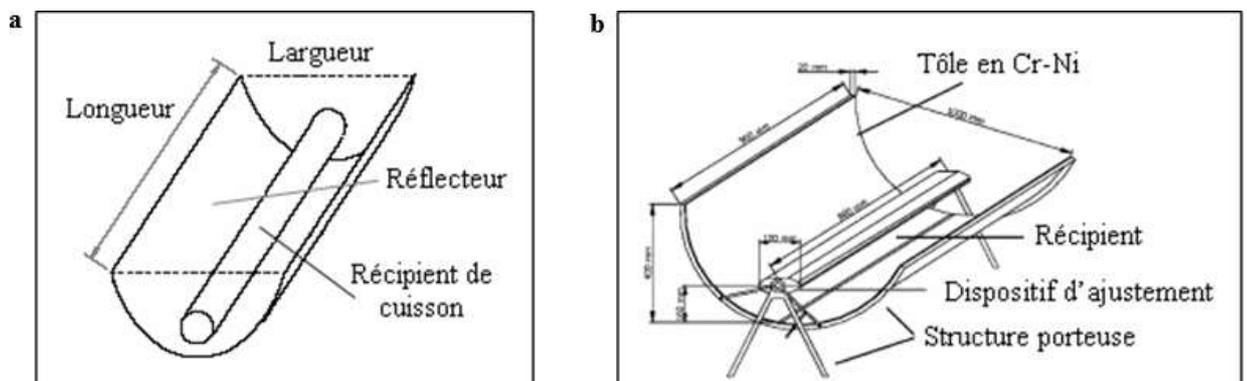


Fig. I.10 : (a) Cuiseur cylindro-parabolique étudié par Richard Petela,  
(b) schéma du cuiseur cylindro-parabolique testé par Ozturk [4].

### I.4.5.2. Cuiseurs à concentration de type parabolique

Sonune et Philip ont conçu et développé en 2003 un cuiseur solaire domestique à concentration de type Fresnel (Fig I.11.a), qui fournit une température adéquate nécessaire pour la cuisson et la friture. Et en 2004, Franco et al. ont apporté quelques modifications à un cuiseur

solaire composé de deux unités séparées : un concentrateur parabolique d'un côté et une boîte isolée contenant le récipient d'un autre coté (Fig I.11.b), le but étant d'améliorer sa capacité de travail et ceci en utilisant trois différents types d'absorbeurs optimisés.

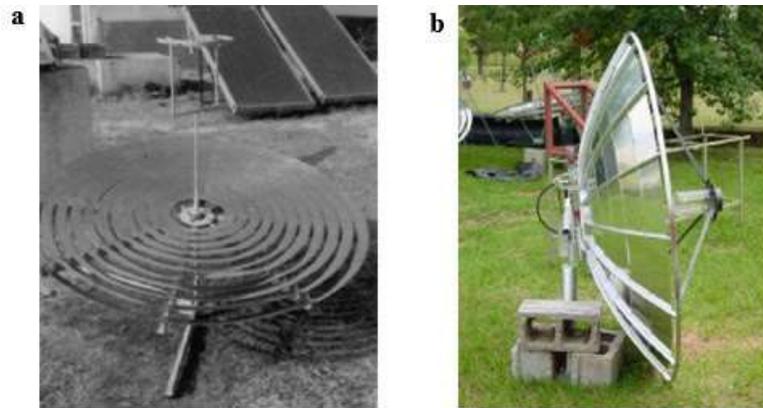


Fig. I.11 : (a) Cuiseur parabolique avec des miroirs de Fresnel réalisé par Sonune et Philip, (b) cuiseur parabolique composé et réalisé par Franco et al.

En 2007, Arenas décrit la conception, la fabrication et le test d'un nouveau cuiseur solaire portable (Fig I.12.a), avec un grand réflecteur parabolique pliable. Les résultats obtenus avec ce prototype montrent que le cuiseur solaire atteint une puissance moyenne de 175 W, avec une efficacité énergétique de 26.6 %. Cette puissance fournit une énergie suffisante pour faire cuire un repas simple pour deux personnes en un temps de 2 heures. Un cuiseur solaire parabolique (Fig I.12.b), est réalisé en 2009 par Grupp et al., le cuiseur contient un dispositif qui enregistre les données de la température ambiante, la température de cuisson et l'irradiation solaire.



Fig. I.12 : (a) Cuiseur parapluie réalisé par José M. Arenas, (b) cuiseur parabolique réalisé par Grupp et al.

### I.4.5.3. Cuiseurs suiveurs du soleil

En 2010, Un cuiseur solaire cylindro-parabolique avec système de poursuite solaire automatique (Fig I.13), a été conçu, construit et testé par Al-Soud et al., un contrôleur programmable a été employé pour contrôler le mouvement du cuiseur solaire. En 2011, l'effet d'un système de poursuite solaire à deux axes sur un cuiseur parabolique (Fig I.14), a été étudié par Abu-Malouh et al. Le concentrateur parabolique a été construit pour concentrer le rayonnement solaire sur un récipient fixé au sommet du foyer, le cuiseur suit le soleil à l'aide du système de poursuite à deux axes, ce dernier est réalisé et ensuite testé.

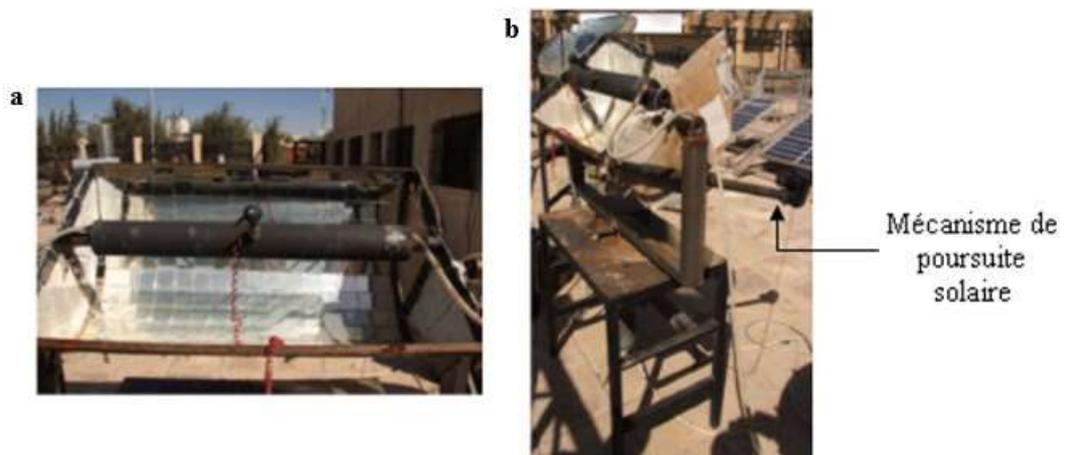


Fig. I.13 : (a) Cuiseur cylindro-parabolique; (b) système de poursuite solaire, réalisés par Al-Soud et al.

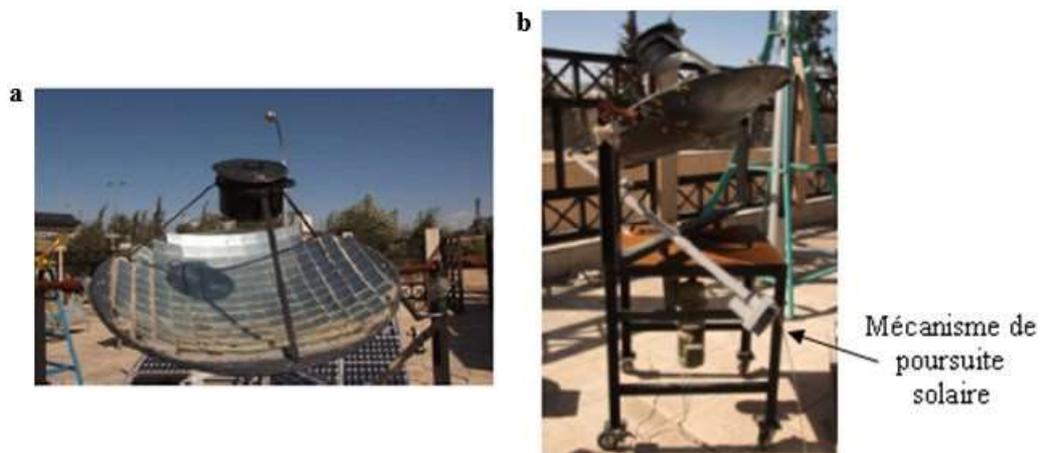


Fig. I.14 : (a) Cuiseur parabolique; (b) système de poursuite solaire (b), réalisés par Abu-Malouh et al.

### I.4.5.4. Cuiseurs solaires indirects

En 2004, Esen a démontré la faisabilité de l'utilisation de réfrigérants dans un système de cuisson solaire (Fig I.15.a), qui consiste en un capteur solaire à tube sous vide avec un long

caloduc intégré menant directement à la plaque de cuisson, pour cuire et/ou stocker les aliments chauds en fin de soirée. En 2005, Sharma et al. ont étudié la performance thermique d'un prototype de cuiseur solaire basé sur un capteur à tube sous vide avec une unité de stockage équipée d'un matériau à changement de phase (MCP) (Fig I.15.b) [4].

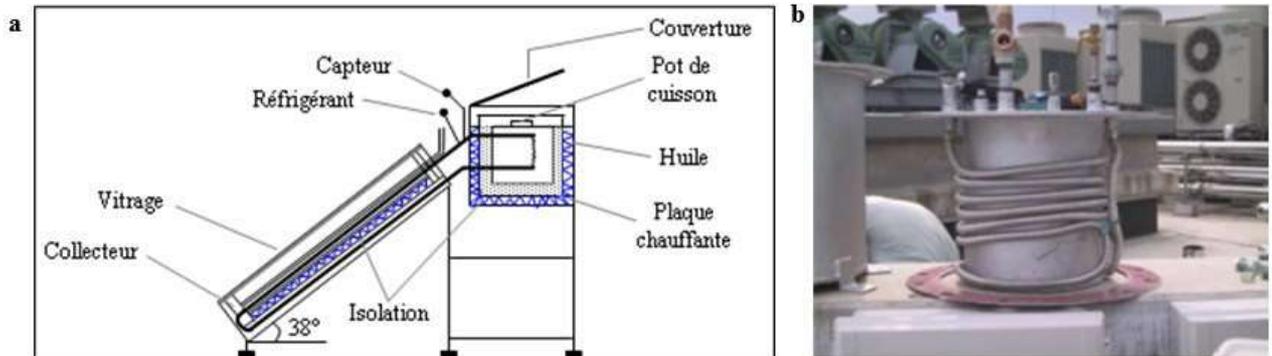


Fig. I.15 : (a) Schéma du cuiseur solaire indirect contenant des réfrigérants étudié par Esen, (b) unité de stockage de chaleur latente avec PCM réalisé par Sharma et al.

## I.4.6. Les avantages et les inconvénients des cuiseurs solaires

### I.4.6.1. Les avantages des cuiseurs solaires

- On ne risque pas de faire brûler les aliments.
- On utilise une énergie renouvelable, gratuite et non polluante.
- Le cuiseur est transportable.
- Ce mode de cuisson est plus doux et respecte les qualités nutritionnelles des aliments.
- Il n'y a aucun élément contaminant (gaz de combustion...). [2].

### I.4.6.2. Les inconvénients des cuiseurs solaires

- Lorsqu'on ouvre le four pour surveiller la cuisson, on perd une grande partie de la chaleur.
- Le temps de cuisson des aliments est souvent multiplié par deux comparativement à un mode de cuisson traditionnel...
- Dépendant du bon vouloir du soleil.
- Ils sont compliqués à construire. [2].

## **I.5. Conclusion**

Le rayonnement solaire ou l'éclairement solaire est l'élément de base dans la conversion d'énergie rayonnée en énergie thermique ou photovoltaïque.

Dans ce premier chapitre, nous avons rassemblé quelques généralités sur les énergies renouvelables et notamment l'énergie solaire et ces différentes modes d'utilisation. Il a été constaté qu'un cuiseur solaire est un moyen écologique et économique de préparer les aliments.

Les cuiseurs solaires capturent les rayons du soleil au moyen de surfaces brillantes ou miroirs, qui réfléchissent les rayons du soleil et les concentrent sur un récipient de cuisson, à cette concentration de rayons lumineux, s'ajoute un effet de serre. Et pour surmonter les besoins énergétiques en cas de mauvais temps ou pendant la nuit, le stockage thermique d'énergie est compté parmi les meilleures solutions techniques possibles pour la cuisson solaire.

---

## **CHAPITRE II**

# **Modélisation de l'éclairement reçu et étude théorique du système de cuisson propose**

## II.1. Introduction

Les besoins en énergie solaire de toutes sortes sont en croissance partout sur la planète. A ce jour, le cuiseur solaire est l'un des solutions la plus écologique, il est un appareil basé sur la conversion en chaleur des rayonnements lumineux émis par le soleil. Il utilise généralement la technique de concentration des rayons solaires et/ou le phénomène de l'effet de serre [02]. Dans ce deuxième chapitre, toutes les équations présentées pour l'estimation des composantes directes et diffuse de l'éclairement solaire ont été programmées sur Matlab, ensuite l'étude et la conception du cuiseur solaire à concentration est également présentée.

## II.2. Modélisation mathématique de l'éclairement solaire

### II.2.1. Paramètres géométriques et atmosphériques

#### II.2.1.1. Les coordonnées géographiques terrestres

Tout point de la surface terrestre est repérée par ses coordonnées géographiques : La longitude, la latitude, ainsi que par son altitude [02].

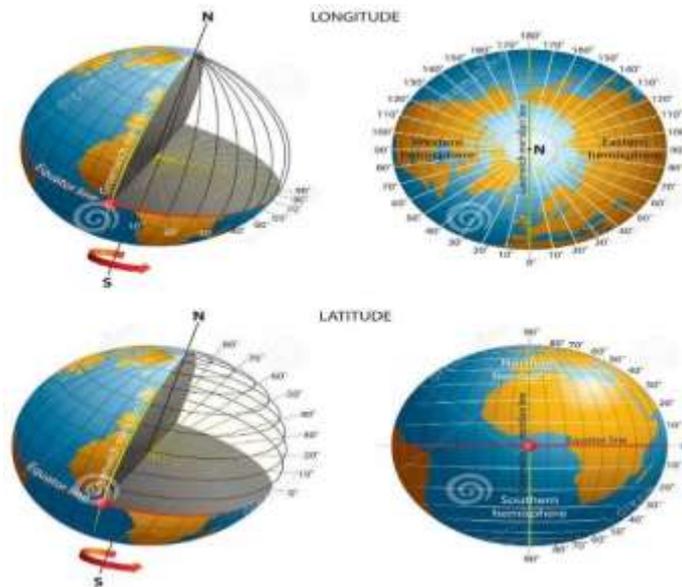


Fig.II.1 : Illustration de vecteur des latitude-longitude-coordonnées [23].

#### II.2.1.2. L'angle horaire ( $\omega$ )

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

méridien origine passant par le sud et la projection de la direction du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel [02].

L'angle horaire se mesure à partir du midi solaire, il est positif s'il est avant midi et négatifs 'il est après midi ( $\omega$  vaut  $0^\circ$  à midi,  $-90^\circ$  à 18 heures et  $90^\circ$  à 6 heures, en temps solaire vrai, chaque heure le décale de  $15^\circ$ , positifs le matin et négatifs l'après-midi) [02].

L'angle horaire est donné par l'équation suivante :

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (01)$$

Pour calculer l'angle horaire, Capderou dans l'ASA, a utilisé la formule suivante :

$$\omega = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (02)$$

Le temps solaire vrai TSV est donné par l'équation (3), avec  $DE_{est}$  le décalage horaire, il est égal à 1 pour l'Algérie. [20] :

$$TSV = t - DE + (ET + 4 \cdot Long) / 60 \quad (03)$$

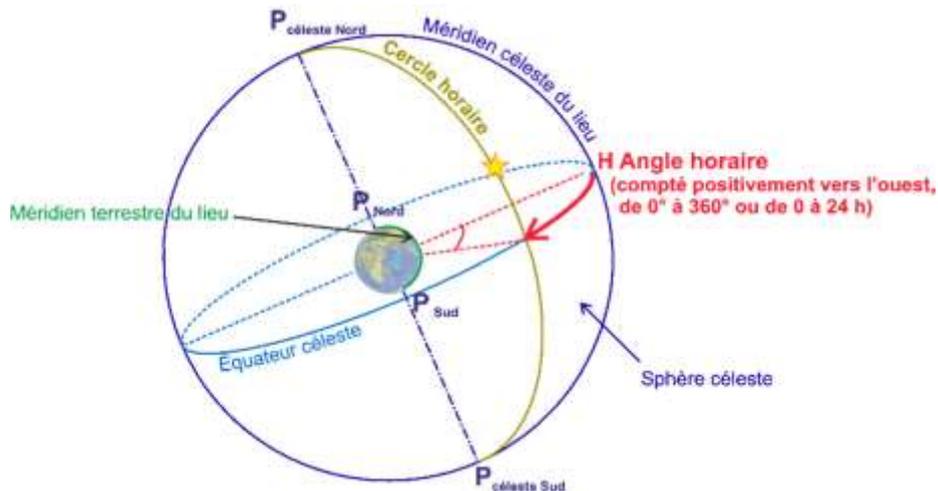


Fig.II.2 : Les coordonnées horaires [24].

### II.2.1.3. La déclinaison du soleil ( $\delta$ )

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. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante : [20]

$$\sin(\delta) = 0.3978 * \sin [Np - 1.4 + 0.0355 * \sin (Np - 0.0489)] \quad (04)$$

Avec :

$$N_p = 2\pi * N/365.25$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé cette expression pour le calcul de la déclinaison : [22]

$$\sin(\delta) = 0.398 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} \cdot (N - 82) + 2 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} \cdot (N - 2) \right] \right] \quad (05)$$

N est le jour Julian variant de 1 du 1er Janvier à 365 (366) du 31 Décembre. La variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année par Matlab est décrite sur la figure (II.3) :

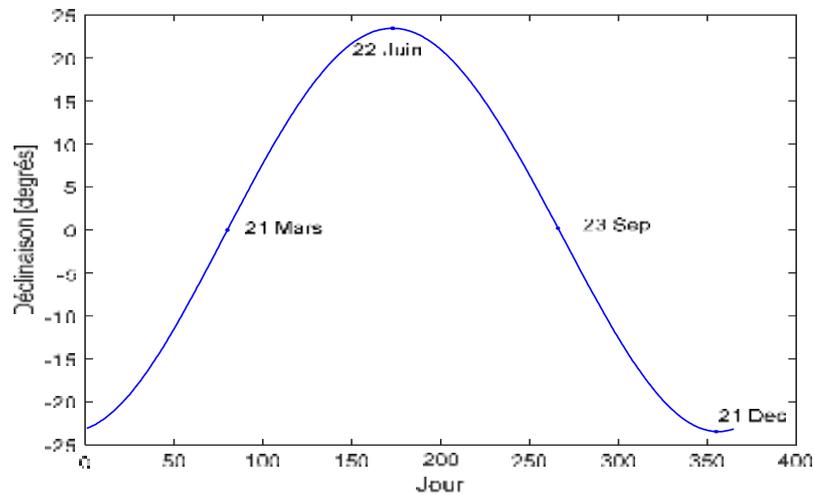


Fig.II.3 : Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.

#### II.2.1.4. La hauteur du soleil ( $\gamma_s$ )

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, 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 Capderou : [20]

$$\sin(\gamma) = \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(w) + \sin(\varphi) * \sin(\delta) \quad (06)$$

La variation de la hauteur du soleil en fonction du jour de l'année par Matlab est décrite sur la figure (II.4) :

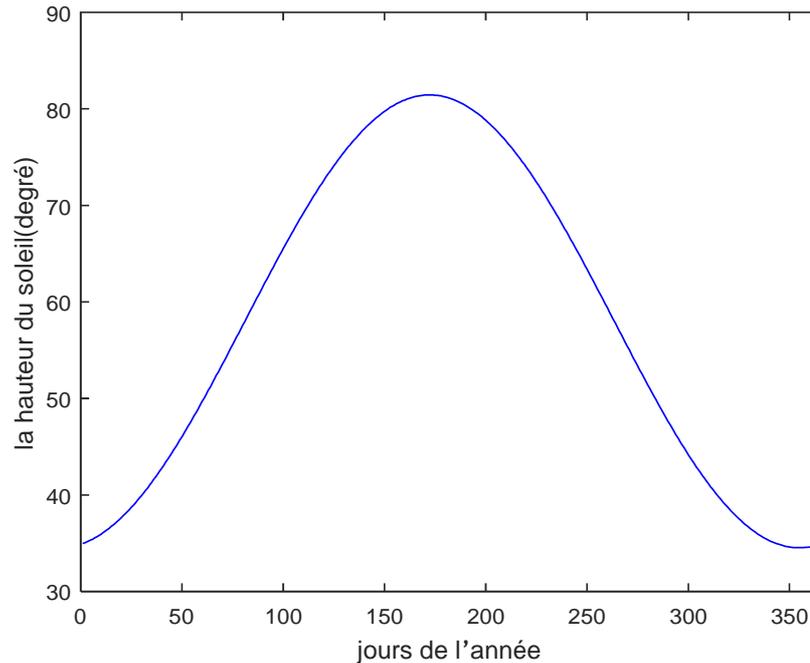


Fig.II.4 : Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.

#### II.2.1.5. L'azimut du soleil ( $\chi$ )

L'azimut du soleil  $\chi$  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  $\chi > 0$  et négativement vers l'Est  $\chi < 0$ , à midi  $\chi = 0$ . L'azimut est compris entre  $-180 \leq \chi \leq 180^\circ$ . L'azimut du soleil est représenté en fonction de la déclinaison solaire  $\delta$ , latitude du lieu  $\varphi$ , et de l'angle horaire  $\omega$  de la manière suivante : [22]

$$\cos(\chi) = \frac{\sin(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) - \cos(\varphi) * \sin(\delta)}{\{[\cos(\delta) * \sin(\omega)]^2 + [\sin(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) - \cos(\varphi) * \sin(\delta)]^2\}^{0.5}}$$

#### II.2.1.6. 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 : [22]

$$m = \frac{1}{A \cdot \overline{\sin(\gamma_s)}} \quad (07)$$

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

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma_s) + 9.40 \cdot 10^{-4} \cdot [\sin(\gamma_s) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (08)$$

La (fig.II.5) représente la variation de la masse d'air atmosphérique en fonction de la hauteur du soleil :

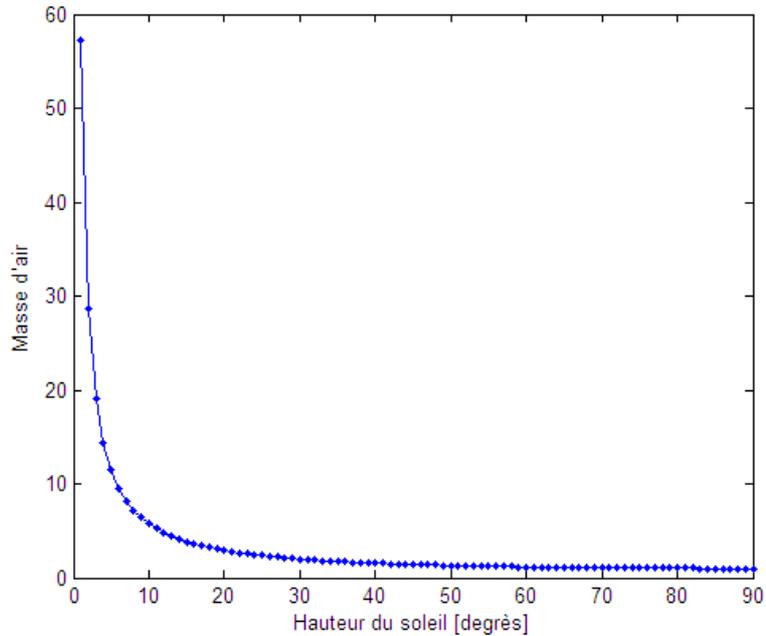


Fig. II. 5 : Variation de masse d'air en fonction de hauteur soleil.

### II.2.1.7. Epaisseur optique de l'atmosphère

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 (09) 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 : [21]

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \cdot m_A) \quad (09)$$

Dans cette formule utilisée 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 pas 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. Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour  $\delta_R$  [20].

$$(S_R)^{-1} = 6.5567 + (1.7513 \cdot m_A \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (10)$$

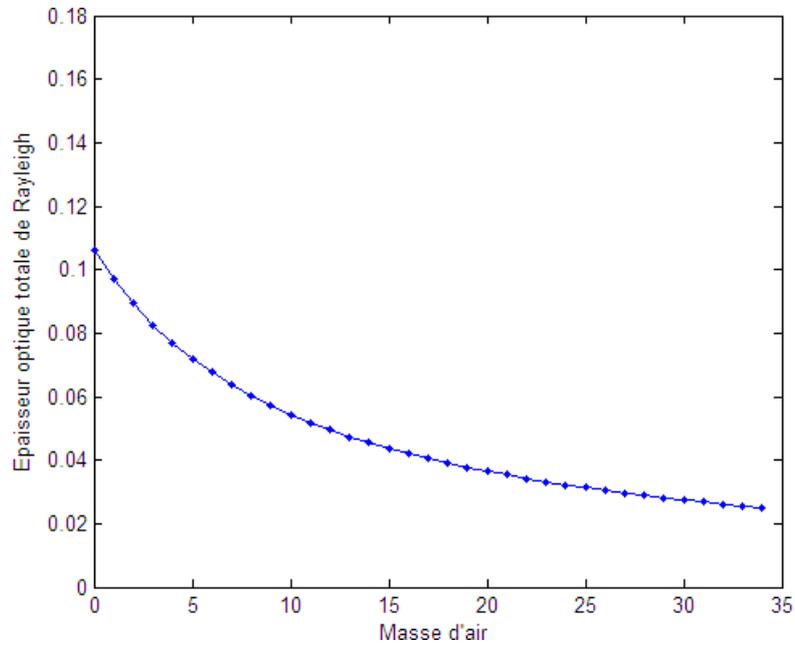


Fig. II. 6 : Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.

### II.2.1.8. Facteur de trouble de Linke

La méthodologie adoptée par la plupart 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 dû à l'absorption par la vapeur d'eau  $T_0$ , le trouble dû à la diffusion moléculaire de Rayleigh  $T_1$  et le trouble relatif à la diffusion par les aérosols  $T_2$  avec : [22]

$$T_0 = (2.4 - 0.9 \cdot \sin\varphi) + 0.1 \cdot (2 + \sin\varphi) - (0.2 \cdot Z) - (1.22 + 0.14 \cdot A_{he}) \cdot (1 - \sin\gamma_s) \quad (11)$$

$$T_1 = (0.89)^Z \quad (12)$$

$$T_2 = [0.9 + (0.4 \cdot A_{he})] \cdot (0.63)^Z \quad (13)$$

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

$$A_{he} = \sin \left[ \frac{360}{365} \cdot (N - 121) \right] \quad (14)$$

### II.2.1.9. Angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré, L'angle d'incidence est calculé à partir du  $\sin(\delta_i)$  pour le modèle r.sun de la manière suivante : [21]

$$\sin(\delta) = \cos(\varphi') \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega - \lambda') + \sin(\varphi') \cdot \sin(\delta) \quad (15)$$

L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donné par Capderou par les formules suivantes : [21]

$$\cos(\delta^{inc}) = [a' \cdot \sin(\omega)] + [b' \cdot \cos(\omega)] + c' \quad (16)$$

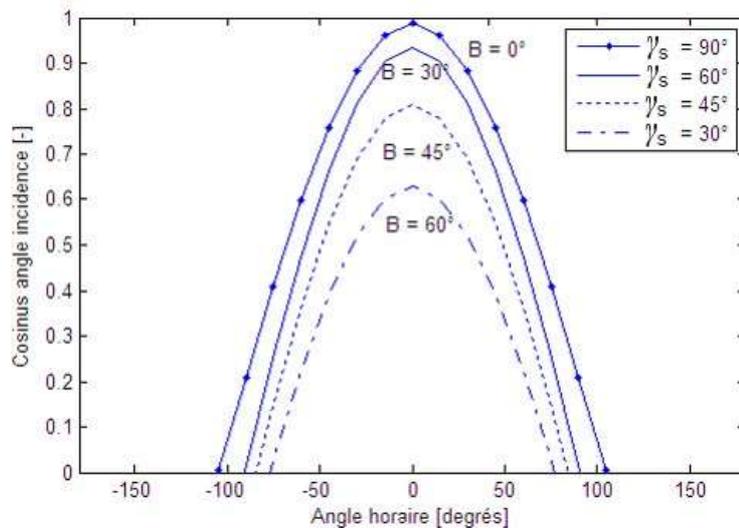


Fig.II.7 : Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.

## II.3. Rayonnement solaire incident sur un plan

### II.3.1. Eclairement hors atmosphère

En dehors de l'atmosphère l'éclairement solaire est d'intensité  $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ . 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 l'éclairement incident. Dans le cas d'un plan horizontal situé en dehors de l'atmosphère, l'éclairement est décrit comme : Éclairement solaire extraterrestre horizontal.

L'éclairement solaire extraterrestre ; fonction de la constante solaire et de la correction de distance entre la terre et le soleil, est donné par les équations et sa variation en fonction du jour de l'année est illustrée sur les figures [21].

$$G_0 = I_0 \cdot \varepsilon \quad (17)$$

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

$$\varepsilon = 1 + 0.034 \cdot \cos \left[ \frac{360}{365} \cdot (N - 2) \right]$$

(18)

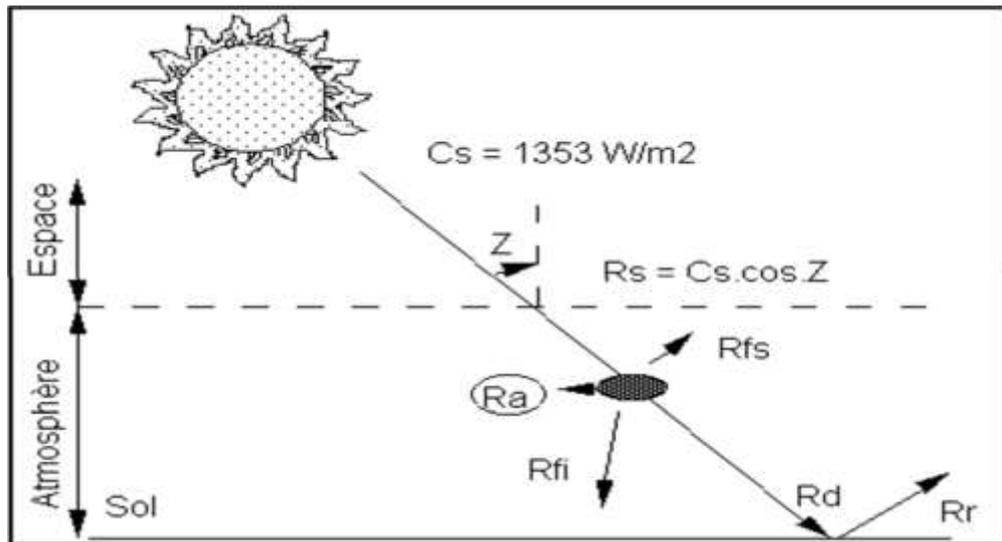


Fig.II.8 : Éclairement solaire hors atmosphère [25].

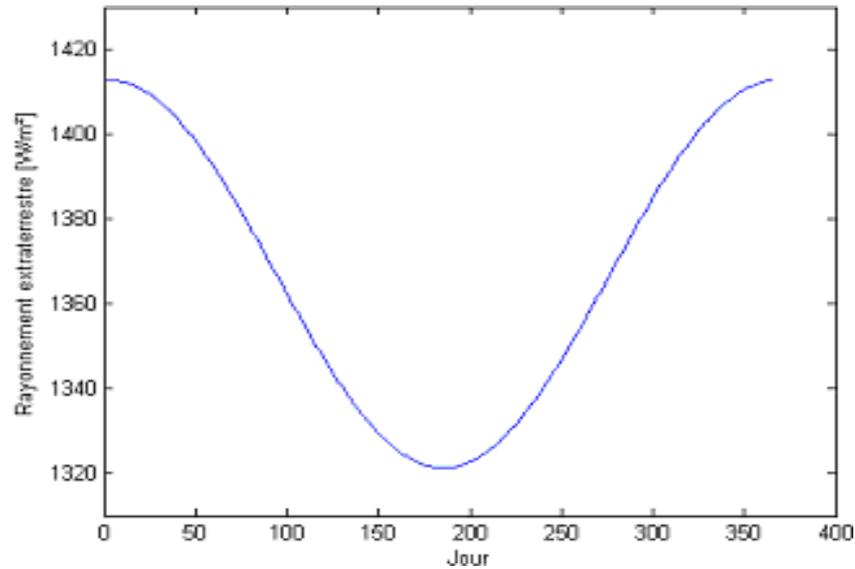


Fig.II.9 : Variation de l'éclairement solaire extraterrestre en fonction du jour.

### II.3.2. Eclairement direct incident sur un plan horizontal

L'éclairement global est la somme des deux composantes directe et diffuse. L'éclairement direct est le flux solaire incident directement sur le plan considéré sous un angle représentant la hauteur solaire. Tel que modélisé par Hofierka et al. (2002), l'éclairement direct incident sur un plan horizontal  $IB^h(\gamma_s, T_L)$  par ciel clair, est donné par : [20]

$$IB^h(\gamma_s, T_L) = G_0 \cdot \sin(\gamma_s) \cdot \exp \left[ \frac{-T_L}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^2} \cdot \sin(\gamma_s)} \right] \quad (19)$$

### II.3.3. Eclairement diffus incident sur un plan horizontal

Pour calculer l'éclairement diffus, Capderou utilisa le facteur de trouble diffusif  $T_L'$  et donna ; en 1987, une l'équation fonction de la hauteur du soleil  $\gamma_s$  [22].

$$ID^h(\gamma_s, T_L) = G_0 \cdot \exp \left\{ -1 + 1.06 \cdot \log[\sin(\gamma_s)] + a - \sqrt{b^2 + a^2} \right\} \quad (20)$$

Avec:

$$a=1,1$$

$$b = \log(T_L') - 2.80 + 1.02 \cdot [1 - \sin(\gamma_s)]^2$$

### II.3.4. Eclairement reçu sur une surface avec poursuite solaire

#### II.3.4.1. Suivi continu du soleil

Des systèmes permettent de suivre la course du soleil au cours de la journée, afin de minimiser l'angle d'incidence. Il s'agit de l'angle d'incidence des rayons du soleil sur un plan lié au système, ce plan étant le récepteur lui-même ou le support du récepteur (systèmes à concentration). Ces systèmes sont classés selon le nombre d'axes (un ou deux) et le mode de suivi (continu ou quotidien). Le principe du suivi par mouvement autour d'un axe, est d'orienter à chaque instant le plan récepteur par rotation autour de l'axe de telle sorte que la normale du plan soit constamment dans le plan formé par l'axe et la direction du soleil. Avec un système à deux degrés de liberté, on peut suivre la direction du soleil pour obtenir une incidence constamment normale.

Dans les applications utilisant des systèmes à concentration qu'ils soient de type parabolique ou cylindro-parabolique, on s'intéresse généralement à un suivi du soleil continu à un seul ou deux axes en considérant les cas particuliers suivants :

Suivi continu à axe horizontal, orienté Est-Ouest (poursuite N-S) :

$$\text{Cos}(\delta_i) = \left[ 1 - \{\text{Cos}(\delta) \times \text{Sin}(\omega)\}^2 \right]^{0.5} \quad (21)$$

Suivi continu à axe horizontal, orienté Nord-Sud (poursuite E-O) :

$$\text{Cos}(\delta_i) = \left[ 1 - \{\text{Cos}(\delta) \times \text{Sin}(\varphi) \times \text{Cos}(\omega) - \text{Sin}(\delta) \times \text{Cos}(\varphi)\}^2 \right]^{0.5} \quad (22)$$

Suivi continu à deux axes (poursuite intégrale) :

$$\text{Cos}(\delta_i) = 1 \quad (23)$$

Les variations de l'éclairement direct incident sur la surface d'ouverture d'un concentrateur solaire avec poursuite à deux axes sont représentées sur la figure (II.11) en fonction du temps pour le site de Ghardaïa. On peut remarquer que l'énergie solaire collectée par un système à concentration augmente avec la durée du jour et elle est inversement proportionnelle aux facteurs de troubles.

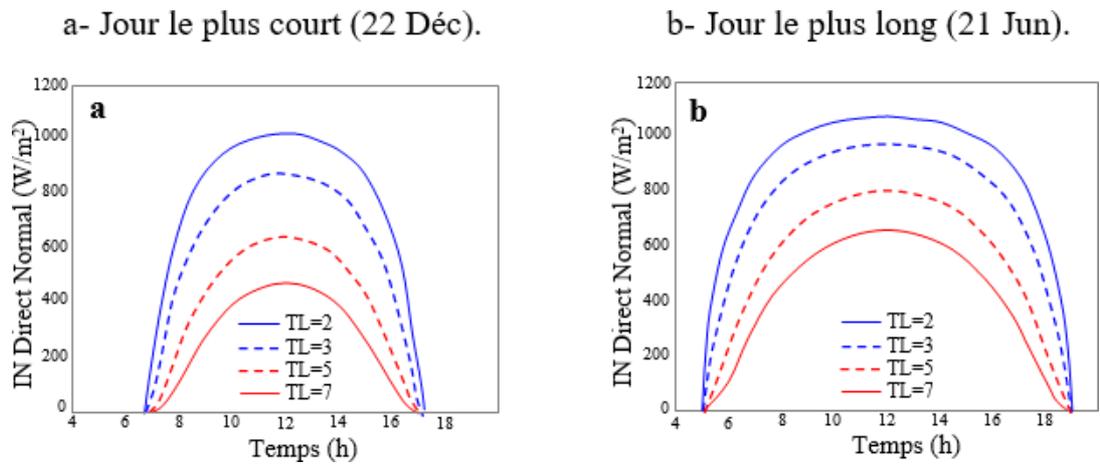


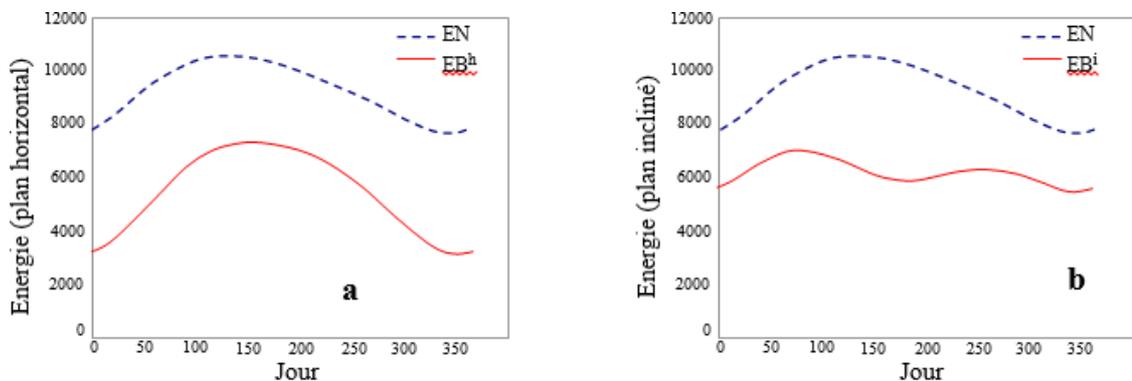
Fig.II.11 : Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de linke et du temps pour le jour le plus court et le plus long de l'année.

### II.3.4.2. Modélisation de l'énergie solaire reçue

Par intégration numérique des puissances, entre le lever et le coucher effectif du soleil, on peut calculer pour un plan quelconque, les valeurs des énergies reçues :

$$EB^h(\omega_{sr}, \omega_{ss}) = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} IB^h \cdot d\omega \quad (24)$$

La figure (II.9a) représente l'énergie directe journalière reçue par la surface d'ouverture horizontale d'un concentrateur solaire  $EB^h(\omega_{sr}, \omega_{ss})$  pour le site de Ghardaïa et la figure (II.9b) représente l'énergie journalière directe reçue par le concentrateur incliné à la latitude  $EB^i(\omega_{sr}, \omega_{ss})$  en fonction du jour.



a- Concentrateur horizontal.

b- Concentrateur incliné à la latitude.

Fig.II.10 : Variation de l'énergie reçue (en Wh/m<sup>2</sup>) par un concentrateur solaire en fonction du jour.

## II.4. Validation des résultats obtenus

### II.4.1. Comparaison entre valeurs du rayonnement solaire pour deux régions de l'Algérie

La figure II.11 représente un exemple de variation du rayonnement solaire en fonction de temps au solstice d'été pour les deux sites Ghardaïa et Tamanrasset. On peut remarquer que le rayonnement global est supérieur au rayonnement direct normal pour les deux sites. On remarque également que le rayonnement direct est supérieur au site de Tamanrasset par rapport au site de Ghardaïa, ceci est justifier par le faite que le site de Tamanrasset possède un ciel clair (moins de troubles) par rapport aux autres sites de l'Algérie.

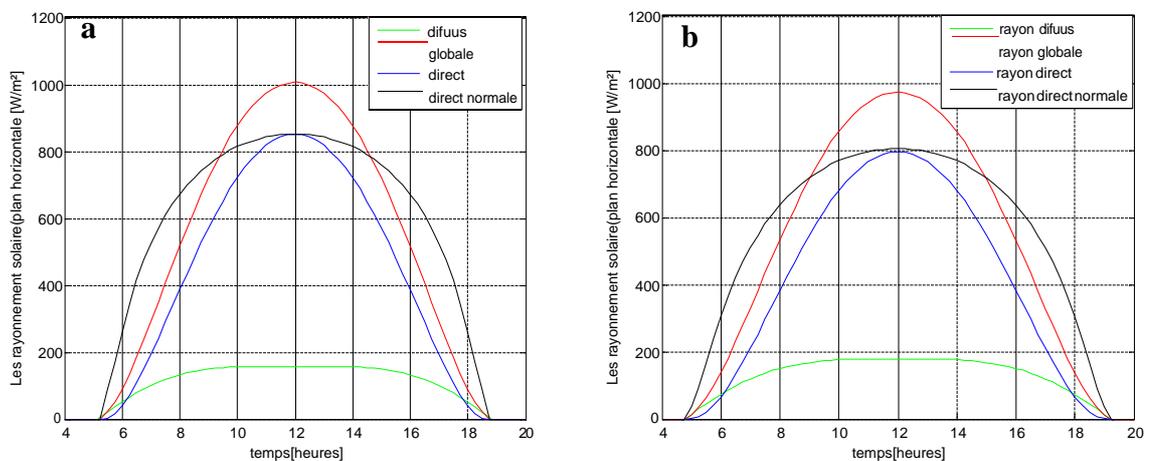


Figure I. 12: Fig.II.11 : Variations des valeurs du rayonnement solaire en fonction de temps au solstice d'été (21 Juin): (a) site de Tamanrasset; (b) site de Ghardaïa.

### II.4.2. 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 (Fig II.12 - II.13), des graphes comparatifs relatifs aux résultats du rayonnement solaire, pour une journée hivernale et estivale :

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

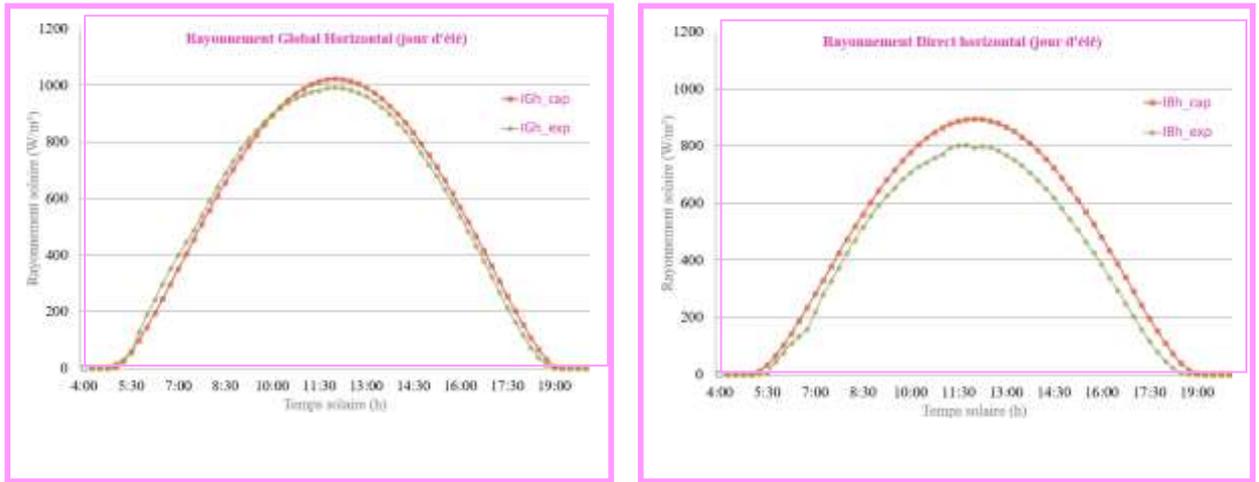


Figure I.11: Fig.II.12 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.

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

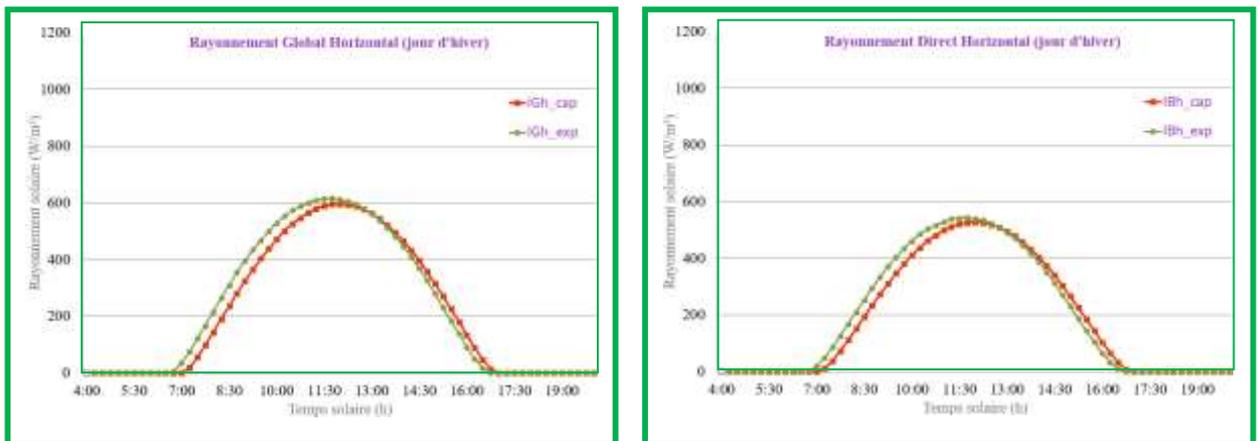


Figure I.12: Fig.II.13 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.

Pour une période estivale (Fig.II.12), on remarquera que le modèle Capderou sur-estime la composante directe horizontale et le rayonnement global avec une petite erreur. Par ailleurs, en période hivernale (Figures Fig.II.13), le modèle Capderou présente un bon rapprochement de valeurs mesurées. Le traitement des graphes des figures (Fig.II.12- Fig.II.12) 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. A cet effet, on peut utiliser le modèle Capderou pour l'estimation de l'éclairement solaire incident sur notre cuiseur à concentration.

### **I.5. Conclusion**

L'énergie solaire est une énergie disponible en tout temps, ne dépend d'aucune autre source d'énergie. L'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la Consommation d'électricité annuelle du pays. L'exploitation de l'énergie solaire et l'optimisation de sa collecte par les systèmes solaire thermique nécessite une connaissance exacte de la distribution de l'irradiation solaire, qui est fonction de plusieurs paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques, sur le lieu d'implantation de ce système.

Dans ce chapitre, nous avons que éclairement solaire est l'élément de base dans la conversion d'énergie rayonnée en énergie thermique ou photovoltaïque, la mesure de ce paramètre se fait avec des éléments très développés et précis, les plus connus sont le pyranomètre et pyrhéliomètre. Une modélisation du rayonnement solaire par le modèle Capderou est présentée, les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes du rayonnement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné sont programmées avec Matlab et leur variation est illustrée sous formes graphiques. Les résultats de ce chapitre sont utilisés pour le calcul de l'éclairement solaire incident sur notre cuiseur dans des conditions de ciel clair.

---

## **CHAPITRE III**

# **Réalisation expérimentale, résultats et discussion**

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

Il est connu que les cuiseurs à concentration atteignent des températures plus élevés que leurs concurrents cuiseurs boîtes. Cette dernière partie va bien nous confirmer cette hypothèse et concernera essentiellement la partie réalisation et test du cuiseur de notre travail. Nous allons commencer par une simulation optique du cuiseur en question pour prévoir son comportement thermique au cours des tests. Une conception mécanique du design proposé sera nécessaire avant la simulation optique. Ensuite, la réalisation expérimentale d'un tel système se tiendra partie par partie au sein de l'établissement de recherche l'URAER-CDER.

Une fois la réalisation terminée, des thermocouples seront ajoutés au dispositif permettant la mesure des températures. Les tests seront entrepris, pendant un intervalle de temps s'étalant entre 10h00 à 15h30; et avec diverses charges du fluide caloporteur et sous différentes conditions climatique de la ville de Ghardaïa. Les résultats issus des tests réalisés seront discutés et interprétés pour vérifier aussi bien le bon fonctionnement de l'ensemble et sa faisabilité/rentabilité pour la cuisson solaire dans des conditions climatiques locales du Sud Algérien.

### **III.2. Présentation du lieu de stage**

#### **III.2.1. Site de Ghardaïa**

Le site de Ghardaïa (Fig.III.1) est situé au centre de l'Algérie et distant de 600 km d'Alger à 32.39° de latitude Nord, de 3.78° 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 [04].

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

## CHAPITRE III : Etude théorique, réalisation expérimentale du système de cuisson et résultats et discussion

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 10 m 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 [03].

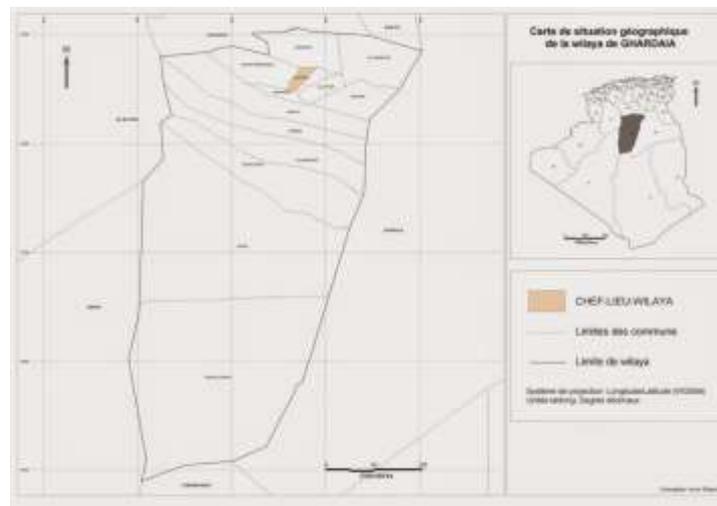


Fig.III.1 : La situation géographique de la wilaya de Ghardaïa [26].

### III.2.2. Aperçu sur l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER)

Inauguré en 1999, l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER), 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 :

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

### **III.2.3. 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.
- 6- Développement des cuiseurs solaires à concentration (cuiseurs boîtes et cuiseurs à concentrateur paraboliques) et leurs applications dans le Sud Algérien.

### **III.3. Conception mécanique et simulation optique du cuiseur**

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

Dans cette partie, nous allons faire une conception de notre capteur solaire sous vide avec réflecteurs avec le logiciel Solid Works suivit d'une simulation optique avec le logiciel TracePro.

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

Lorsque les rayons solaires tombent sur les réflecteurs (concentrateur de Fresnel), ils sont réfléchis au niveau du capteur solaire de type sous vide, ce tube est du verre sous vide à l'intérieur duquel se trouve un absorbeur, qui capte l'énergie solaire et la transfère au fluide caloporteur, qui est dans notre cas de l'huile. Grâce aux propriétés isolantes du vide, à son tour, le capteur chauffe l'huile, qui aussi chauffe la partie inférieure du cuiseur.

Pour cela Nous avons besoin de faire une conception assistée par micro-ordinateur et nous avons utilisé pour cela le logiciel SolidWorks 2019, et la figure (Fig.III.2) est une présentation du prototype en 3D :



Fig.III.2 : Réflecteur composé CPC avec un tube sous vide.

Le réflecteur composé CPC est constitué d'un capteur solaire sous vide qui est un tube de verre sous vide à l'intérieur duquel se trouve un absorbeur noir, un isolant thermique, des réflecteurs de Fresnel constituant les miroirs plans, le tout est monté sur une structure mobile à roues.

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

La simulation optique est la simulation de la répartition des rayons solaires concentrés au niveau de l'absorbeur, qui est le capteur tube sous vide dans notre cas, et des réflecteurs mobiles

## CHAPITRE III : Etude théorique, réalisation expérimentale du système de cuisson et résultats et discussion

qui sont ajoutés aux cuiseurs afin de connaître leurs effets sur le comportement optique de l'éclairage solaire reçu pour en arriver à une conception du design final optimisé.

Le choix du logiciel de simulation s'est porté sur le logiciel de simulation optique professionnel le TracePro 7.0. Pour cela, nous avons commencé par le calcul des paramètres de position du soleil (hauteur et azimuth) pour le site de Ghardaïa. Avec des relations trigonométriques, nous avons converti les coordonnées du soleil en coordonnées de source de lumière qu'on a introduit au logiciel (Fig.III.3):

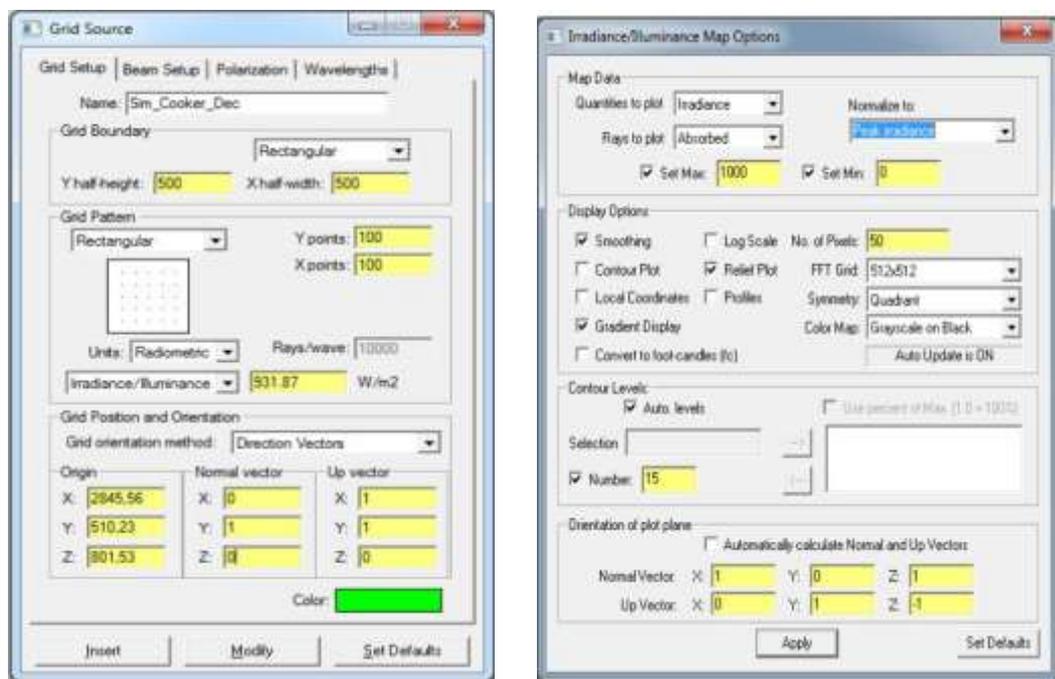


Fig.III.3 : La configurations de la source lumineuse et le choix des options du mapping de l'éclairage concentré.

Après la conception du réflecteur composé avec tubes sous vide en utilisant le logiciel SolidWorks, on importe les formes au logiciel TracePro 7.0 et on ajoute des réflecteurs selon le cas considéré, les angles  $\alpha$ ,  $\gamma$ , et  $\lambda$  d'inclinaison des réflecteurs sont pris comme illustré sur la figure (III.4) :

### CHAPITRE III : Etude théorique, réalisation expérimentale du système de cuisson et résultats et discussion

---

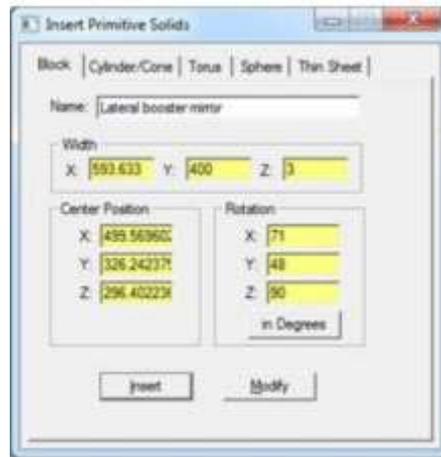


Fig.III.4 : Insertions des réflecteurs pour la simulation optique.

Etant donné que la quantité d'énergie produite par les récepteurs solaires dépend de la quantité de lumière à laquelle ils sont exposés et que la position du soleil change pendant la journée, et afin de collecter un maximum de rayonnement solaire les angles  $\alpha$ ,  $\gamma$ , et  $\lambda$  doivent prendre des valeurs différentes (calculées) sur le moment de la journée. La simulation optique des rayons solaires incident sur les miroirs et l'absorbeur de notre cuiseur est illustrée sur la figure (III.5):

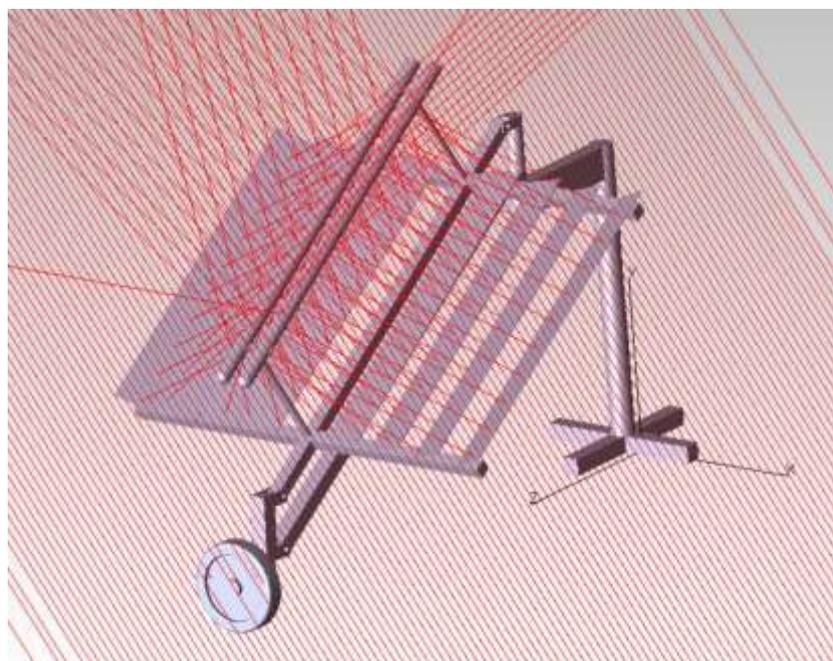


Fig.III.5 : La simulation du comportement optique des rayons solaires reçus par les miroirs et réfléchis au niveau du tube sous-vide.

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de rayons concentré au niveau du capteur tube sous vide comme le montre la figure (III.6):

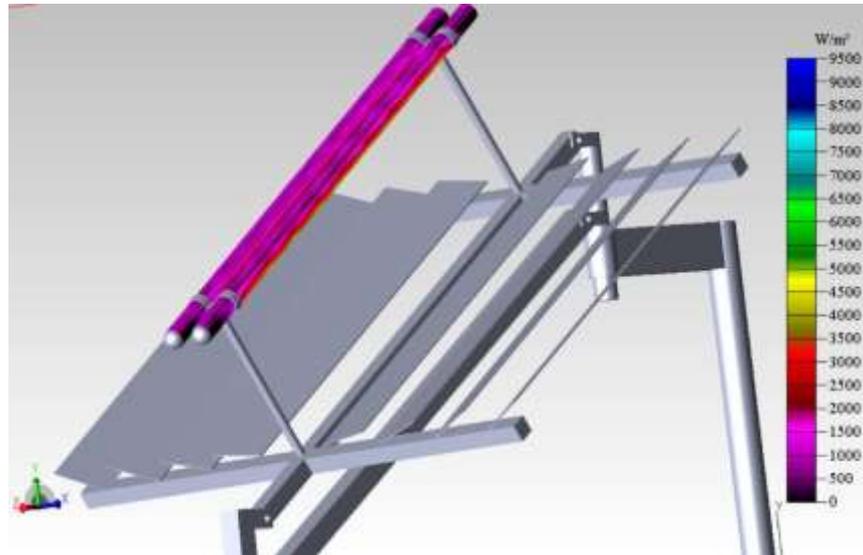


Fig.III.6 : Résultats de la simulation optique du cuiseur solaire avec son tube sous vide par logiciel TracPro.

Les résultats de la simulation réalisée montrent que l'ajout du réflecteur et d'un capteur tube sous vide permet d'augmenter l'énergie captée jusqu'à 52 fois (multiplier par 52 le rayonnement concentré moyen), dans ce cas il est de l'ordre de 52000 W/m<sup>2</sup>.

### III.4. Réalisation expérimentale du cuiseur solaire

Dans cette partie nous allons présenter les différentes étapes de la réalisation du notre concentrateur solaire à tube sous vides conçu conformément au modèle théorique étudié précédemment. Ensuite les tests entrepris sur le système seront présentés. Ce travail a été réalisé au niveau de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, Algérie.

#### III.4.1. Description du prototype

Notre réalisation, le cuiseur solaire à concentration (Fig.III.7); est formée principalement des trois parties :

## CHAPITRE III : Etude théorique, réalisation expérimentale du système de cuisson et résultats et discussion

---

- Le support (la structure porteuse) ;
- Les deux tubes sous-vides ;
- Les réflecteurs (miroirs réfléchissants).



Fig.III.7 : Réflecteur composé de deux tubes sous-vides et des miroirs réfléchissants.

### III.4.1.1. Le support

Le support est un élément qui porte et support le dispositif. Il est réalisé en cornière soudés avec l'arc électrique pour réduire le poids et faciliter la mobilité du dispositif (Fig.III.8).

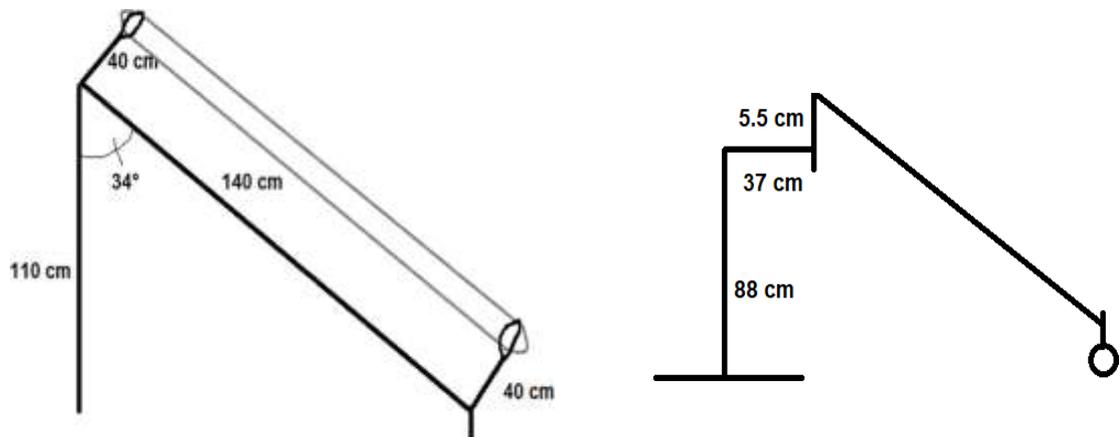


Fig.III.8 : Dimensionnement de support réalisé.

Le support est fabriqué à l'atelier de l'unité de recherche de l'URAER, il comportera sur lui (en son dessus) les 8 miroirs de Fresnel et les 2 absorbeurs tubes sous-vides. Il doit suivre la course du soleil du lever au coucher du soleil dans un intervalle de  $180^\circ$  de liberté et ceci à l'aide d'une roue fixée à la fin de support, le support peut aussi être réglé manuellement pour adapter l'angle d'inclinaison à la latitude de Ghardaïa ( $32^\circ$ ), qui est une inclinaison optimale, ou à une inclinaison égale à  $(\text{Lat}+10)$  pour une saison hivernale où la hauteur du soleil est faible..

#### III.4.1.2. Les tubes sous-vides

Les deux tubes sous-vides (Fig.III.9) sont de longueur 140 cm chaque un avec une section de 47 mm externe et de 32 mm interne, chaque un peut être rempli d'un litre de fluide caloporteur (l'huile ou de l'eau).

- Le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un tube sous vide souvent doublé.
- Le vide améliore l'isolation.



Fig.III.9 : Vue des deux tubes sous vides utilisés pour notre cuisinier.

#### III.4.1.3. Les réflecteurs (miroirs)

Le principe d'un concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans. Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur (Fig.III.10).

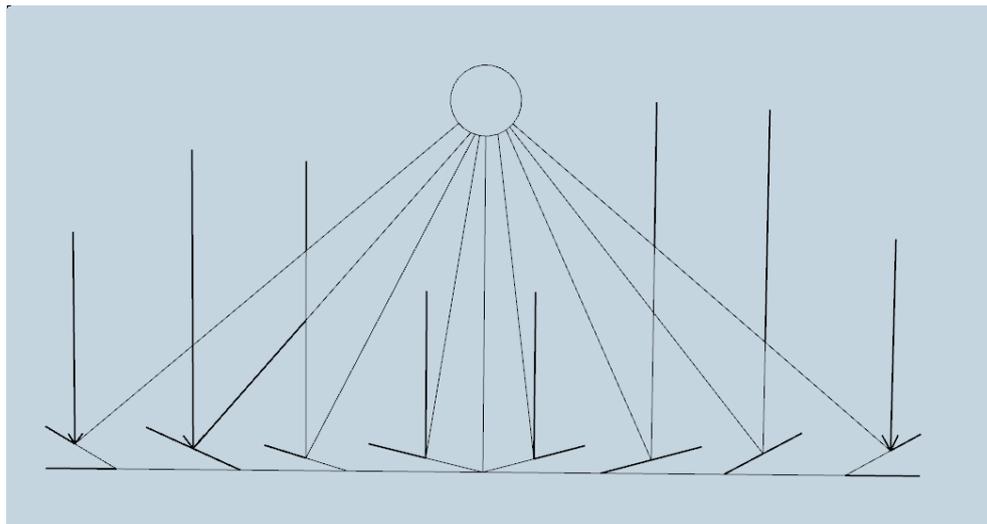


Fig.III.10 : Concentrateur de Fresnel avec huit miroirs.

### CHAPITRE III : Etude théorique, réalisation expérimentale du système de cuisson et résultats et discussion

Dans notre cas, notre concentrateur contient 8 miroirs de 115 cm x 12 cm d'une surface totale de 11 m<sup>2</sup>. La section de tube sous vide est de 47 mm et la surface concentrée absorbée par chaque tube est de 2.16 m<sup>2</sup>. Il est à noter que chaque quatre miroirs de Fresnel du cuiseur concentrent les rayons solaires en un seul tube sous vides, les quatre miroirs du coté adroit font la concentration sur le premier tube sous vides et les quatre autres de gauche concentre au niveau du second tube.

Les miroirs plans de Fresnel sont plus simples à fabriquer et meilleur marché que réflecteurs paraboliques et cylindro-paraboliques mais leurs performances optiques sont inférieures d'environ 30 % par rapport aux réflecteurs paraboliques et cylindro-paraboliques, et pour cela il faut toujours les garder très propres.

La température de foyers se augment à cause de la concentration des miroirs sur le foyer (les tubes sous vide), les rayons incidents sur les huit miroirs sont réfléchis vers les deux tubes. La figure (III.11) montre la collecte des rayons solaires reçus par le réflecteur composé. Les formules utilisées pour calculer les angles  $\alpha$  et  $\beta$  sont donnés par :

$$\theta = 90 - \alpha \quad (1)$$

$$\tan \theta = \frac{60}{40} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{180 - \theta}{2} \quad (3)$$

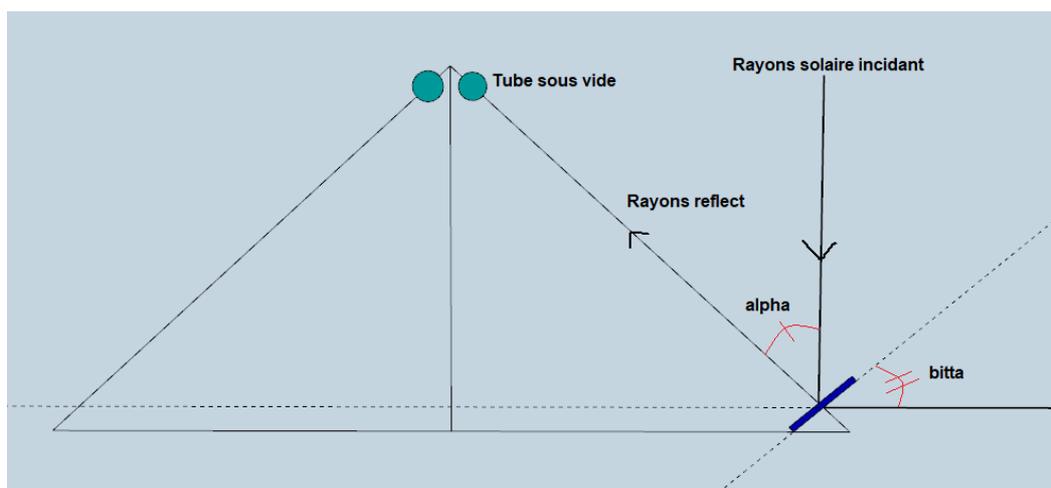


Fig.III.11 : Les angles des réflecteurs par rapport aux tubes sous vides.

### III.4.2. Implémentation des thermocouples

En physique, les thermocouples sont utilisés pour la mesure de températures. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Dans notre réalisation (Fig.III.12), nous avons utilisé des thermocouples de type K, leurs composition est de : Chromel (alliage nickel + chrome) / Alumel (alliage nickel + aluminium (5%) + silicium), ils permettent des mesures dans une gamme de température large compris entre  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Fig.III.12 : Les thermocouples de type K utilisé à L'URAER-CDER.

Les thermocouples sont insérés et immergés (Fig.III.13) à l'intérieur des deux tubes sous vides pendant toute la durée des tests pour mesurer manuellement les températures instantanées du fluide (chaque 5 minute).

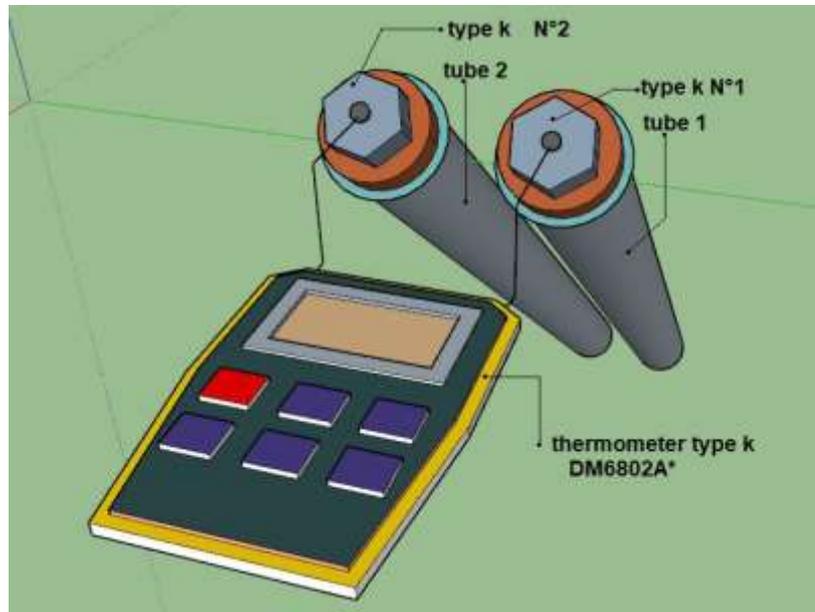


Fig.III.13 : Installation des thermocouples et d'un thermomètre.

### **III.5. Les tests effectués, résultats obtenus et discussion**

Précédemment, nous avons étudié le cuiseur solaire et présenté sa réalisation illustrée avec des photos. Après avoir fini de réaliser le système de cuisson solaire, nous avons effectué quelques tests afin de connaître son fonctionnement et de prouver son efficacité. Dans cette partie, nous allons présenter les résultats des tests effectués sur notre système.

#### **III.5.1. Evaluation de la température au niveau du foyer**

Afin d'avoir une idée sur la valeur de températures du fluide caloporteur de notre cuiseur solaire (Fig.III.14), nous avons rempli les tubes sous vides avec différents types de fluide caloporteur (eau, huile thermique). A l'intérieur de chaque tube, nous avons inséré un thermocouple type K, après avoir orienté le concentrateur vers le soleil, nous avons commencé notre série de test :



Fig.III.14 : Réflecteur Fresnel du nouveau cuiseur solaire.

### **III.5.1.1. Test N°1 – Utilisation de l'eau comme fluide caloporteur**

Pour notre premier test, nous avons le cuiseur pendant la journée de 08 Juin 2021, qui était une journée à temps moyenne (mi-clair).

On a rempli chaque tube avec 1 litres d'eau et les tests ont été réalisées entre 14 :00h jusqu'à 15 :40h. A chaque 5 min on prélève les températures de chaque tube séparément et après chaque 10 min on rectifie l'orientation du cuiseur pour le pointé vers le soleil.

La température a pris 01 heures pour atteint les 100°C (Fig.III.15) en raison du rayonnement direct normale qui était de valeur très faible (Fig.III.16). L'ébullition de l'eau à commencer avec l'apparition de la vapeur et nous avons remarqué que les températures étant presque les même dans les deux tubes durant ce premier test, ce qui est un bon signe et qui signifie que les angles sont calculés d'une manière correcte et que les deux tubes reçoit la même quantité d'éclairement, ce qui permet une cuisson homogène.

On remarque après le premier test que l'eau s'évapore à partir des 100°C et la température reste fixe stagnée à 100°C. C'est pour cela on ne peut pas déduire les températures maximales que peut atteindre de type de cuiseur utilisant de l'eau comme fluide caloporteur (Test N°1), pour cela nous avons opté pour une autre solution qui consiste au test N°2 ci-après.

### CHAPITRE III : Etude théorique, réalisation expérimentale du système de cuisson et résultats et discussion

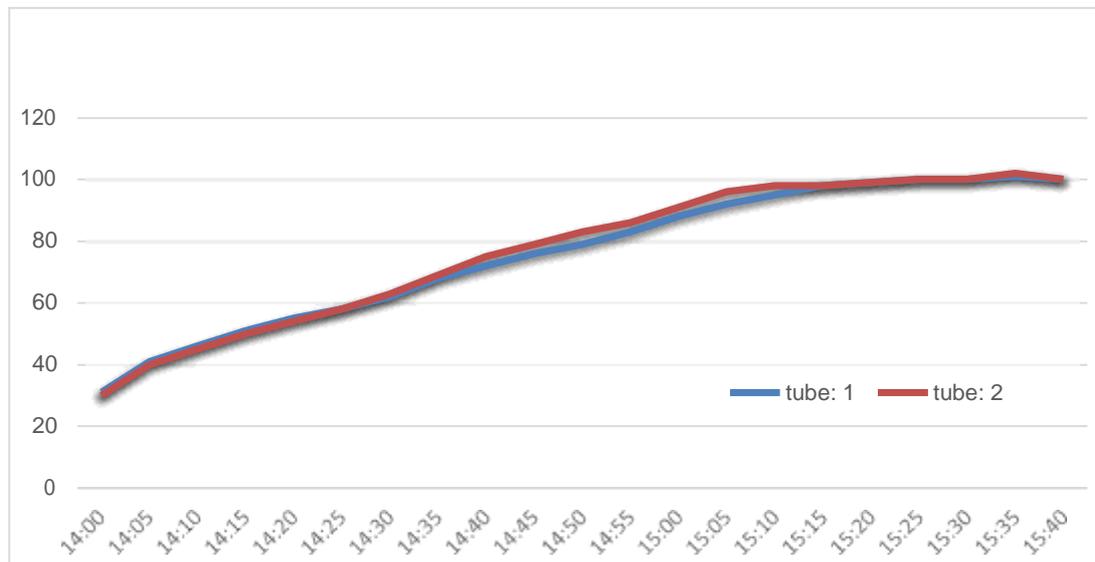


Fig.III.15 : Evolution de la température de l'eau dans les deux tubes séparément.

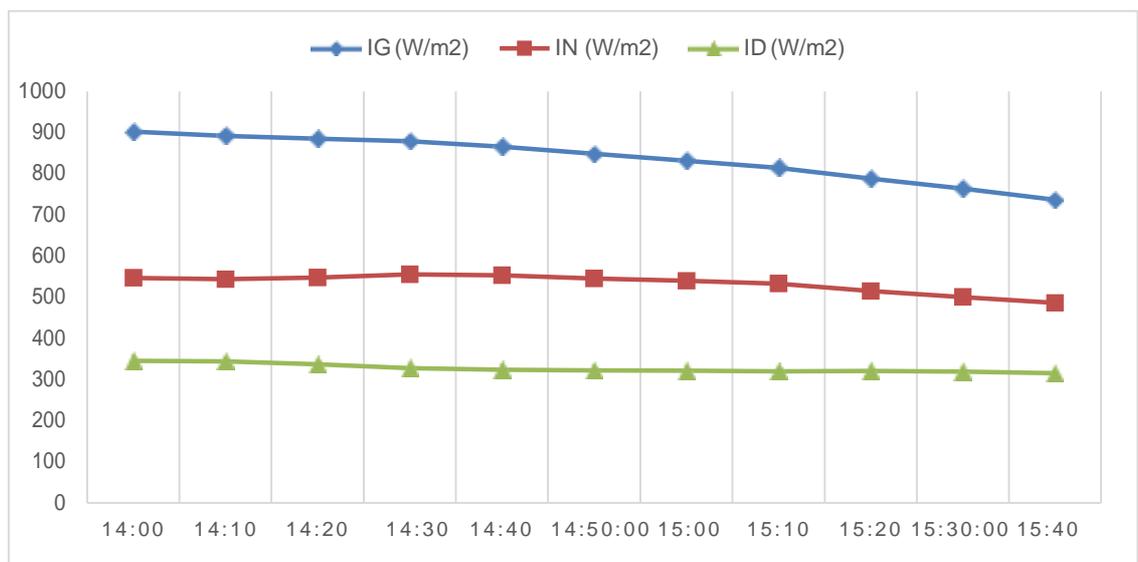


Fig.III.16 : Evolution des valeurs du rayonnement solaire direct, direct normal et global de la journée du 08 Juin 2021.

### III.5.1.2. Test N°2 –Utilisation d’une huile synthétique comme fluide caloporteur

Dans ce second test, nous avons utilisé un autre fluide caloporteur qui est une huile de synthèse thermique qui a des caractéristiques convenables pour notre test (peut supporter des températures plus élevés), et pour pouvoir faire une comparaison entre les deux fluides caloporteurs, nous avons rempli le premier tube par de huile et le deuxième tube par de l’eau.

Nous avons établi le test pendant la journée du 09 Juin 2021 du 10:20h jusqu’à 13:00h et à chaque 5 min on prélève les températures de chaque tube séparément d’une manière manuelle (Fig.III.17) et à chaque 10min on ajuste le cuiseur pour une orientation vers le soleil. Nous avons remarqué que la journée était claire et les résultats été complètement différentes du premier test (Fig.III.18).

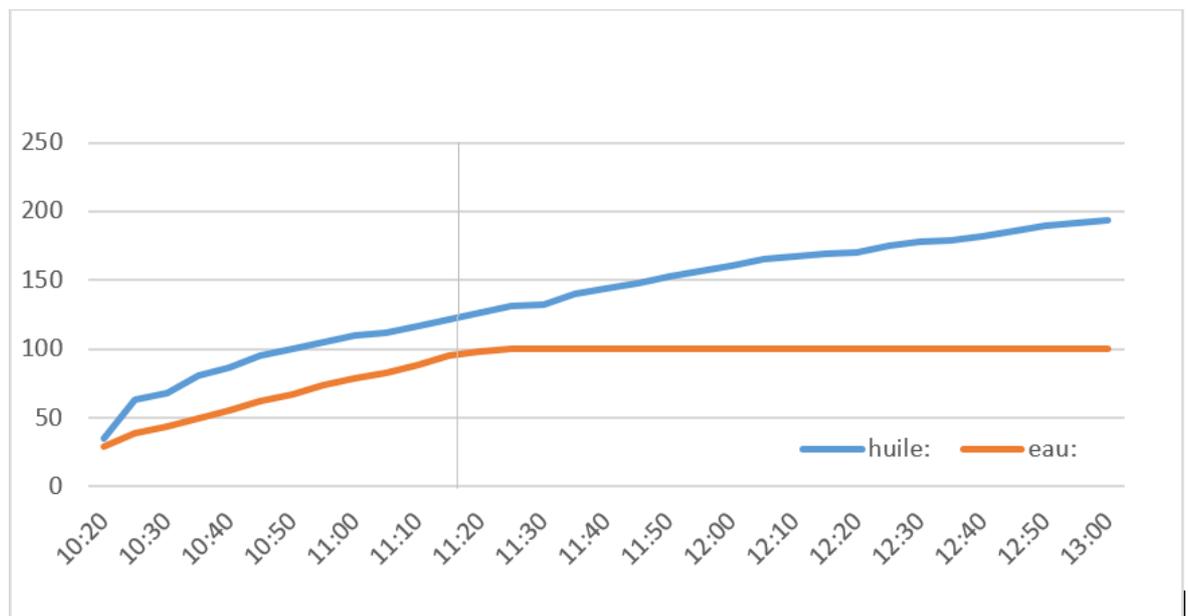


Fig.III.17 : Evolution de la température des deux fluides dans les deux tubes séparément.

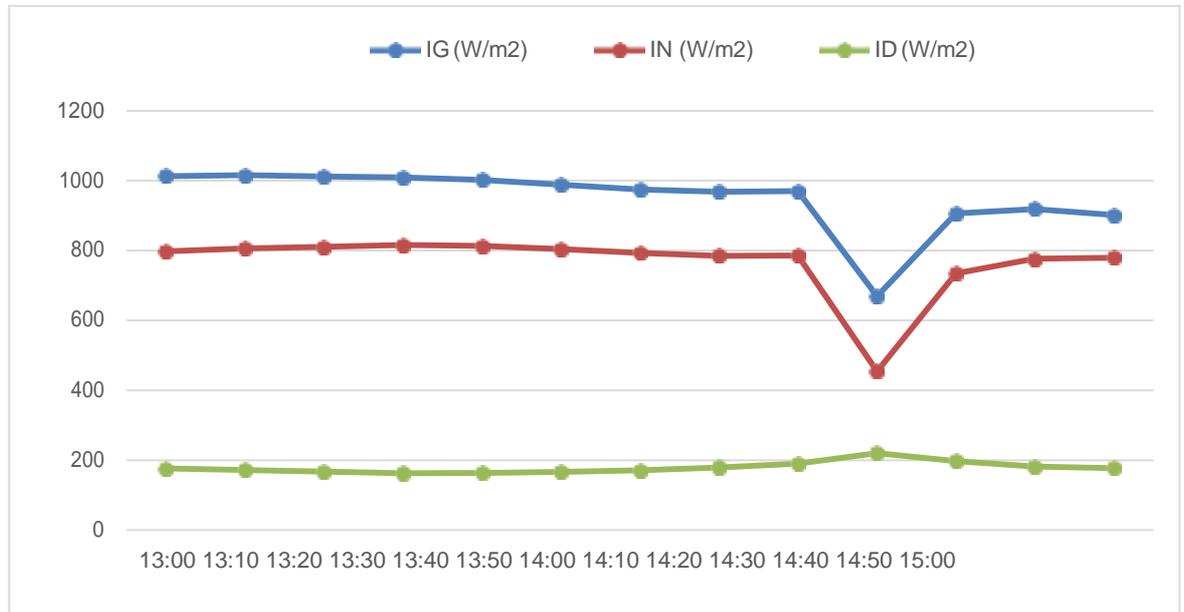


Fig.III.18 : Evolution des valeurs du rayonnement solaire direct, direct normal et global de la journée du 09 Juin 2021.

Les deux fluides ont commencé presque à se chauffer presque à la même température, qui est une température ambiante d'environ 30°. Après avoir passé une heure de test, l'eau commence à s'évaporer à température de 100°C, par contre l'huile a pris 20 minutes de temps pour atteindre les 100°C. La température de l'huile continue ensuite à augmenter pendant l'heure et demi qui a suivi pour atteindre les 200°C (Fig.III.17) correspondant à une valeur d'éclairement direct normal de 800 W/m<sup>2</sup> (Fig.III.18). A cette valeur de température, nous avons arrêté le test à cause du bruit entendu à l'intérieur de tube (qui serait signe de claquage du tube sous vide) et qui risque d'endommager le tube. L'huile a été ensuite évacuée et un premier constat visuel indique que sa couleur avait changée et l'huile était complètement brûlée (Fig.III.19).

Pendant ce test on a déduit qu'il ne faut pas dépasser les températures maximales du fluide caloporteur car il y a un risque de perte de ces caractéristiques physiques et ne sera plus réutilisable.



Fig.III.19 : Illustration de différence entre la couleur de l'huile avant le début du test (à gauche) et après la fin du test (à droite).

### III.5.1.3. Test N°3 – Refroidissement des tubes sous vides

Et comme suite du test et après avoir atteint les 200°C, nous avons posé les tubes à l'ombre et continué à relever les valeurs des températures dans le but d'avoir une idée sur la capacité de stockage de cette l'huile et combien faut-il de temps pour leurs refroidissement. Le résultat obtenu est présenté sur la figure (III.20) suivante :

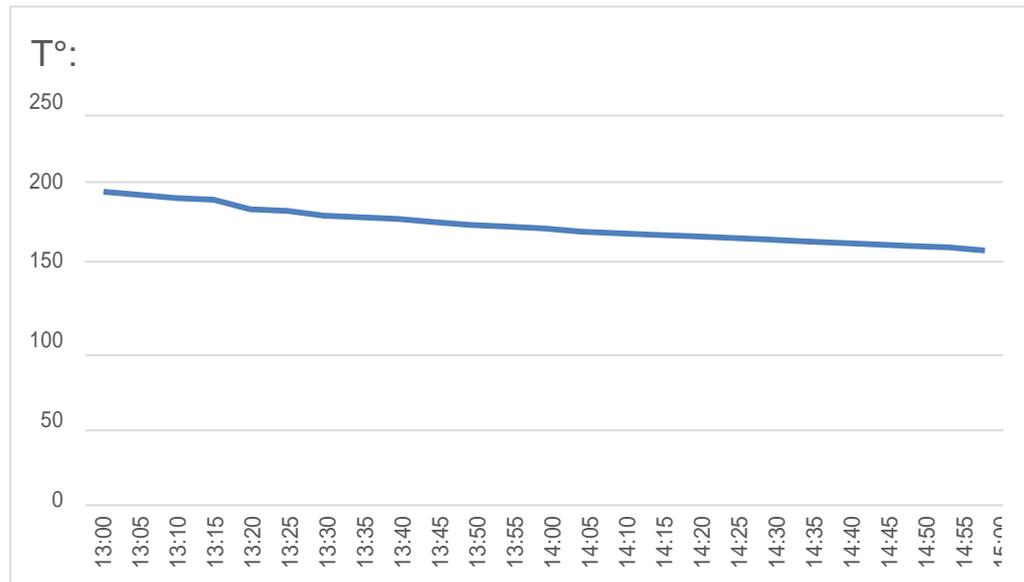


Fig.III.20 : Relevé des températures, en fonction du temps ; du fluide caloporteur situé à l'intérieur des tubes sous vide et posé à l'abri de l'éclairement.

Après une longue durée d'exposition de cuiseur au soleil de 13 :00h à 15 :00h, nous avons remarqué que l'huile utilisée à une bonne efficacité pour garder et stocker l'énergie thermique pendant une longue durée ; une perte de 1°C de température correspondant à un temps d'une minute. On peut dire que l'idée d'utiliser un réflecteur Fresnel et des tubes sous vide avec de l'huile de synthèse semble une solution très efficace pour la réalisation d'un cuiseur de haute qualité avec une gamme de cuisant importante.

### III.5.2. Evaluation de la température à l'aide d'une caméra thermique

Afin de confirmer et valider les températures mesurées au niveau des tubes sous vides durant le deuxième test, qui sont des températures très élevées ; nous avons pensé à utiliser un second appareil de mesure qui nous servira de référence, nous avons opté pour une caméra thermique infrarouge. Un aperçu de la mesure manuelle de la température à l'intérieur d'un tube sous vide utilisant un enregistreur ordinaire est illustré sur la figure (III.21) et un aperçu de la mesure de cette température à l'aide d'une caméra infrarouge est illustré sur la figure (III.22). Un simple examen de l'évolution des températures indique que ces dernières sont presque identiques, ce qui confirme l'exactitude de nos mesures.



Fig.III.21 : Evolution de la température de l'huile mesurée au cours du 2<sup>ème</sup> test.

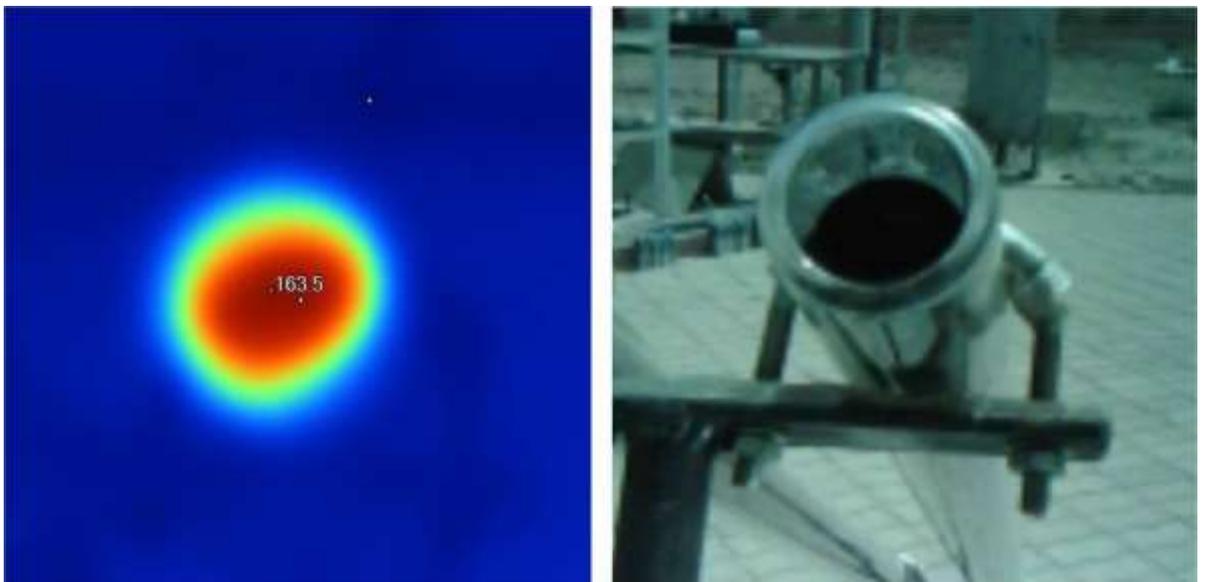


Fig.III.22 : Mesure des températures du fluide caloporteur situé à l'intérieur d'un tube sous vide à l'aide d'une caméra thermique.

### **III.6. Conclusion**

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté la partie expérimentale de notre travail, commençant par la description du cuiseur de type capteur sous vide et son principe de fonctionnement, ensuite nous avons élaboré une simulation optique de la répartition des rayons solaires sur le foyer du cuiseur (tube sous vide) en utilisant le logiciel TracePro, précédé d'une conception du design à l'aide du logiciel Solid Works. Arrivée à la réalisation des différentes parties du cuiseur suivant plusieurs étapes et en fin des tests sont entrepris et leurs résultats sont discutés pour vérifier le bon fonctionnement du cuiseur à concentration et sa faisabilité de cuisson pour divers types de nourritures à des hautes gammes de températures comme les fritures et les grillades qui nécessitent des températures supérieures à 100 °C.

---

# Conclusion Générale

### CONCLUSION GENERALE

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

La réalisation de n'importe quel dispositif passe par plusieurs étapes, commençant par l'étude théorique, simulation numérique, conception mécanique et réalisation pratique. Dans ce contexte et dans le cadre de ce travail, on s'est proposé de faire la réalisation d'un nouveau design de cuiseur solaire de type capteur tube sous vide muni de miroirs à concentration d'énergie mobiles de type Fresnel. Cette nouvelle configuration permet d'améliorer les performances du cuiseur et résout quelques problèmes liés à la cuisson solaire à savoir ; les rendements minimes à cause des faibles températures.

Après une étude bibliographique et un état de l'art sur les systèmes à cuisson solaire, leur développement et leur utilisation à travers le monde, nous avons commencé par l'étude détaillée de notre problématique. Une conception mécanique du cuiseur proposé à l'aide du logiciel SolidWorks est ensuite établie, puis une simulation optique de la répartition des rayons solaires sur l'absorbeur du cuiseur est effectuée en utilisant le logiciel TracePro et en fin la réalisation du cuiseur solaire à concentration est entamée au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaia.

Des tests ont été réalisés pour avoir une idée sur le comportement et efficacité du cuiseur et aussi la faisabilité de cuisson de divers aliments à des températures relativement élevés. Les résultats ont montrés une efficacité remarquable et encourageante à introduire ce genre de technologies et leurs applications en Algérie.

L'Algérie a commencé dernièrement à s'introduire dans le solaire thermique à plusieurs échelles en coopération avec des sociétés étrangères, mais l'investissement reste encore minime par rapport à son potentiel énorme en énergie solaire. Pour cela, il est important que le pays commence à maîtriser ces technologies pour pouvoir à terme, équilibrer sa

## CONCLUSION GENERALE

---

consommation en introduisant de plus en plus l'énergie solaire thermique et des énergies renouvelables en terme général. Et comme perspectives et en continuation de ce travail, toujours dans le domaine du solaire thermique, nous comptant faire la réalisation de la boîte de cuisson qui sera située au sommet du cuiseur et liée aux tubes sous vides avec des articulations adéquates, le cuiseur pourra aussi contenir un système de stockage afin d'assurer la cuisson pendant les temps nuageux ou durant la nuit.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] TRAORE Massitan, GESTION DU SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE D'UNE ALIMENTATION PRIVEE CONNECTE AU RESEAU UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA,2017.
- [2] BOUHAMIDA Mohammed Abdeldjalil et HENICHI Ismail. Etude et conception d'un cuiseur solaire a reflecteur compose (CPC) avec tubes sous vide, Université de Ghardaïa 2020
- [3] Yakhelef Yasser et Mehdaoui Adel, Contribution à la détermination expérimentale des performances thermiques d'un cuiseur solaire parabolique. 2018/2019.
- [4] DJEBARA AMEL et GUETTAF ZINEB, Etude comparative entre deux cuiseurs solaires testés sous conditions climatiques de Ghardaïa. 2018-2019.
- [5] YETTOU Fatiha, Conception et réalisation d'un système de cuisson solaire destiné au site saharien (Ghardaïa, Algérie), 2014/2015.
- [6] <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>  
Consulté le :22-05-21      publié le : 12-08-11.
- [7] <https://enercitif.org/le-changement-climatique/> Consulté le : 21-05-21    publié le : 14-09-17.
- [8] <https://www.veolia.com/fr/newsroom/press-day-2018/comment-repondre-une-demande-energetique-qui-va-augmenter-de-30-pourcent-d-ici-2040#:~:text=Explosion%20%C3%A9mographique%2C%20essor%20des%20classes,30%25%20entre%202017%20et%202040.> Consulté le : 25-05-21      publié le : 04-02-17.
- [9] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-solaire-6679/>. Cosulte le : 26-05-21 publié le :14-11-19.
- [10] <https://homenergie.maison-travaux.fr/homenergie/gestion-energetique-home-energie/solaire-home-energie/lenergie-solaire-avantages-inconvenients-fp-2-250255.html>  
Consulté le : 20-05-21      publié le : 26-07-18.
- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation#notes>. Consulté le : 20-05-21      publié le : 14-04-20.
- [11] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [12] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil> Consulté le :06-06-21    publié le :07-04-19.

- [13] HADJ BELKACEMI Mohammed, Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé 2010/2011.
- [14] MISSOUM MOHAMMED, Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie.2010-2011
- [15] <https://www.cuiseur-solaire.com/sun-oven-four-solaire/> Consulté le : 25-05-21 publié le : 22-12-18
- [16] <https://www.automation-sense.com/blog/actualites/cuiseur-solaire.html> Consulté le : 25-05-21 publié le : 04-02-17
- [17] RADJEM Abelhaithem et BOUHAMIDA Oussama, Etude comparative de plusieurs modèles d'estimation de l'éclairement solaire par ciel clair en Algérie,2019/2020.
- [18] Mme YETTOU Fatiha ep GAMA, OPTIMISATION D'UN SYSTEME SOLAIRE DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE.2008.2009
- [19] KHENNOUFA Ahmed Oussama LACHIBI Belgacem, Etude d'un cuiseur solaire 2017- 2018.
- [20] <https://fr.dreamstime.com/illustration-stock-latitude-longitude-coordonn%C3%A9es-image60730680>. Consulté le : 05-06-21 publié le : 04-02-17
- [21] <http://www.meridienne.org/atelier/glossaire/angle-horaire/> Consulté le : .05-06-21 publié le : 04-06-14
- [22] <http://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2014/10/cartegeographiqueGHARDAIA.html>
- [27] F. Yettou, A. Gama, B. Azoui et A. Malek, « Etude comparative entre deux types de cuiseurs solaires boîtes en milieu aride, » Revue des Energies Renouvelables, vol. Numéro spécial SIENR'12, pp. 233-245, 2012.