

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement
/...../...../...../...../.....



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الالية والكهروميكانيك
Département de d'automatique et électromécanique
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine: Sciences et Technologie
Filière: Energies Renouvelables
Spécialité: Energies Renouvelables en Electrotechnique

Thème

Étude expérimentale approfondie d'un cuiseur solaire concentrateur

Présenté par :

Riyad ZERBANI

Oussama Mohammed YAGOUB

Soutenue publiquement le 11/06/2022

Devant le jury composé de:

Prénom et nom	Grade	Université	Président
Fatiha YETTOU	Directeur de Recherche	URAER. Ghardaïa	Encadrant
Abdelouahab Benseddik	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	Examinateur
Aissaoui Faris	MCB	Université de Ghardaïa	Examinateur

Année universitaire 2021/2022

Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes chers parents
qui ont toujours suractivé en moi cette
flamme*

d'espoir et je leurs dis :

Merci de m'avoir donné une bonne éducation.

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

Merci pour tout.

*Je remercie le bon Dieu d'avoir ma sœur
Maria et mon frère Omar Farouk qui m'ont
aider à accomplir ce travail ainsi qu'à mes
cousins Meriem et Karim en FRANCE.*

A toute la famille : ZERBANI et BEN ARFA

Enfin le mérite de ce travail revient à toutes

les personnes qui ont

participé à sa réalisation et aux quelles

j'exprime ma profonde

reconnaissance et mes vifs remerciements.

Riyad

Dédicaces

*Je dédie ce modeste Travail à
Aux les plus précieux les plus chers, et les plus
proches à mon cœur. Mes parents Lakhdar et
Nacira qui j'aimerais beaucoup ; et qui ne
cesse pas de me soutenir, m'encourager et être
derrière moi le long de mon parcours d'étude
Que dieu vous protège et vous procure une
longue vie*

*A ceux que j'aime beaucoup et qui m'a
: soutenue tout au long de Ce projet*

A Ma sœur :LINA

Et mon frère :ABEDRAZAK

*A tous mes grandes familles : YAGOUB et
DAHEUR on cher grand-père*

*Une sincère remerciement à toi. Que dieu te
.procure Une bonne santé et longue vie
A ma binôme Riyad et toute la famille
ZERBANI.*

A mes chères amies

*ET A tous les membres de notre promo
Merci pour tous les bons moments passés
ensemble.*

Oussama Mohammed

REMERCIEMENTS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Au nom de dieu le clément le miséricordieux

Avant tout remerciement, louange à ALLAH

C'est avec le plus grand honneur que nous avons réservé l'ouverture de notre projet en signe de gratitude et de reconnaissance à l'égard de tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet fin d'étude.

"De nos jours, toutes les études pour la réalisation de travaux se concrétisent grâce à une parfaite collaboration, un travail coopératif assure une bonne circulation de l'information et aussi un suivi sérieux et permanent de l'étude en question"

"En premier lieu, Nous tenons à remercier notre promotrice Dr. YETTOU Fatiha, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa. Elle nous a guidé dans notre travail et nous a aidé à trouver des solutions pour avancer"

"Nous voudrions tout d'abord adresser toute nos gratitude à Dr GAMA Amor, Directeur de Recherche et Directeur de la division MCS à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, pour sa patience, sa disponibilité et surtout son aide "

"Nous remercierons également le Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa); qui nous a permet de réaliser ce travail au sein de l'URAER ainsi que pour son bon accueil"

"Nous tenons à saisir cette occasion pour adresser nos profonds remerciements aux responsables et aux personnels de l'Université de Ghardaïa et surtout à Mr Hamed BOUKHARI pour les efforts déployés pour nous aider"

Enfin, nos parents, nos familles, nos enseignants et collègues, et tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réussite de ce travail trouvent à travers ces quelques lignes l'expression de notre profonde gratitude pour leur soutien et leurs encouragements à tous les instants.

Un grand merci à tous.

ملخص

الطاقة الشمسية هي المصدر الرئيسي للطاقة على سطح كوكبنا ، وهي طاقة نظيفة ومتجددة . يستمر البشر في ابتكار تطبيقات للاستفادة منها لتلبية احتياجات الطاقة المختلفة. سنتحدث في هذه المذكرة عن استخدام الطاقة الشمسية للطهي باستخدام طباح شمسي في غرداية وفقاً للمعايير والمقاييس الدولية. تم (URAER) مكثف مكافئ، مصنوع في وحدة البحث التطبيقي في الطاقات المتجددة إجراء دراسة معمقة لاختبارات مختلفة بتركيبات مختلفة لاختبار كل من جدوى وفائدة الطهي باستخدام هذا النوع من المواقد وللتمكن من تحسين الأداء الحراري.

الكلمات المفتاحية: الإشعاع الشمسي ، الموقد الشمسي المكافئ ، الدراسة المعمقة ، الاختبارات التجريبية ، تحسين الأداء الطاقوي.

Résumé

L'énergie solaire est la principale source d'énergie à la surface de notre planète c'est une énergie propre, renouvelable et gratuite. Les humains continuent d'inventer des applications pour en bénéficier afin de répondre aux différents besoins énergétiques. Dans ce mémoire, nous parlerons de l'utilisation de l'énergie solaire pour la cuisson à l'aide d'un cuiseur solaire concentrateur parabolique, réalisé à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) de Ghardaïa selon les normes et les standards internationaux. Une étude approfondie de différents tests avec différentes configurations ont été effectués pour tester aussi bien la faisabilité et rentabilité de la cuisson à l'aide de ce type de cuiseur et pouvoir améliorer ces performances thermiques.

Mots-clés: rayonnement solaire, cuiseur solaire parabolique, étude approfondie, tests expérimentaux, amélioration des performances.

Abstract

Solar energy is the main source of energy on the surface of our planet. It is clean, renewable and free energy. Humans continue to invent applications to benefit from it to meet different energy needs. In this Master thesis, we will talk about the use of solar energy for cooking using a parabolic concentrator solar cooker, made at the Applied Research Unit on Renewable Energies (URAER) of Ghardaïa, according to the international standards. An in-depth study of different tests with different configurations have been carried out to test both the feasibility and profitability of cooking using this type of cooker and to be able to improve these thermal performances.

Keywords: solar radiation, parabolic solar cooker, in-depth study, experimental tests, performance improvement.

TABLE DES MATIERES

RESUME
 LISTE DES
 FIGURES LISTE
 DES TABLEAUX
 NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE 1

**CHAPITRE I : GISEMENT SOLAIRE ET
 MODELISATION DE L'ECLAIREMENT
 SOLAIRE**

I.1.	Introduction	3
I.2.	L'énergie solaire	3
I.2.1.	Le potentiel solaire dans le monde	3
I.2.2.	Les ressources solaires en Algérie	4
I.3.	Les applications de l'énergie solaire	4
I.3.1.	Le solaire passif	4
I.3.2.	Le solaire actif	5
I.4.	Les technologies solaires à concentration	5
I.4.1.	Le principe de fonctionnement des systèmes à concentration	6
I.4.2.	Les types de concentrateurs solaires	6
I.4.2.1.	Les centrales à tour	6
I.4.2.2.	Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques	7
I.4.2.3.	Les centrales à collecteurs paraboliques	7
I.5.	Le rayonnement solaire	8
I.5.1.	Les instruments de mesure du rayonnement solaire	9
I.5.1.1.	L'héliographe	9
I.5.1.2.	Le pyranomètre	10
I.5.1.3.	Le pyrhéliomètre	10
I.6.	Modélisation du rayonnement solaire par Matlab	11
I.6.1.	Paramètres géométriques et atmosphériques	11
I.6.1.1.	Les coordonnées géographiques terrestres	11
I.6.1.2.	L'angle horaire (ω)	12
I.6.1.3.	La déclinaison du soleil (δ)	13
I.6.1.4.	La hauteur du soleil (γ_s)	14
I.6.1.5.	L'azimut du soleil (χ_s)	14
I.6.1.6.	Masse atmosphérique	14
I.6.1.7.	Épaisseur optique de l'atmosphère	15
I.6.1.8.	Facteur de trouble de Linke	16
I.6.2.	Rayonnement solaire incident sur un plan	17
I.6.2.1.	Eclairement hors atmosphère	17
I.6.2.2.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	18
I.6.2.3.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	19
I.6.2.4.	Angle d'incidence	19
I.6.2.5.	Eclairement direct incident sur le plan quelconque	20

I.6.2.6.	Eclairement diffus incident sur le plan quelconque	20
I.6.2.7.	Calcul du rayonnement global	21
I.6.3.	Validation des résultats obtenus après modélisation	21
I.6.3.1.	Comparaison entre valeurs du rayonnement solaire	21
I.6.3.2.	Validation et discussion des résultats	22
I.7.	Conclusion	23

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES A CUISSON SOLAIRES ET DETERMINATION DES PERFORMANCES DU CUISEUR

II.1.	Introduction	24
II.2.	Historique de la cuisson solaire	24
II.3.	Principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire	27
II.4.	L'état de l'art et les modèles de base des cuiseurs solaires	28
II.4.1.	Le cuiseur à panneaux	28
II.4.2.	Le cuiseur de type boîte	28
II.4.3.	Le cuiseur parabolique	28
II.5.	Les températures et temps de cuisson	29
II.6.	Classification des cuiseurs solaires	31
II.6.1.	Les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur	32
II.6.2.	Cuiseurs solaires type direct	32
II.6.3.	Cuiseurs solaires boîte	32
II.6.4.	Cuiseurs solaires à concentration	33
II.6.5.	Cuiseurs solaires type indirect	34
II.7.	Cuiseurs solaires avec stockage de chaleur	35
II.7.1.	Stockage avec chaleur sensible	35
II.7.2.	Stockage par chaleur latente	36
II.8.	Les avantages et les inconvénients des cuiseurs solaires	36
II.8.1.	Les avantages des cuiseurs solaires	36
II.8.2.	Les inconvénients des cuiseurs solaires	37
II.9.	Présentation du lieu de stage	37
II.9.1.	Site de Ghardaïa	37
II.9.2.	Aperçu sur l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER)	38
II.9.3.	Equipe Mini Centrales Thermodynamiques	38
II.9.4.	Données utilisées	39
II.10.	Méthodologies de test et d'évaluation des performances thermiques d'un cuiseur	40
II.10.1.	Evaluation des performances selon les paramètres des Normes Indiennes	40
II.10.1.1.	Détermination du paramètre 'First figure of merit'	40
II.10.1.2.	Détermination du paramètre 'Second figure of merit'	40
II.10.1.3.	Détermination du temps d'ébullition (Boiling time) et de la courbe caractéristique du cuiseur (Characteristic curve)	41
II.10.2.	Evaluation des performances selon les paramètres du Standard Européen	41
II.10.2.1.	Calcul de la puissance de cuisson (Cooking power)	41
II.10.2.2.	Calcul de la puissance de cuisson ajustée (Adjusted cooking power)	41
II.10.3.	Détermination du rendement énergétique du cuiseur	42
II.11.	Conclusion	42

**CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE
ETDISCUSSION DES RESULTATS**

III.1.	Introduction	43
III.2.	Etude expérimentale du cuiseur solaire parabolique	43
III.2.1.	Description technique du cuiseur solaire parabolique	43
III.2.2.	Temps nécessaire d'ajustement (inclinaison et orientation) du cuiseur	45
III.3.	Acquisition de données	46
III.3.1.	Montage des capteurs de mesures et installation de la chaîne d'acquisition de données	46
III.3.2.	Schéma synoptique de la chaîne de mesure	46
III.4.	Tests effectués et discussion des résultats	47
III.4.1.	Description des tests effectués et des données expérimentales utilisées	48
III.4.2.	Tests standardisés des cuiseurs	48
III.4.2.1.	Profils des températures pour des tests de stagnation et de chaleur sensible	48
III.4.2.2.	Différence de température d'eau	50
III.4.2.3.	Profils des températures pour des tests relatifs à l'influence du vent	51
III.4.2.4.	Profils des températures pour des tests de chauffage et refroidissement	53
III.5.	Comparaison des courbes de températures	57
III.5.1.	Courbes des températures de l'eau pour différentes charges	57
III.5.2.	Courbes des températures de l'eau pour différents condition climatiques	57
III.5.3.	Courbes des températures de l'eau pour deux différents types de cuiseurs	59
III.5.4.	Quelques tests de cuissons effectués à l'aide du cuiseur concentrateur	60
III.6.	Evaluation des performances thermiques du cuiseur	62
III.6.1.	Tracé de la courbe caractéristique du cuiseur parabolique	62
III.6.2.	Paramètres caractérisant le cuiseur parabolique	63
III.6.3.	Courbe du rendement instantané	64
III.7.	Conclusion	65
	CONCLUSION GENERALE	66

Chapitre I

Figure I.1	Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire	4
Figure I.2	Carte d'éclairement solaire du monde	6
Figure I.3	La centrale solaire à tour	7
Figure I.4	Système à collecteurs cylindro-paraboliques	7
Figure I.5	Système à collecteurs paraboliques	8
Figure I.6	Le Spectre solaire	8
Figure I.7	Composants du rayonnement solaire	9
Figure I.8	Héliographe pour la mesure de l'insolation	10
Figure I.9	Pyranomètre pour la mesure du rayonnement global et diffus	10
Figure I.10	Pyrhéliomètre pour la mesure du rayonnement direct	11
Figure I.11	Illustration de vecteur des latitude-longitude-coordonnées	11
Figure I.12	Les coordonnées horaires	12
Figure I.13	Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour	13
Figure I.14	Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour	14
Figure I.15	Variation de masse d'air en fonction de hauteur soleil	15
Figure I.16	Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air	16
Figure I.17	Le Spectre solaire	17
Figure I.18	Eclairement solaire extraterrestre	18
Figure I.19	Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire	20
Figure I.20	Variations des valeurs du rayonnement solaire en fonction de temps au solstice d'été (21 Juin): (a) site de Tamanrasset; (b) site de Ghardaïa.	21
Figure I.21	Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été	22
Figure I.22	Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver	22

Chapitre II

Figure II.1	Barbara Kerr avec Sherry Cole qui est une des fondateurs de cuiseurs solaires	25
Figure II.2	Utilisation d'un modèle de cuiseurs solaires au Sénégal	25
Figure II.3	Héliodyne : premier four solaire mondial 1950 – CDER, Bouzaréah, Algérie	26
Figure II.4	Deux prototypes de cuiseurs solaires réalisés et testés à l'URER/MS – Adrar	26
Figure II.5	Prototype du cuiseur solaire boîte réalisé et testé à l'URAER – Ghardaïa	27
Figure II.6	Schéma de principe d'un cuiseur à panneaux	29

Figure II.7	Schéma de principe d'un cuiseur de type boîte	29
Figure II.8	Schéma de principe d'un cuiseur parabolique	29
Figure II.9	Tempéatures de cuisson pour les différents types de cuiseurs	29
Figure II.10	Classification des cuiseurs solaires sans et avec stockage thermique	31
Figure II.11	Cuiseurs solaires boîtes : (a) sans réflecteur, (b) avec réflecteur, (c) avec deux réflecteurs, (d) avec trois réflecteurs, (e) avec quatre réflecteurs, et (f) avec huit réflecteurs.	33
Figure II.12	Cuiseurs à concentration : (a) cuiseur a panneaux, (b) cuiseur entonnoir, (c) réflecteur sphérique, (d) réflecteur parabolique, (e) concentrateur Fresnel, et (f) concentrateur cylindro-parabolique	34
Figure II.13	Cuiseurs solaires du type indirect, (a) avec capteur plan, (b) avec capteurs sous vides, (c) avec concentrateur parabolique, (d) avec concentrateur sphérique	35
Figure II.14	Stockage par chaleur sensible :(a) avec l'huile des moteurs, (b) avec le sable	35
Figure II.15	Stockage par chaleur latente en utilisant $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	36
Figure II.16	Station radiométrique de l'URAER (Ghardaïa).	39

Chapitre III

Figure III.1	Description technique du cuiseur solaire parabolique	44
Figure III.2	Schéma du cuiseur parabolique de l'URAER, Ghardaïa et les différentes composantes du rayonnement incident sur le concentrateur	45
Figure III.3	Vue du cuiseur parabolique lors d'un test du mois de Mai 2021 pris à deux heures différentes à 10:30h AM et 12:30h PM	45
Figure III.4	Visualisation des températures sur un micro-ordinateur connecte à une unité d'acquisition de donnée	46
Figure III.5	Schéma synoptique de l'installation du cuiseur solaire parabolique	47
Figure III.6	Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées au niveau du cuiseur sous des conditions de test de stagnation 28 Décembre 2021	49
Figure III.7	Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées au niveau du cuiseur sous des conditions de chaleur sensible 29 Décembre 2021	49
Figure III.8	Courbe de différence de température d'eau et l'ambiance pour le test du 10 janvier 2022	50
Figure III.9	Test montrant l'effet de la vitesse du vent (m/s) sur l'évolution des températures de l'eau (13 janvier 2022).	51
Figure III.10	Vue du cuiseur parabolique durant les tests de chauffage effectués sans et avec la boite en verre	51
Figure III.11	Test du cuiseur avec la boite vitré avec une épaisseur de 5mm et 8mm	52
Figure III.12	Comparaison des résultats des températures de l'eau avec la boite d'épaisseur de 8mm et 5mm pour une charge de 1L.	52
Figure III.13	Vue du cuiseur parabolique durant les tests de chauffage et refroidissement effectués sans et avec la boite en verre	53

LISTE DES FIGURES

Figure III.14	La variation de la température de l'eau dans un test de chauffage sensible et refroidissement sans vitre le 17 Avril 2022	54
Figure III.15	La variation de la température de l'eau dans un test de chauffage sensible et refroidissement avec vitre (5mm) le 8 Mai 2022	54
Figure III.16	La variation de la température de l'eau dans un test de chauffage sensible et refroidissement avec vitre (8mm) le 11 Mai 2022	55
Figure III.17	La variation de la température de l'eau dans un test de chauffage sensible et refroidissement avec vitre (8mm) le 12 Mai 2022	55
Figure III.18	La variation de la température de l'eau dans un test de chauffage sensible et refroidissement avec vitre (5mm) le 12 Avril 2022.	56
Figure III.19	Vue de la boîte en verre utilisée de 8 mm (intacte) et de 5 mm (cassée)	56
Figure III.20	Variations journalières des courbes des températures de l'eau pour différentes charges 1L et 2L	57
Figure III.21	Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées du cuiseur parabolique sous des conditions de ciel clair (30 Décembre 2021).	58
Figure III.22	Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées du cuiseur parabolique sous des conditions de ciel perturbé (30 Décembre 2021).	58
Figure III.23	Vue prise des deux différents types de cuiseurs testés simultanément (29 Décembre 2021)	59
Figure III.24	Variation des températures de l'eau mesurées à l'intérieur des ustensiles des cuiseurs et variation de l'éclairement solaire correspondant au (29 décembre 2021).	60
Figure III.25	Vue prise lors d'un test de cuisson des escalopes avec quelques légumes dans l'ustensile du cuiseur parabolique (le 18 Mai 2022).	61
Figure III.26	Vue prise lors d'un test de préparation d'un café dans une presse placé au foyer du cuiseur parabolique (le 18 Mai 2022).	62
Figure III.27	Courbe caractéristique des performances du cuiseur réalisé pour un éclairement solaire de 750 W/m ² .	63
Figure III.28	Rendement instantané pour deux tests effectués sur le cuiseur solaire parabolique.	64

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
φ	La latitude	Degrés
λ	Longitude	Degrés
z	L' altitude	Km
N	Numéro du jour	[-]
TSM	Temps solaire moyen	Heure
TSV	Temps solaire vrai	Heure
ω	Angle horaire	Degrés
δ	Déclinaison solaire	Degrés
ET	Equation du temps	Heure
θ_z	angle zénithal	Degrés
γ_s	Hauteur du soleil	Degrés
χ_s	Azimut du soleil	Degrés
m_A	Masse atmosphérique	[-]
δ_R	Epaisseur de Rayleigh	[-]
T_L	Facteur de trouble de Linke	[-]
T_0	Trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau	[-]
T_1	Trouble du à la diffusion moléculaire	[-]
T_2	Trouble relatif à la diffusion par les aérosols	[-]
A_{he}	Alternance hiver été	W/m ²
I_0	Constante solaire	W/m ²
ε	Correction de distance terre soleil	[-]
G_0	Eclairement solaire extraterrestre	W/m ²
IB_h	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	W/m ²
ID_h	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	W/m ²
IG_h	Eclairement global incident sur un plan horizontal	W/m ²
δ^i	Angle d'incidence	Degrés
IN	Eclairement direct normal incident sur un plan horizontal	W/m ²
IB_i	Eclairement direct incident sur le plan quelconque	W/m ²
β	Inclinaison du plan	Degrés
α	L'orientation du plan	Degrés
γ	Hauteur de la normal du plan	Degrés
ρ_g	Albédo du sol	[-]
δ_a	Composante due à l'albédo	[-]
δ_i	Composante isotrope du ciel	[-]
δ_{i^f}	Composante due à la rétrodiffusion	[-]
δ_d	Composante directe	[-]
δ_h	Composante du cercle de l'horizon	[-]
ID_a^i	Composante du diffus isotrope du sol	W/m ²
ID_i^i	Composante du diffus isotrope du ciel	W/m ²
ID_d^i	Composante du diffus directionnel	W/m ²
ID_d^i	Composante du diffus du cercle de l'horizon	W/m ²

ID_{ciel}^i	Composante du diffus du ciel	W/m ²
ID_i	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque	W/m ²
IG_i	Eclairement global incident sur un plan quelconque	W/m ²
$F'UL$	Facteur de perte de chaleur	/
$F'\eta_o$	Facteur d'efficacité optique	/
T_{wi}	Température de l'eau initiale	°C
T_{wf}	Température de l'eau finale	°C
T_a	Température ambiante moyenne de l'air	°C
I_b	Moyenne du rayonnement solaire direct	W/m ²
A_p	Surface d'ouverture de la parabole	m ²
A_t	Surface de l'ustensile de cuisson	m ²
$(MC)'_w$	Puissance calorifique combinée de l'eau	W
P	Puissance de cuisson	W
r	Intervalle de temps pendant les deux températures de T_{wi} à T_{wf}	min
τ_{boil}	Temps d'ébullition pour la période de chaleur sensible	min
E_i	Energie d'entrée du cuiseur	kJ
E_o	Energie de sortie du cuiseur	kJ
Δt	Intervalle de temps	s
W_s	La vitesse du vent	s
η	Rendement énergétique du cuiseur	%

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient des sources fossiles. Les énergies renouvelables peuvent être des solutions en raison de leur abondance et elles sont inépuisables à l'échelle de temps humain. [1]

L'énergie solaire est la ressource énergétique inépuisable la plus abondante sur Terre, elle représente la principale source d'énergie du système terre-atmosphère [2]. Notre pays dispose d'un des plus grands gisements solaires dans le monde et son utilisation imminente demeure la meilleure alternative au moment même où le gaz et le pétrole commencent d'une part à s'épuiser et d'autre part à subir une chute sérieuse des prix dans le monde.

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

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à une des applications les plus prometteuses de l'énergie solaire ; à savoir la cuisson solaire et plus particulièrement le cuiseur parabolique. En effet, le cuiseur solaire contribue à résoudre deux 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. Selon l'ONU, deux tiers de la population mondiale, c'est-à-dire deux milliards de personnes, souffrent du manque de bois. Dans les zones menacées par la déforestation, les efforts de protection échouent quand les gens n'ont pas d'alternative à la cuisson au feu de bois. Chaque cuiseur solaire peut sauver une tonne de bois par an dans les régions ensoleillées mais arides, et peut donc à cet effet éviter le dégagement d'une grande quantité de gaz à effet de serre. C'est pourquoi l'utilisation d'un cuiseur solaire peut s'avérer être la solution la plus écologique pour la cuisson des aliments. Un cuiseur solaire est une technologie qui peut fournir de la chaleur de façon naturelle et renouvelable, pour la cuisson, il utilise souvent la technique de concentration des rayons solaires et/ou le phénomène de l'effet de serre [3].

Le cuiseur solaire parabolique repose sur le principe de la concentration des rayons: le faisceau des rayons parallèles du soleil se reflète sur le miroir parabolique et les rayons convergent en un même point, le foyer de la parabole. En heurtant un récipient sombre placé en ce point, les rayons vont libérer leur énergie sous forme de chaleur [3].

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

INTRODUCTION GENERALE

- Dans le premier chapitre, nous présentons les définitions des données astronomiques et des notions relatives au rayonnement solaire couramment utilisées dans toute étude ayant relation avec le domaine solaire, ou nous allons programmer avec Matlab le modèle de calcul de l'éclairement solaire.
- Le deuxième chapitre concerne l'état de l'art des cuiseurs solaire, leurs types et principe de fonctionnement, ainsi que de leurs avantages et inconvénients. Nous aborderons aussi l'étude des performances du cuiseur.
- Le troisième chapitre résume notre étude théorique et expérimentale et éventuellement les résultats obtenus, pour cela nous nous sommes rendus à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, pour découvrir le cuiseur solaire parabolique et effectuer différents tests avec différentes configurations durant une longue période, dans le but d'une évaluation et une éventuelle amélioration de ces performances.

CHAPITRE I

Gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire

I.1. Introduction

Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire [1]. Et comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes thermique ou photovoltaïques, une description détaillée du rayonnement solaire, sa mesure directe et sa modélisation ainsi que les paramètres géométriques nécessaires pour la modélisation, feront également l'objectif de ce premier chapitre [2]. Toutes les équations présentées dans ce chapitre ; pour l'estimation des composantes directes et diffuse de l'éclairage solaire sur un plan horizontal et incliné, ont été programmées sous environnement Matlab. Les graphes illustrés sont issus de la programmation par Matlab du modèle Capderou [3].

I.2. L'énergie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique du Soleil qui traverse l'atmosphère et en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre [4]. L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est pratiquement inépuisable à l'échelle du temps humain, ce qui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour) [5].

L'un de ses avantages les plus importants est que [6] :

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

I.2.1. Le potentiel solaire dans le monde

Les technologies solaires qui utilisent des systèmes concentrés pour produire de l'électricité nécessitent un ensoleillement direct normal. En conséquence, les endroits d'exploitation appropriés sont situés dans les régions arides ou semi-arides de notre planète [15]. 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 [16].

I.2.2. Les ressources solaires en Algérie

Avec 2381741 km² de superficie, l'Algérie est le plus grand pays du méditerranéen, selon une étude de l'agence quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara, l'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre aérospatiale allemande, l'Algérie offre de plus grandes possibilités Intéressant; à long terme, investir dans des systèmes solaires thermiques. En effet l'Algérie est l'un des pays de la méditerrané qui dispose d'un potentiel solaire énorme, selon les données d'ensoleillement (Fig I.1), l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillés au monde [7]. La durée d'insolation sur la de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays, le potentiel des ressources solaires de notre pays est donc optimal pour l'exécution des projets solaires [8].

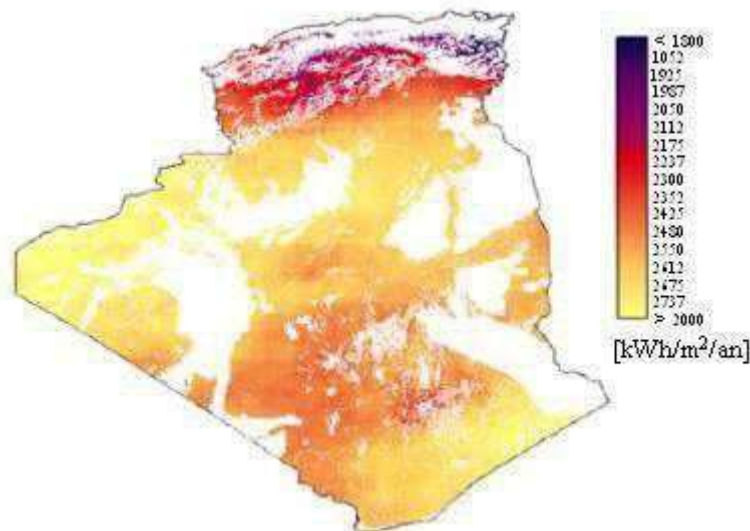


Fig I.1: Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire [37].

I.3. Les applications de l'énergie solaire

I.3.1. Le solaire passif

L'énergie solaire passive fait référence à toutes les techniques dans lesquelles la chaleur solaire peut être trouvée utilisée sur site, sans être rejeté par un fluide 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 des bâtiments et l'installation d'éléments de construction permettant utiliser le rayonnement solaire, tant pour l'éclairage naturel

que pour le chauffage des espaces de vie. 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 avancés, ils ne nécessitent pas de système de chauffage. Ces maisons utilisent principalement les apports solaires, mais elles font également appel aux principes comme ceux de l'inertie thermique du bâtiment, l'éclairage naturel, l'ombrage en été, etc [15].

I.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. Un autre exemple est celui qui utilise les centrales électriques solaires [15].

I.4. Les technologies solaires à concentration

Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et 2000°C, avec un rendement supérieur à 70%. Cette chaleur primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés de transformation ou de synthèse de matériaux ou bien être convertie en vecteur énergétique comme l'électricité ou l'hydrogène. La ressource est ici le rayonnement solaire direct, qui représente entre 50% et 90% de la totalité du rayonnement solaire. La partie diffuse n'est en effet pas collectée par les dispositifs à concentration. Plus abondante dans une zone géographique appelée communément carte d'éclairement solaire indiquée sur (Fig I.2) la ressource en rayonnement solaire direct est considérable à l'échelle planétaire [9].

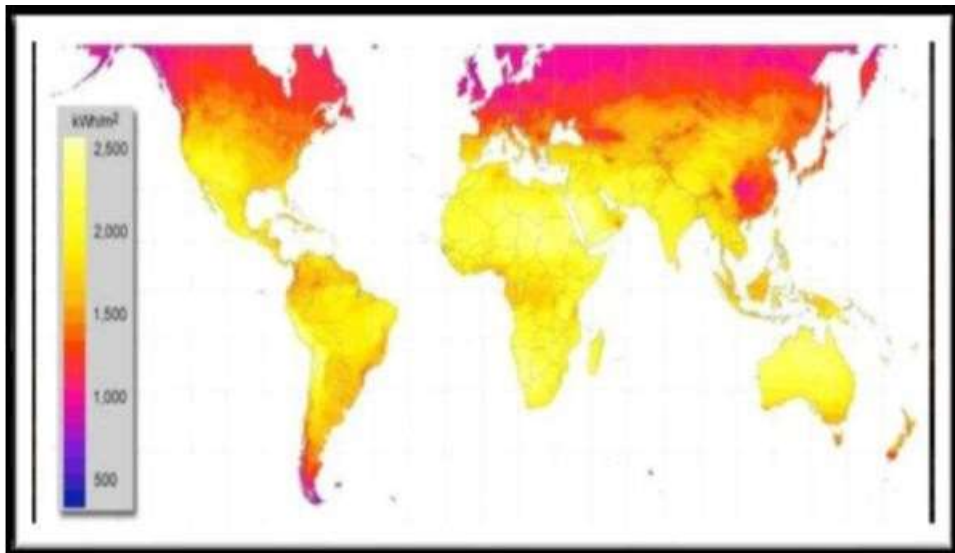


Fig I.2: Carte d'éclairement solaire du monde [14].

I.4.1. Le principe de fonctionnement des systèmes a concentration

Un capteur à concentration est un capteur solaire comportant un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement reçu. Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200 °C et 2000 °C, avec un rendement supérieur à 70 %. Cette chaleur primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés industriels, par exemple sous forme de vapeur d'eau, ou pour effectuer des transformations ou des synthèses de matériaux, ou bien être convertie en vecteurs énergétiques comme l'électricité ou l'hydrogène . Le temps de retour énergétique des installations solaires à concentration est de 5 mois et leur durée de vie est estimée entre 25 et 30ans. [9]

I.4.2. Les types de concentrateurs solaires

I.4.2.1. Les centrales à tour

Les centrales à tour (CT) (Fig I.3) sont constituées de nombreux miroirs ou héliostats concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Le facteur de concentration optique d'une installation CT varie de 200 à 1000 et le fluide caloporteur peut atteindre températures comprises entre 250 et 1000°C selon le type de réservoir et de fluide frigorigène, ce qui permet mettre en œuvre un cycle de Rankine, ou un cycle à gaz (Baryton) ou même un cycle combiné (vapeur-gaz). Elle a une capacité de production entre 10 et 200 MW [10].

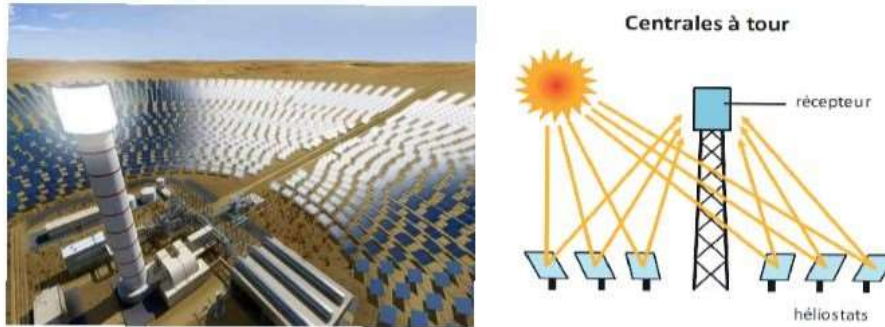


Fig I.3: La centrale solaire à tour.

I.4.2.2. Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques

Comme son nom l'indique, ce système utilise une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole (Fig I.4). La parabole focalise la lumière sur un tube récepteur positionné le long de la ligne focale du réflecteur. Les températures du récepteur peuvent atteindre (400 °C) et peuvent produire de la vapeur afin de fournir de l'électricité [11].



Fig I.4: Système à collecteurs cylindro-paraboliques.

I.4.2.3. Les centrales à collecteurs paraboliques

Les capteurs paraboliques (Fig I.5) fonctionnent d'une manière autonome. Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes pour réfléchir et concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui est monté en température sous l'effet de la concentration. Celui-ci entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000°C. Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Pour ce type de système, le stockage n'est pas possible [12].

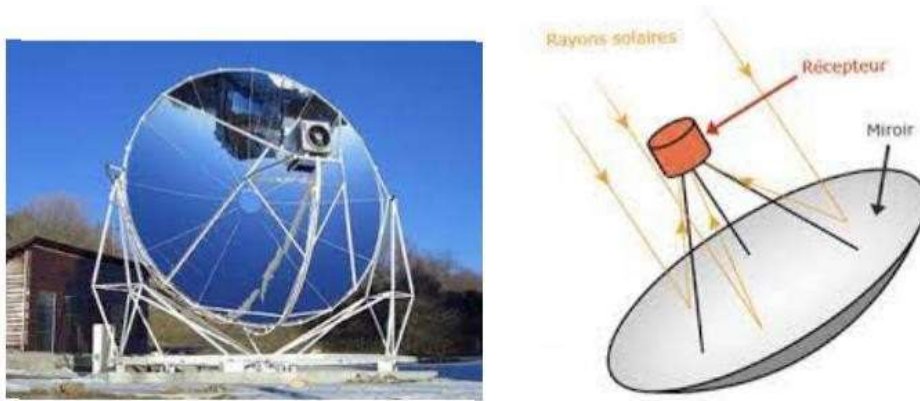


Fig I.5: Système à collecteurs paraboliques.

I.5. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire (Fig I.6) est une énergie de rayonnement émise par le soleil à partir d'une réaction de fusion nucléaire qui crée de l'énergie électromagnétique se propageant dans toutes les directions du vide avec une vitesse $3.108m/s$. Le spectre du rayonnement solaire est proche de celui d'un corps noir avec une température d'environ 5800 K. Environ la moitié du rayonnement se trouve dans la partie visible du spectre électromagnétique à ondes courtes. L'autre moitié se situe principalement dans la partie proche infrarouge, certaines dans la partie ultraviolette du spectre.

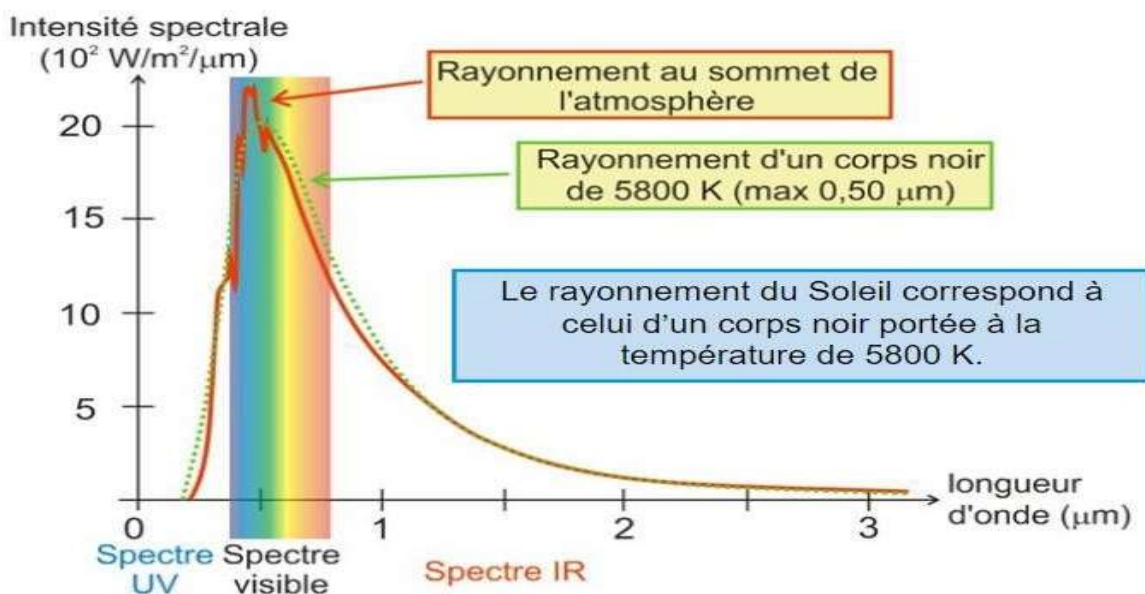


Fig I.6: Le Spectre solaire.

On décompose le rayonnement global (total) terrestre en rayonnement direct (rayonnement provenant directement du soleil) et en rayonnement diffus (rayonnement provenant de l'atmosphère). Un capteur incliné d'un angle donné sur l'horizontale subit une autre composante du rayonnement : la part renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffuse par le sol (Fig I.7)

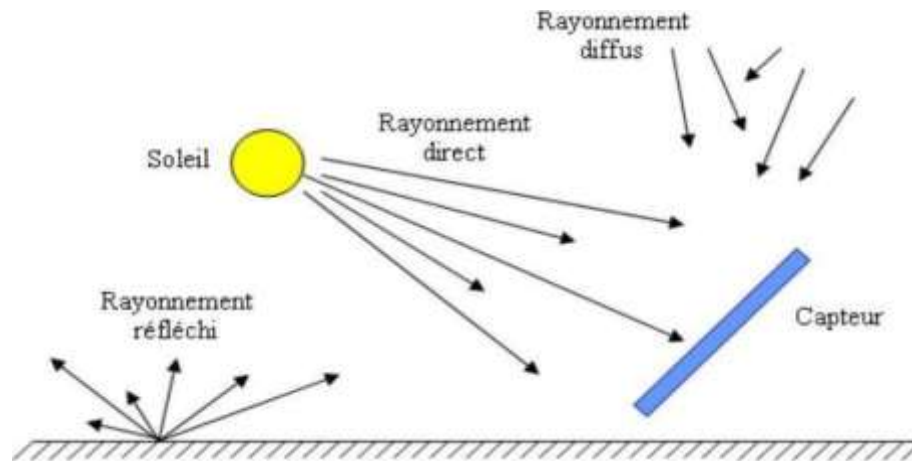


Fig I.7: Composants du rayonnement solaire.

I.5.1. Les instruments de mesure du rayonnement solaire

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

I.5.1.1. L'héliographe

L'insolation est définie comme l'intervalle de temps durant lequel le disque solaire a été visible ou pendant laquelle on pouvait observer les ombres projetées sur le sol. On l'appelle aussi la durée pendant laquelle le rayonnement direct est demeuré supérieur à une valeur internationalement admise : 120 W/m^2 . Les mesures effectuées par un Héliographe (Fig I.8) sont l'enregistrement de l'insolation en centième d'heure, la durée d'insolation est mesurée à l'aide d'héliographes en dixièmes d'heures. Une distinction est faite entre les héliographes conventionnels et automatiques [24].



Fig I.8: Heliographe pour la mesure de l'insolation.

I.5.1.2. Le pyranomètre

La mesure du rayonnement solaire global est faite à l'aide d'un pyranomètre (Fig I.9), cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie. Le domaine spectral couvert s'étend de 0.3 à 3 μm . Le rayonnement reçu est converti en chaleur par la surface noircie. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global ; elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série [13].



Fig I.9: Pyranomètre pour la mesure du rayonnement global et diffus.

I.5.1.3. Le pyréliomètre

Au sol, le rayonnement solaire direct est mesuré à l'aide d'un pyréliomètre (Fig I.10), cet instrument est constamment orienté vers le soleil et ne mesure que le rayonnement provenant du seul disque solaire. Le rayonnement capté est absorbé par une surface noire, la différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnel à l'éclairement énergétique du rayonnement direct. Pour mesurer la répartition spectrale du rayonnement solaire, on

utilise un spectroradiomètre qui fournit la densité spectrale d'éclairement énergétique du rayonnement [13].



Fig I.10: Pyrhéliomètre pour la mesure du rayonnement direct.

I.6. Modélisation du rayonnement solaire par Matlab

I.6.1. Paramètres géométriques et atmosphériques

I.6.1.1. Les coordonnées géographiques terrestres

Tout point de la surface terrestre est repérée par ses coordonnées géographiques (Fig I.11) : La longitude, la latitude, ainsi que par son altitude [2].

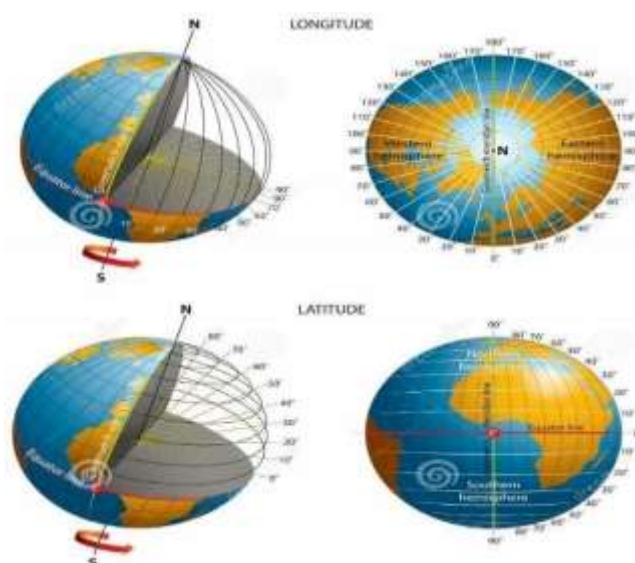


Fig I.11: Illustration de vecteur des latitude-longitude-coordonnées [23].

I.6.1.2. L'angle horaire (ω)

À tout moment, il est plus pratique de calculer le temps en degrés qu'en heures. L'unité est l'angle horaire (24 h représente 360° heures). 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 [16] (Fig I.12). L'angle horaire se mesure à partir du midi solaire, il est positif s'il est avant midi et négatifs 'Est après midi (ω est 0° à midi, 90° à 18h00 et 90° à 6h00, en temps solaire vrai, chaque heure le décale de 15° , positif le matin et négatif l'après-midi) [16].

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

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (1)$$

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

$$\omega = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (2)$$

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] :

$$TSV = t - DE + (ET + 4 \cdot \text{Long}) / 60 \quad (3)$$

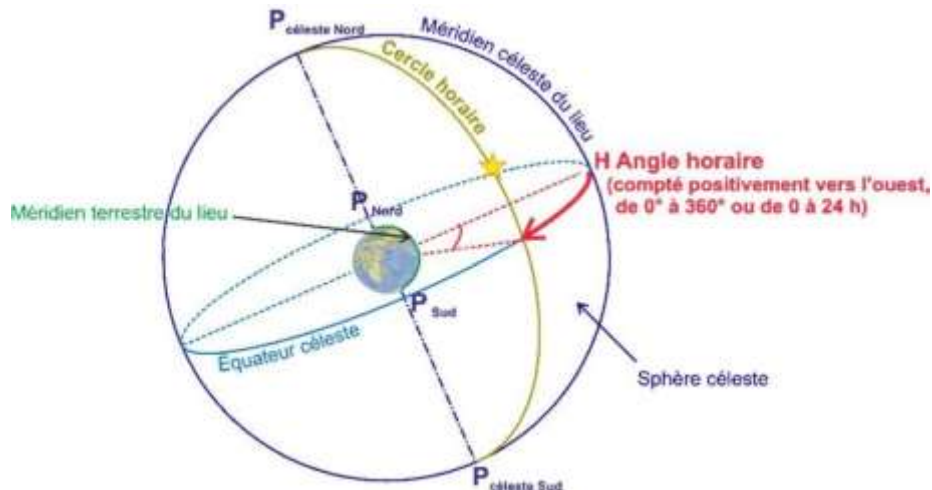


Fig I.12: Les coordonnées horaires [24].

I.6.1.3. La déclinaison du soleil (δ)

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial de terre, la déclinaison varie de $23^\circ 27'$ au solstice d'hiver à $+ 23^\circ 27'$ au solstice d'été et est nulle aux équinoxes. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante [20] :

$$\sin(\delta) = 0.398 \cdot \sin\left\{\frac{360}{365} \cdot (N - 82)\right\} + 2 \cdot \sin\left\{\frac{360}{365} \cdot (N - 2)\right\} \quad (4)$$

Avec :

$$N_p = 2\pi * N/365.25 \quad (5)$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé cette expression pour le calcul de la déclinaison [17] :

$$d = \arcsin \left[0.389 \sin\left(\frac{360}{365} (N - 82)\right) + 2 \sin\left(\frac{360}{365} (N - 2)\right) \right] \quad (6)$$

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 (I.13) :

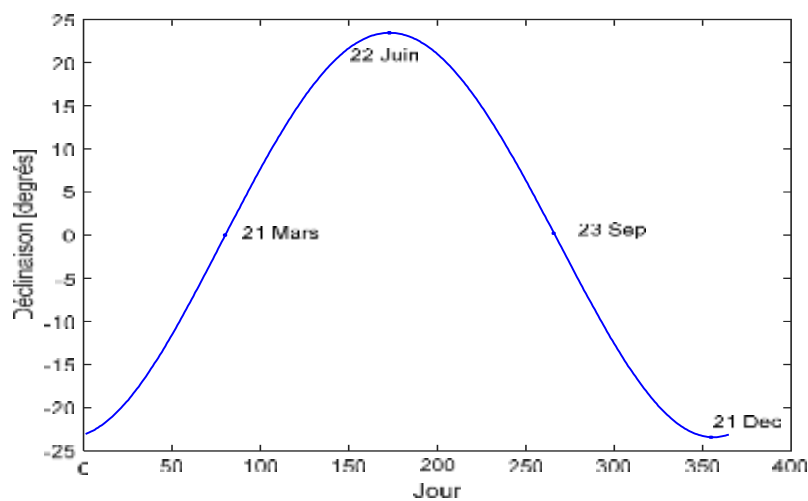


Fig I.13: Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.

I.6.1.4. La hauteur du soleil (γ_s)

La hauteur du soleil γ_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° (nadir).

La hauteur (Fig I.14) du soleil est bien représentée par une formule bien connue, qui avait été également adoptée par Capderou [18] :

$$\sin(\gamma_s) = [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)] + [\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)] \quad (7)$$

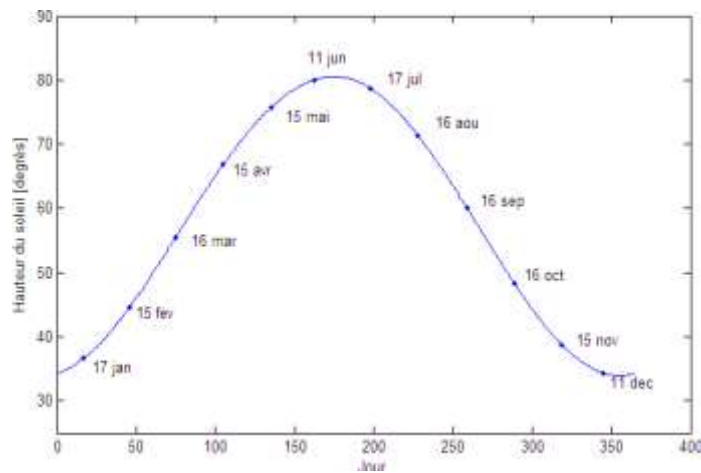


Fig I.14: Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.

I.6.1.5. L'azimut du soleil (χ_s)

L'azimut du soleil est l'angle formé, dans le plan horizontal, par la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut est compté positivement vers l'Ouest >0 et négativement vers l'Est.

$$\cos(\chi_s) = \frac{[\cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi)] - [\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi)]}{\cos(\gamma_s)} \quad (8)$$

I.6.1.6. Masse atmosphérique

On appelle masse d'air m_A la masse d'atmosphère traversée par l'éclairement direct pour Atteignez le sol (avec un ciel léger), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il traversera une épaisseur importante de l'atmosphère et plus il

subira des transformations. La masse atmosphérique relative est donnée par la relation, très simple [17] :

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma_s)} \quad (9)$$

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

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

La (fig.I.15) représente la variation de la masse d'air atmosphérique en fonction de la hauteur du soleil :

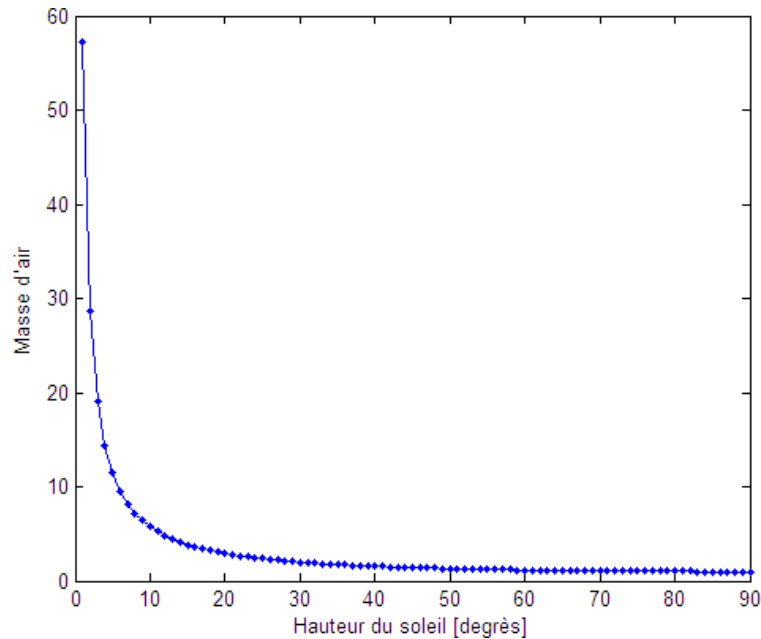


Fig I.15: Variation de masse d'air en fonction de hauteur soleil.

I.6.1.7. Epaisseur optique de l'atmosphère

En 1922, Linke définit l'épaisseur optique de Rayleigh 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 δR , connue sous le nom de formule pyréliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte [20] :

$$R_{0.1} = 9.4 + (0.9 \cdot m_A) \quad (11)$$

Dans cette formule utilisée depuis fort longtemps, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que : CO₂, O₂, NO₂ 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 (Fig I.16) pour calculer l'éclairement direct incident sur un plan par ciel clair, En 1986, Louche a ajouté l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et a proposé un polynôme d'ordre 4 pour la masse d'air. Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour δR .

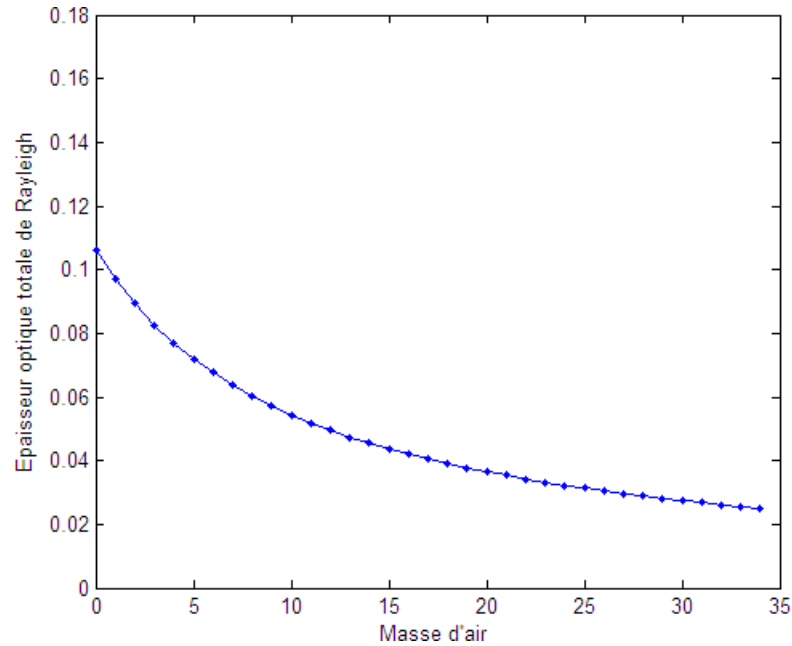


Fig I.16: Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.

I.6.1.8. 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 T₀, le trouble dû à la diffusion moléculaire de Rayleigh T₁ et le trouble relatif à la diffusion par les aérosols T₂ avec [17] :

$$T_0 = \{2.4 - 0.9 \cdot \sin(\varphi)\} + 0.1 \cdot \{2 + \sin(\varphi)\} - (0.2 \cdot Alt) - [(1.22 + 0.14 \cdot A_{hc}) \cdot \{1 - \sin(\gamma_s)\}] \quad (12)$$

Avec : A_{he} est l'alternance hiver été donnée par :

$$A_{he} = \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (N - 121) \right] \quad (13)$$

$$T_1 = (0.89)^{Alt} \quad (14)$$

Alt est l'altitude en km.

$$T_2 = [0.9 + (0.4 \cdot A_{he})] \cdot (0.63)^{Alt} \quad (15)$$

I.6.2. Rayonnement solaire incident sur un plan

Le rayonnement solaire (Fig I.17) est une énergie de rayonnement émise par le soleil à partir d'une réaction de fusion nucléaire qui crée de l'énergie électromagnétique se propageant dans toutes les directions du vide avec une vitesse 3.108m/s. Le spectre du rayonnement solaire est proche de celui d'un corps noir avec une température d'environ 5800 K. Environ la moitié du rayonnement se situe dans la partie visible du spectre électromagnétique à ondes courtes. L'autre moitié se situe principalement dans la partie proche infrarouge, certaines dans la partie ultraviolette du spectre.

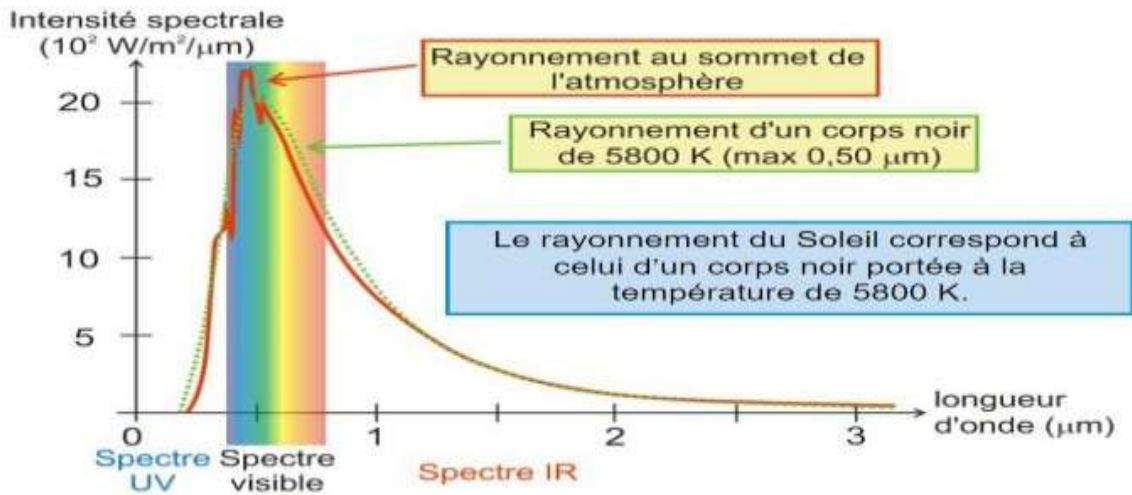


Fig I.17: Le Spectre solaire

I.6.2.1. Eclairage hors atmosphère

En dehors de l'atmosphère l'éclairage solaire est d'intensité $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$. Une surface exposée au soleil ne peut recevoir cette valeur d'intensité que si elle est placée perpendiculairement

à la direction de l'éclairement, n'importe quel écartement à cette orientation conduit à une réduction de le rayonnement incident. Dans le cas d'un plan horizontal situé en dehors de l'atmosphère, l'éclairement est décrit comme : éclairement solaire extraterrestre horizontal (Fig I.18).

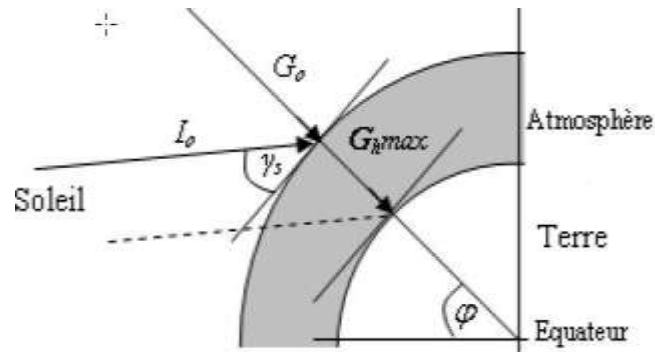


Fig I.18: Eclairement solaire extraterrestre.

L'éclairement solaire extraterrestre fonction de la constante solaire et de la correction de distance entre la terre et le soleil, est donné par l'équation (16) [21] :

$$G_0 = I_0 \cdot \varepsilon \quad (16)$$

ε : est la correction de distance terre soleil est donnée par M. Capderou par l'équation (17) :

$$\varepsilon = 1 + 0.034 \cdot \cos \left[\frac{360}{365} \cdot (N - 2) \right] \quad (17)$$

I.6.2.2. Eclairement direct incident sur un plan horizontal

Pour l'éclairement direct, Capderou utilisa la formule (II.8) pour la masse d'air m_A et la formule (II.10) pour l'épaisseur totale de l'atmosphère δR et a donné l'équation (18) qui permet de calculer l'éclairement direct incident sur un plan horizontal IB_h fonction de la hauteur du soleil γ et du facteur de trouble total de Linke TL [22]:

$$IB_h = G_0 \cdot \sin(\gamma_s) \cdot \exp \left(- T_L \cdot \left\{ 0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^{Alt}} \cdot \sin(\gamma_s) \right\} \right) \quad (18)$$

I.6.2.3. Eclairage diffus incident sur un plan horizontal

L'éclairage diffus est le flux solaire reçu par un plan considéré qui reverse les nuages, Pour calculer l'illumination diffuse, Capderou a utilisé le facteur de brume diffusive et fourni ; en une équation (19) fonction de la hauteur du soleil γ_s [23] :

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

Avec : $a = 1.1$ (20)

$$b = \log(T'_L) - 2.80 + 1.02 \cdot [1 - \sin(\gamma_s)]^2 \quad (21)$$

I.6.2.4. Angle d'incidence

L'angle d'incidence (δ^{inc}) est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan Considère (Fig I.19), elle est définie par l'inclinaison du plan β et l'Azimut de la normale du plan α (orientation du plan), α est compte dans le sens rétrograde ($\alpha < 0$ vers l'Est, $\alpha > 0$ vers l'Ouest) M. Capderou utilise la hauteur de la normale du plan γ pour calculer $\cos(\delta^{inc})$ de l'angle d'incidence, γ est positive pour les plans tournés vers le haut et négative pour les plans tournés vers le bas, donc c'est les angles α et γ qui déterminent la position du plan. L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donne par Capderou par les formules suivantes :

$$\cos(\delta^{inc}) = [a' \cdot \sin(\omega)] + [b' \cdot \cos(\omega)] + c' \quad (22)$$

Avec : $a' = \cos(\delta) \cdot [\sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma)]$ (23)

$$b' = \cos(\delta) \cdot [\{ \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\varphi) \} + \{ \sin(\gamma) \cdot \cos(\varphi) \}] \quad (24)$$

$$c' = \sin(\delta) \cdot [\{ -\cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\varphi) \} + \{ \sin(\gamma) \cdot \sin(\varphi) \}] \quad (25)$$

Où : $\beta = 90 - \gamma$ (26)

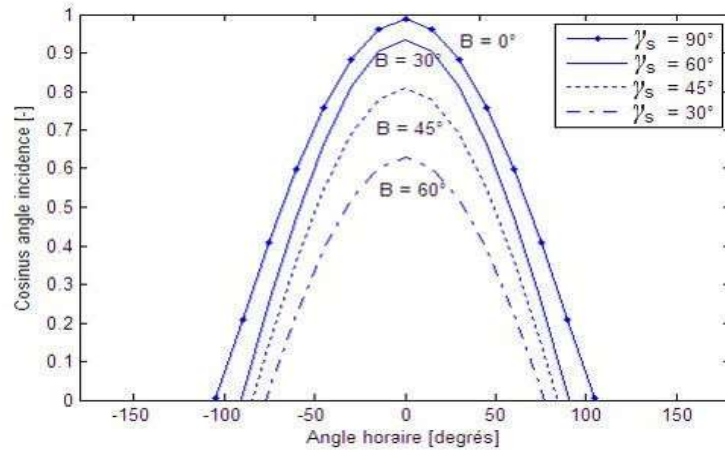


Fig I.19: Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.

I.6.2.5. Eclairage direct incident sur le plan quelconque

Capderou utilisa l'angle d'incidence donnée par l'équation (22) pour calculer l'éclairage direct à l'aide de l'équation suivante :

$$IB_i = IN \cdot \text{Cos}(\delta^{\text{inc}}) \quad (27)$$

Avec :

$$IN = G_O \cdot \exp\left(-T_L \cdot \left\{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^{\text{Alt}}} \cdot \text{Sin}(\gamma_s)\right\}\right) \quad (28)$$

Ou :

$$IN = IB_h / \text{Sin}(\gamma_s)$$

I.6.2.6. Eclairage diffus incident sur le plan quelconque

L'éclairage diffus est le flux solaire reçu par un plan considéré qui reverse les nuages.

Pour calculer l'éclairage diffus, Capderou utilisa le facteur de trouble diffusif et donna ; en 1987, une l'équation (29) fonction de la hauteur du soleil γ_s [18] :

$$ID_i^a = \delta^a \cdot \left[\frac{1 - \text{Sin}(\gamma_s)}{2} \right] \quad (29)$$

Avec :

$$\delta^a = \rho \cdot IB_h \quad (30)$$

Pour un plan (α, β) , l'éclairement diffus incident en provenance du ciel est décomposé en trois parties : le diffus isotrope du ciel, le diffus directionnel et le diffus du cercle de l'horizon.

I.6.2.7. Calcul du rayonnement global

M. Capderou dans l'ASA [26], comme déjà présente ; proposa un modèle pour calculer le rayonnement solaire incident sur un plan quelconque (α, β) , le rayonnement global IG_i est la somme des deux composantes directe IB_i et diffuse ID_i .

I.6.3. Validation des résultats obtenus après modélisation

I.6.3.1. Comparaison entre valeurs du rayonnement solaire

La figure I.20 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.

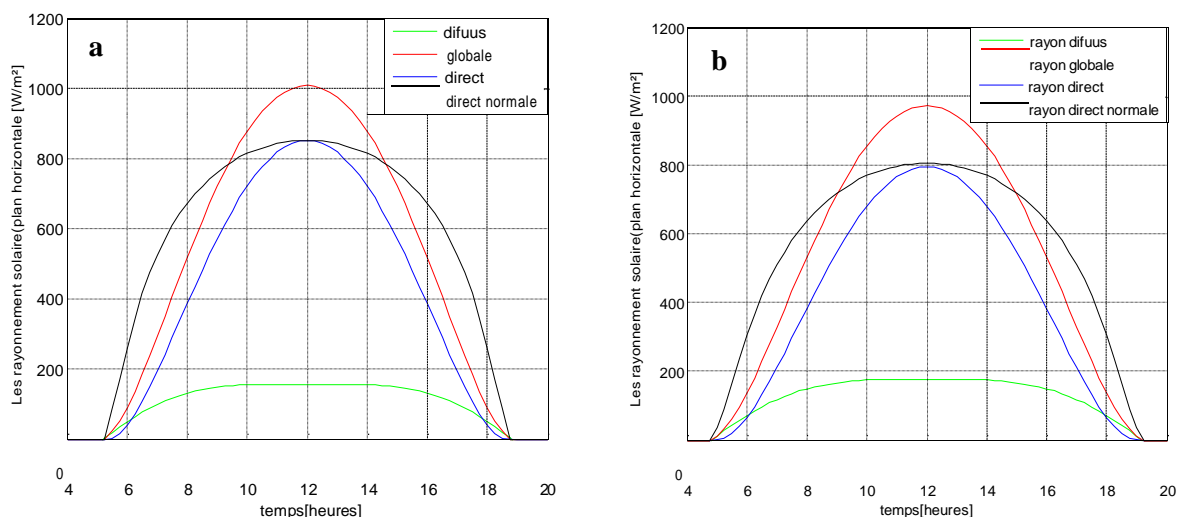


Fig I.20: Variations des valeurs du rayonnement solaire en fonction de temps au solstice d'été (21 Juin): (a) site de Tamanrasset; (b) site de Ghardaïa.

I.6.3.2. 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 (les figures I.21 - I.22), 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 (IGh) et Direct horizontal (IBh)

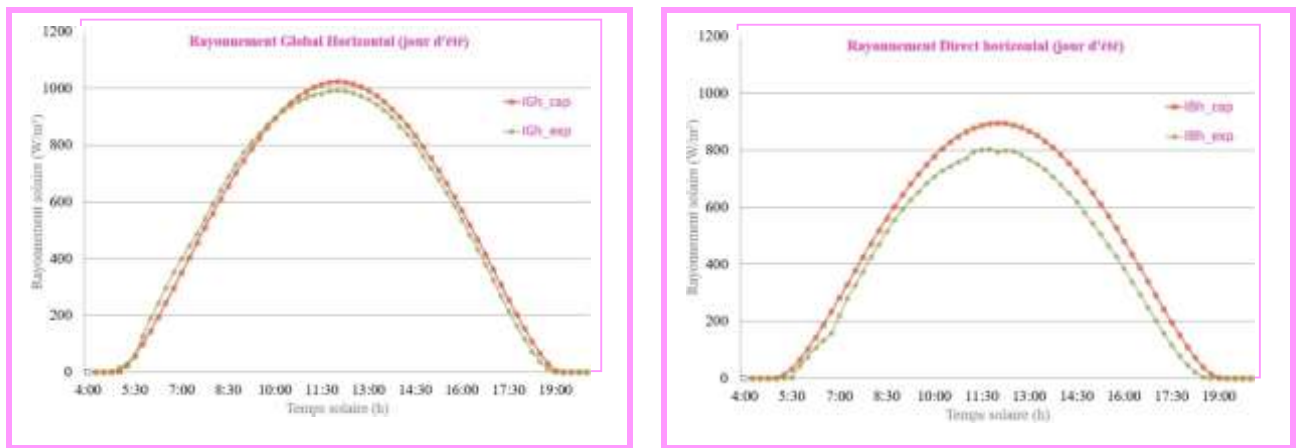


Fig I.21: Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.

Jour d'hiver avec $(\alpha, \beta) = (0, 0)$: Global horizontal (IGh) et Direct horizontal (IBh)

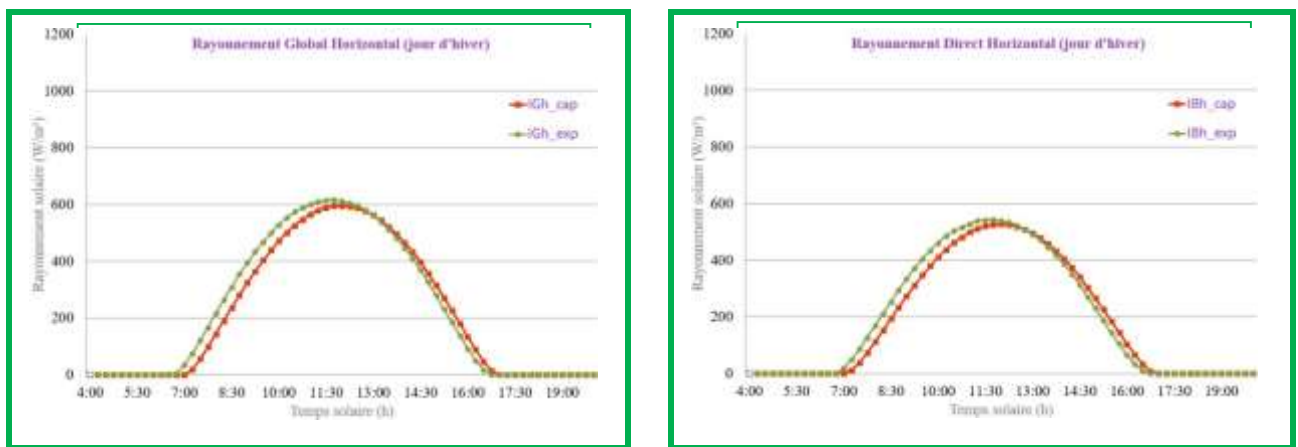


Fig I.22: Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.

Pour une période estivale (la figure I.21), 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 (la figure I.22), le modèle Capderou présente un bon rapprochement de valeurs mesurées. Le traitement des graphes des figures (I.21 - I.22) 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.

I.7. Conclusion

Le rayonnement solaire est l'élément de base dans la conversion de l'énergie rayonnée en énergie thermique (cuisson solaire par exemple), la mesure de ce paramètre se fait avec des éléments très développés et précis, les plus connus sont le pyromètre et pyrhéliomètre que nous avons présentés dans ce chapitre. Dans ce premier chapitre, une modélisation de l'éclairement solaire par le modèle r.sun est présentée, les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes de l'éclairement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné sont programmées avec Matlab et leur variation est illustrée sous formes graphiques. 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. Une comparaison des valeurs estimées par le modèle avec celles mesurées expérimentalement sur le site de Ghardaïa est effectuée dans un but de validation du modèle, ce qui nous a mené à dire, que ce modèle peut être utilisé pour estimer le rayonnement solaire dans la région de Ghardaïa.

CHAPITRE II

Etat de l'art sur les systèmes a cuisson solaires et détermination des performances du cuiseur

II.1. Introduction

L'une des applications solaires les plus populaires et les plus répondues dans le monde est la cuisson solaire. En effet, elle est liée à une activité humaine fréquente et très régulière ; il s'agit de la préparation de l'alimentation saine. Les cuissons traditionnelles sont néfastes pour l'environnement, dans les régions sahariennes isolées où l'approvisionnement en gaz butane est très difficile, l'être humain est contraint de se rabattre sur l'exploitation du bois des quelques arbustes restants pour assurer la cuisson de son alimentation. Le recours à la cuisson solaire apparaît comme une alternative intéressante pour répondre à ce besoin vital sans pour autant compromettre la biodiversité végétale saharienne et tout en limitant le dégagement des gaz à effet de serre.

Dans ce second chapitre, une étude sur les systèmes de cuisson solaire sera présentée, le principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire, les différents types de cuiseurs existants notamment les cuiseurs boîtes, les cuiseurs paraboliques, les cuiseurs stockeurs d'énergie et les cuiseurs suiveurs du soleil. Les prototypes de cuiseurs développés et réalisés à travers le monde seront également abordés dans ce chapitre.

II.2. Historique de la cuisson solaire

La cuisson solaire est loin d'être moderne. En effet le cuiseur solaire a été pour la première fois inventé par le chercheur Suisse Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) en 1767 sous le nom de "heliothermometer", car il l'a utilisé pour mesurer le rayonnement solaire dans les Alpes selon la variation de l'altitude. Il a réussi à cuire des fruits dans ce boîtier vitré. Par la suite le premier cuiseur solaire parabolique a été inventé par l'Ingénieur Français Augustin Bernard Mouchot (1825-1911) en 1877. L'idée du développement des cuiseurs solaires fut vite abandonnée pour des raisons d'encombrements et de faibles rendements. Dans les années cinquante du siècle passé et par nécessité, il y eut une reprise d'intérêt pour la cuisson solaire en Inde et en Chine. En Inde, le développement de la cuisson solaire continuait pendant une longue période. La construction de cuiseurs solaires était même subventionnée par l'état pendant un certain temps. Après la crise du pétrole des années 70, les pays industrialisés s'intéressaient de nouveau à la cuisson solaire. Les investigations fondamentales pour l'amélioration et le développement effectif de la cuisson solaire ont été intensifiées [6].

En 1980, un mouvement s'est formé aux Etats Unis autour de Barbara Kerr (Fig II.1) qui est un pionnier de la cuisson solaire en Arizona qui a développé un kit facilitant aux gens la construction de leur propre cuiseur solaire. Ce mouvement s'est soldé par la création de l'organisation internationale 'Solar Cookers International (SCI)' qui est devenu un forum pour les promoteurs de la cuisson solaire dans le monde. Actuellement, la cuisson solaire est très répandue à travers le monde, surtout dans les régions isolées, pauvres et en voie de développement où plusieurs organisations internationales entretiennent des programmes d'aide et de promotion de la cuisson solaire au profit des populations locales.



Figure II.1: Barbara Kerr avec Sherry Cole qui est une des fondateurs de cuiseurs solaires [22].

Plusieurs modèles de cuiseurs solaires ont été construits et distribués dans le monde rural à travers la planète. En Afrique et dans les régions sahariennes (Fig II.2), la vulgarisation de la cuisson solaire est soutenue par plusieurs organisations gouvernementales et non gouvernementales pour la lutte contre la déforestation et afin de répondre aux besoins des populations des régions dépourvues des ressources énergétiques conventionnelles comme le Tchad, le Mali, le Niger, le Burkina-Faso et autres [5].



Figure II.2: Utilisation d'un modèle de cuiseurs solaires au Sénégal [23].

C'est en 1952 et sous l'égide du Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique Appliquée en Algérie que la Commission locale de l'Energie Solaire, animée par l'ingénieur Général des Mines Bélier, confia à M.Frixon, Directeur de la Production à Électricité et Gaz d'Algérie, et M. Guillemonat, professeur à la Faculté des Sciences de Marseille, le soin d'établir les caractéristiques du four solaire de Bouzaréah baptisé "Héliodyne" (Fig II.3). M. Touchais, ingénieur conseil à Alger, a eu la charge de concrétiser les données proposées et de procéder aux études initiales qui, par étapes successives engendrèrent l'Héliodyne actuel. La Société des Anciens Etablissements Sautter-Harlé assumait l'étude générale et l'exécution particulièrement délicate de ce prototype [24].

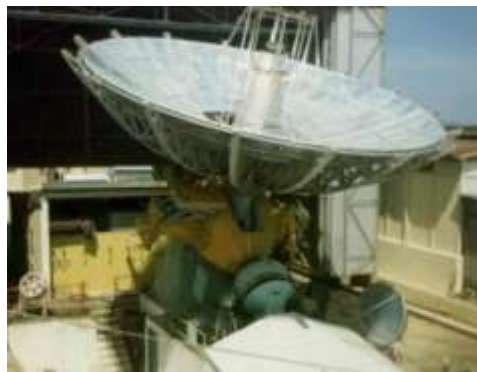


Figure II.3: Héliodyne : premier four solaire mondial 1950 – CDER, Bouzaréah, Algérie.

Actuellement, en Algérie ; la cuisson solaire reste toujours méconnue par le grand public. Dans ce cadre, l'équipe du chauffage solaire de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar (URER/MS) a lancé un projet en 2004 qui porte sur l'introduction et le développement de la cuisson solaire en milieu saharien. Le projet a abouti à la construction de plusieurs prototypes adaptés au milieu saharien (Fig II.4) et a permis d'introduire cette activité et de s'inscrire dans le répertoire international des promoteurs de la cuisson solaire ('International Directory of Solar Cooking Promoters' [24]).



Figure II.4: Deux prototypes de cuiseurs solaires réalisés et testés à l'URER/MS – Adrar.

En 2010, l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa) a également portée un grand intérêt au développement et à la vulgarisation des cuiseurs solaires, en lançant un programme ambitieux, s'inscrivant dans le cadre de ces activités; qui porte sur la conception et la réalisation de nouveaux designs de cuiseurs solaires, qui a abouti à la proposition d'un cuiseur solaire de type boîte avec une surface réceptrice inclinée [25, 26, 27] (Fig II.5), des cartes des efficacités des cuiseurs à travers le territoire national ont été proposées à cet effet [29, 30]. Beaucoup d'efforts restent à fournir et un projet de grande envergure est nécessaire pour développer et vulgariser cette application en Algérie, qui peut être très bénéfique au niveau des régions isolées.



Figure II.5: Prototype du cuiseur solaire boîte réalisé et testé à l'URAER – Ghardaïa.

II.3. Principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire

La plupart des cuiseurs solaires fonctionnent ainsi : le rayonnement solaire est converti en chaleur. Cette chaleur est stockée pour la cuisson dans le temps. Dans certains cas, le bénéfice solaire est multiplié par l'ajout de miroirs. L'énergie utilisée par les cuiseurs solaires est une énergie renouvelable dérivée du soleil. Ce rayonnement solaire est un ensemble d'ondes électromagnétiques composé de photons. La Terre qui est d'environ 150 à des millions de kilomètres du Soleil, elle reçoit en permanence 170 millions de Gigawatts d'énergie l'énergie solaire, dont environ 30 % sont réfléchis par les nuages, l'atmosphère et le sol et 20 % sont absorbés par l'atmosphère et les nuages. Le rayonnement solaire est alors transformé en chaleur par un absorbeur dont la surface est

généralement sombre. Dans la plupart des cuiseurs solaires, cette fonction est assurée par le récipient qui contient les aliments. Pour des raisons d'efficacité, la chaleur doit être conservée autant que possible. Les cuiseurs solaires de type " boîte " utilisent du verre pour retenir la chaleur à l'intérieur du caisson en raison de l'effet de serre. Sur les autres murs, l'ajout d'une isolation traditionnelle améliore la rétention de la chaleur. Enfin, les rayons du soleil peuvent être déviés par des miroirs et fournir une énergie supplémentaire au foyer du cuiseur solaire [31].

II.4. L'état de l'art et les modèles de base des cuiseurs solaires

Il existe trois principaux modèles de base :

II.4.1. Le cuiseur à panneaux

Ce type (Fig II.6), est constitué de différents panneaux plans réfléchissants et d'un récipient noir englobé dans un sac en plastique, placé sous une cloche en verre [33]. Le cuiseur à panneaux combine les deux principes de concentration des rayons et d'effet de serre. Les rayons sont reflétés en direction du récipient et c'est le sac qui crée l'effet de serre [34].

II.4.2. Le cuiseur de type boîte

Ce modèle (Fig II.7), est constitué d'un ou plusieurs panneaux plans réfléchissants qui concentrent les rayons du soleil sur le récipient [33]. Le cuiseur boîte utilise le principe de l'effet de serre. Les rayons pénètrent par la vitre dans une boîte isolée, la température monte progressivement, et le récipient noir placé à l'intérieur se retrouve immergé dans la chaleur. Le système se rapproche de la cuisson au four à gaz et électrique, ainsi que de la cuisson à l'étouffée [34].

II.4.3. Le cuiseur parabolique

Le cuiseur parabolique (Fig II.8), utilise le principe de la concentration des rayons solaires. Ces cuiseurs sont constitués de disques concaves sous forme de parabole qui focalise la lumière solaire sur le fond du récipient [33]. La puissance d'un cuiseur parabolique solaire est équivalente à celle d'une plaque électrique ou à gaz [34]. On trouve généralement deux types: les cuiseurs paraboliques à réglage manuel et les cuiseurs paraboliques à réglage automatique.



Figure II.6: Schéma de principe d'un cuiseur à panneaux [32].



Figure II.7: Schéma de principe d'un cuiseur de type boîte [32].

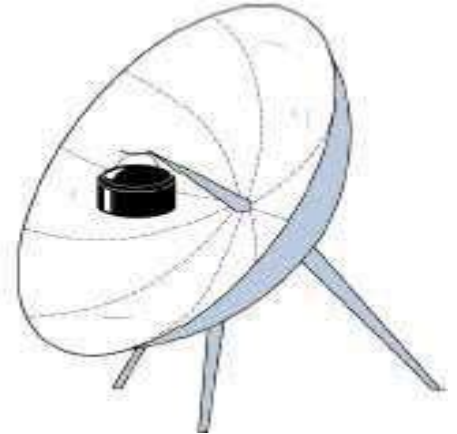


Figure II.8: Schéma de principe d'un cuiseur parabolique [32].

II.5. 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 [35]. 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 [36]. Cependant, des températures comprises entre 80 et 90°C suffisent pour cuire les nourritures et gardent leur goût, humidité et éléments nutritifs (Fig II.9) [35].

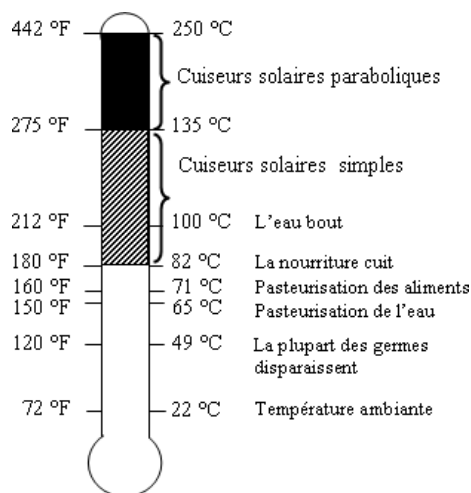














Figure II.9: Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs [38].

Les temps de cuisson sont très variables, ils varient considérablement en fonction de divers facteurs [37] 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 [38].

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 [39].

Tab II.1: Facteurs essentiels pour la cuisson solaire.

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

II.6. Classification des cuiseurs solaires

Les cuiseurs solaires sont classifiés globalement en deux catégories : les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur et, les cuiseurs solaires avec stockage de chaleur, cette classification est illustrée en détail sur la figure II.10 [40] :

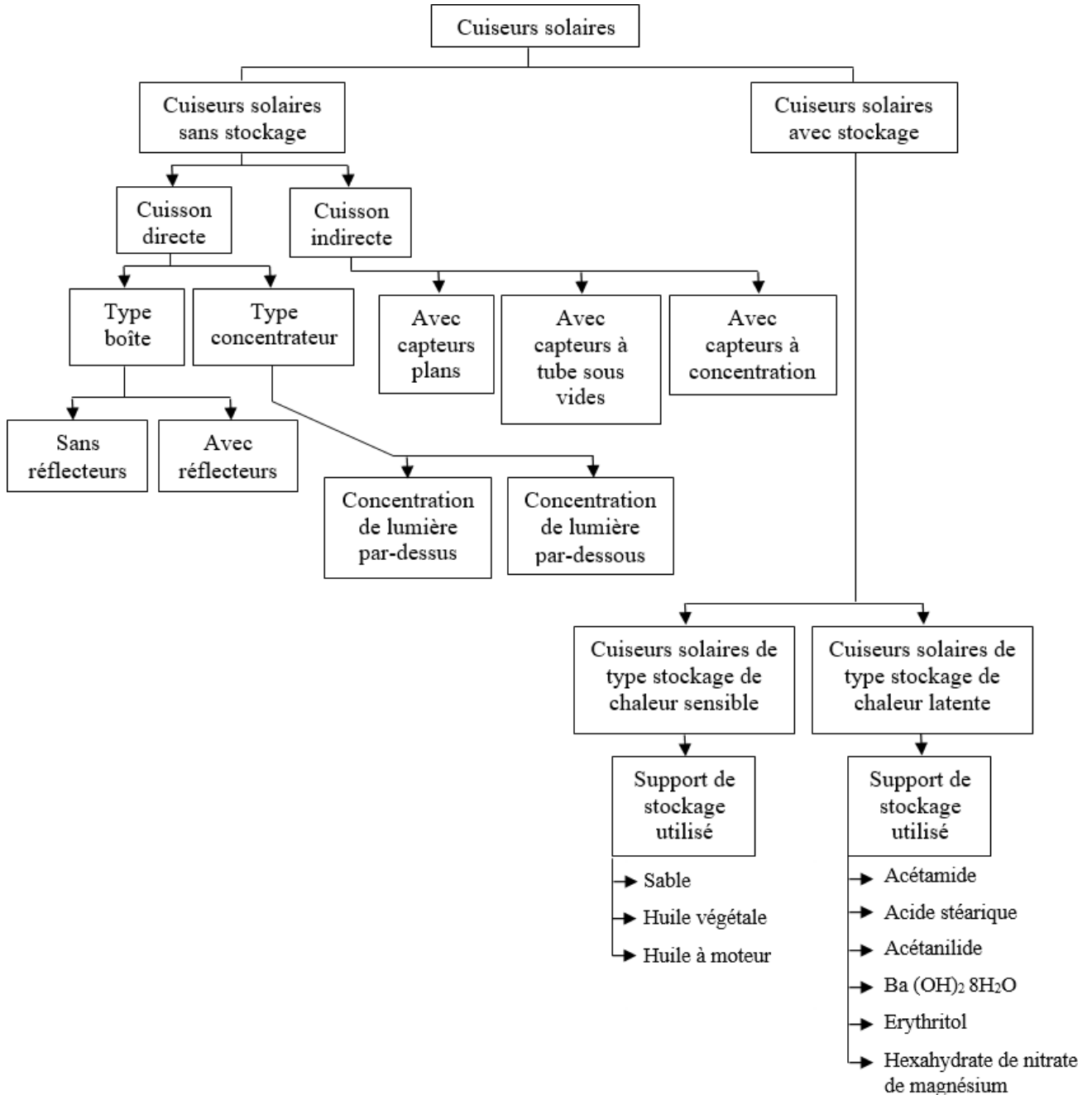


Figure II.10: Classification des cuiseurs solaires sans et avec stockage thermique [40].

II.6.1. Les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur

Les cuiseurs solaires sans stockage se divisent entre : cuiseurs avec cuisson direct et, cuisson indirect, cette catégorisation est effectuée suivant le mécanisme de transfert de chaleur vers l'ustensile. Le type direct utilise directement le rayonnement solaire pour cuire, par contre le type indirect utilise un fluide caloporteur pour transférer la chaleur du collecteur vers l'ustensile de cuisine [6].

II.6.2. Cuiseurs solaires type direct

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

II.6.3. Cuiseurs solaires boîte

Le cuiseur solaire boîte est un boîtier en bois avec des extrémités isolées thermiquement et un simple ou double vitrage en haut. Le principe de fonctionnement de ce type de cuiseur est basé sur l'effet de serre, le vitrage du cuiseur permet le passage des rayons ayant une courte longueur d'onde mais, il est opaque pour les rayons ayant des grandes longueurs d'onde comme les rayons infrarouges, ces dernières ont une grande quantité d'énergie. Dans un tel type de cuiseur, l'isolation joue un grand rôle pour maintenir la chaleur dans la chambre de cuisson, des miroirs peuvent être utilisés aussi pour une réflexion additionnelle des rayons solaires. La vitesse de cuisson dépend de la conception, la configuration et, le rendement thermique du cuiseur. La figure II.11 illustre plusieurs configurations du cuiseur solaire boîte : [6]

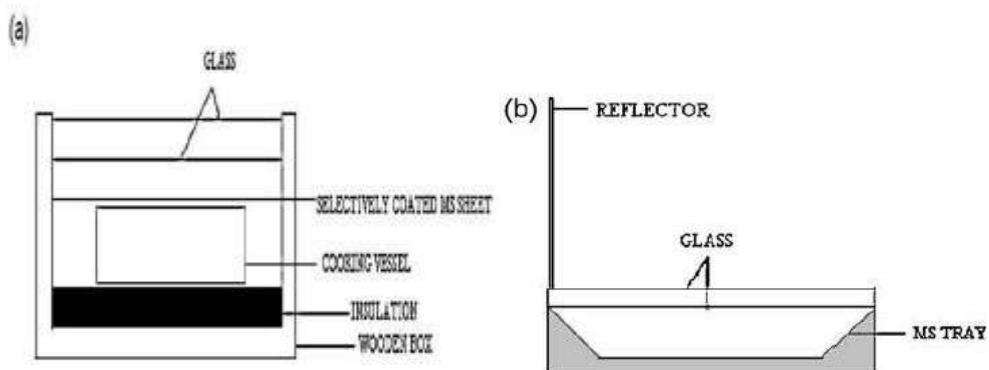




Figure II.11: Cuiseurs solaires boîtes : (a) sans réflecteur, (b) avec réflecteur, (c) avec deux réflecteurs, (d) avec trois réflecteurs, (e) avec quatre réflecteurs, et (f) avec huit réflecteurs.

II.6.4. Cuiseurs solaires à concentration

Dans les cuiseurs à concentration l'ustensile est placé au point de concentration d'un miroir parabolique. Ce type de cuiseur fonctionne sur deux axes pour capturer les rayons solaires, le rapport de concentration peut atteindre 50 et, la température dépasse les 300 °C, ce qui suffit assez largement pour cuire tout type d'aliment. Les cuiseurs à concentration utilisent des miroirs multi face, concentrateur Fresnel ou, des concentrateurs parabolique pour atteindre une telle haute température. Plusieurs configurations des cuiseurs solaires à concentration sont illustrées sur la figure II.12 : [6]

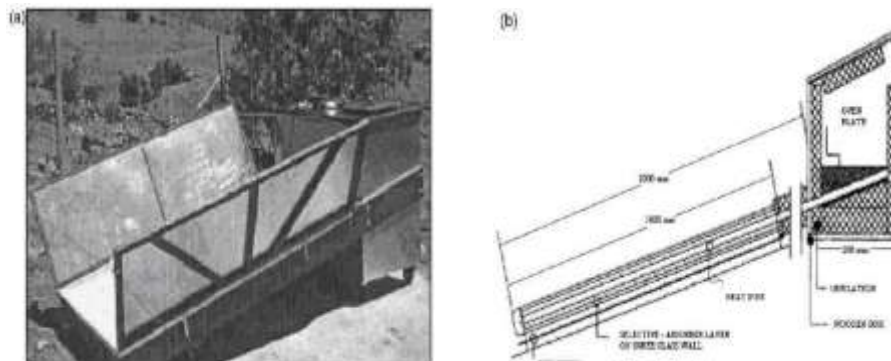


Figure II.12: Cuiseurs à concentration : (a) cuiseur a panneaux, (b) cuiseur entonnoir, (c) réflecteur sphérique, (d) réflecteur parabolique, (e) concentrateur Fresnel, et (f) concentrateur cylindro-parabolique.

Les hautes températures atteintes par les cuiseurs solaires à concentration permettent de cuire tous les types des aliments dans des courtes durées. Les inconvénients des cuiseurs à concentration sont ; le volume excessif, le cout, le risque de bruler les aliments et surtout, les ajustements fréquent [6].

II.6.5. Cuiseurs solaires type indirect

Dans les cuiseurs solaires indirects l'ustensile de cuisine est mis hors du collecteur, un dispositif pour transférer la chaleur vers l'ustensile de cuisine est requis. Les cuiseurs solaires avec capteur plan, les cuiseurs solaires avec capteur à tubes sous vide et, les cuiseurs solaires à concentrations sont les principaux cuiseurs solaires indirects comme montré sur la figure II.13 [6] :



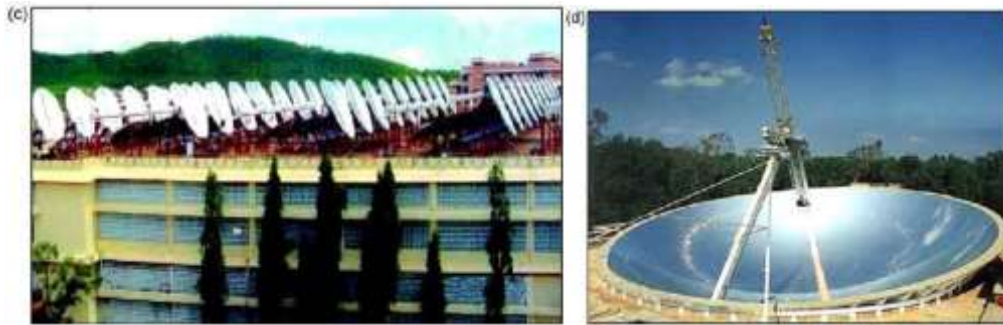


Figure II.13: Cuisers solaires du type indirect, (a) avec capteur plan, (b) avec capteurs sous vides, (c) avec concentrateur parabolique, (d) avec concentrateur sphérique.

II.7. Cuisers solaires avec stockage de chaleur

Le stockage de l'énergie calorifique est nécessaire quand il s'agit d'une divergence entre la période de captation de l'énergie solaire et le moment de la cuisson. Le cuisier solaire doit contenir un dispositif de stockage de chaleur pour résoudre le problème de cuisson hors les heures d'ensoleillement ou dans les périodes nuageuses. L'énergie calorifique peut être stockée en tant qu'un changement dans l'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible ou, chaleur latente [40].

II.7.1. Stockage avec chaleur sensible

Dans ce cas l'énergie calorifique est stockée en augmentant la température d'un solide ou un liquide (Fig II.14) [5].

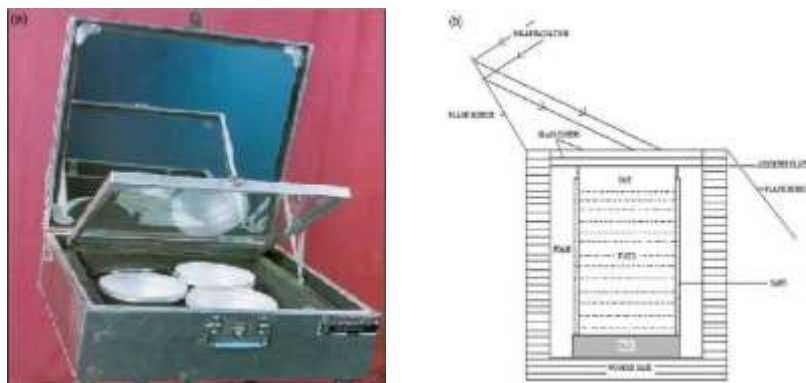


Figure II.14: Stockage par chaleur sensible : (a) avec l'huile des moteurs, (b) avec le sable.

II.7.2. Stockage par chaleur latente

Dans le stockage par chaleur latente on utilise l'énergie stockée lors d'un changement de phase d'une substance (Fig II.15) : [6]

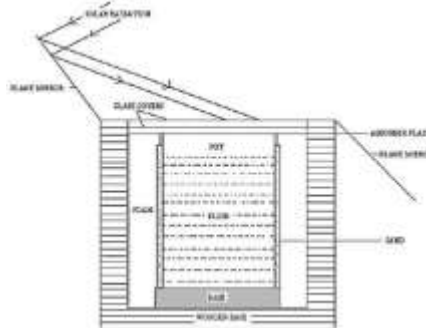


Figure II.15: Stockage par chaleur latente en utilisant $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

II.8. Les avantages et les inconvénients des cuiseurs solaires

II.8.1. Les avantages des cuiseurs solaires

La cuisson avec un cuiseur solaire présente de nombreux avantages qui sont [6] :

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

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

II.8.2. Les inconvénients des cuiseurs solaires [3]

1. La possibilité de cuisiner dehors dépend de l'ensoleillement, cela n'est possible ni tous les jours ou ni à toute heure. Le cuiseur solaire s'utilise le jour par temps clair.
2. Les durées de cuisson au cuiseur solaire, sont bien supérieures à celles des cuissons traditionnelles, il faut s'organiser et ne pas être pressé.
3. Le cuiseur solaire boîtes ne permet ni friture, ni grillade qui réclament une température élevée.
4. Vous aurez besoin de marmites, casseroles et plats à four de couleur noire à l'extérieur pour optimiser la cuisson.

II.9. Présentation du lieu de stage

II.9.1. Site de Ghardaïa

Le site de Ghardaïa 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.

La caractérisation de sites se fait à travers l'analyse des paramètres météorologique et radiométrique, tel que : la précipitation, la température ambiante, l'humidité relative, le vent. En ce qui concerne le site de Ghardaïa, la pluviométrie est du type saharien avec une moyenne annuelle de 67.37 mm. Le nombre de jours de pluie par an en moyen est de 20 à 30 jours, les vitesses moyennes

annuelles du vent sont de 3.1 à 4.4 m/s mesurées à 10m du sol. Les températures moyennes maximales mensuelles varient de 14.9 °C en Janvier à 43.2 °C en Juillet, les températures moyennes minimales mensuelles varient de 3.4 °C en Janvier à 29.5 °C en Juillet. Les températures moyennes mensuelles varient de 9 °C en Janvier à 36.5 °C en Juillet avec une moyenne annuelle de 22.6 °C.

II.9.2. 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.

II.9.3. 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.

II.9.4. Données utilisées

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



Figure II.16: Station radiométrique de l'URAER (Ghardaïa).

II.10. Méthodologies de test et d'évaluation des performances thermiques d'un cuiseur

Le cuiseur solaire de type boîte dépend des paramètres climatiques tels que l'éclairage solaire, la température ambiante, la vitesse du vent ..., ainsi que des paramètres spécifiques à la conception tels que les matériaux utilisés pour l'isolation et les propriétés des matériaux utilisés pour le cuiseur solaire. Le test et l'évaluation des performances thermiques des poêles solaires sont nécessaires pour caractériser ces appareils, et leurs résultats fournissent une base de comparaison avec divers autres modèles. Mullik et al. ont développé un test thermique pour les fours solaires [35]. Selon cette procédure, une méthode d'essai complète selon IS13429 : 2000 est disponible pour tester ces systèmes [36]. Selon cette norme, deux tests principaux (test de stagnation et test de chaleur sensible) sont effectués pour déterminer les enseignements de performances thermiques (numéros de fonction, F1 et F2) sur la base des relevés de profils thermiques sans tenir compte de l'effet du miroir réfléchissant. La norme indienne IS13429 [37] fournit des seuils standard pour les valeurs minimales pour F1 et F2, qui sont respectivement de 0,12 et 0,40 pour une charge de 8 kg / m². De plus, une méthode a été proposée pour tester les cuiseurs solaires par Funk [38, 39] ; Selon cette norme, les performances des poêles solaires sont déterminées par deux paramètres, à savoir la force de cuisson modifiée (P_{adj}) et le coefficient total de pertes thermiques (U_L). Cette section comprend diverses formules ; Selon les normes indiennes et européennes, permettant de déterminer les paramètres de performance thermique à partir des relevés du profil de température.

II.10.1. Evaluation des performances selon les paramètres des Normes Indiennes

II.10.1.1. Détermination du paramètre 'First figure of merit'

Le premier nombre de merit est défini comme suit :

$$F_1 = \frac{\eta_0}{U_L} = \frac{T_{ps} - T_{as}}{I_s} \quad (1)$$

II.10.1.2. Détermination du paramètre 'Second figure of merit'

Le second paramètre de merit F2 est dérivé du test de chaleur sensible sous des conditions de pleine charge. Elle est donnée par la relation suivante :

$$F = \frac{F_1(mC_p)_w}{A_{sc}c} \ln \left[\frac{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{wi} - T_a}{T_s} \right)}{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{wf} - T_a}{T_s} \right)} \right] \quad (2)$$

II.10.1.3. Détermination du temps d'ébullition (Boiling time) et de la courbe caractéristique du cuiseur (Characteristic curve)

Selon les Normes de Mullick [35], la constante de temps τ_{boil} pour la période de chaleur sensible ; depuis la température ambiante jusqu'à la température de 100°C, peut être déduite à partir de l'équation (35) de la manière suivante :

$$\tau_{boil} = \frac{-F_1(mC_p)_w}{F_2 A_{sc}} \ln \left[1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{100 - T_a}{T_s} \right) \right] \quad (3)$$

II.10.2. Evaluation des performances selon les paramètres du Standard Européen

II.10.2.1. Calcul de la puissance de cuisson (Cooking power)

La puissance moyenne délivrée par le cuiseur durant un intervalle de temps particulier ($\Delta t = 600$ s) est exprimée par la formule suivante :

$$P = \frac{(mC_p)_w (T_{wf} - T_{wi})}{\Delta t} \quad (4)$$

II.10.2.2. Calcul de la puissance de cuisson ajustée (Adjusted cooking power)

Funk [38] a également introduit le terme: puissance de cuisson ajustée ou standardisée P_{adj} , afin de faciliter la comparaison entre les divers designs de cuiseurs solaires sous différentes intensités d'éclairements, la puissance de cuisson ajustée est donnée par l'équation (38), où sI est l'éclairement solaire moyen, I_n est l'éclairement solaire standardisé à 700 W/m².

$$P_{adj} = P \frac{I_n}{I_s} \quad (5)$$

II.10.3. Détermination du rendement énergétique du cuiseur

La première loi de la thermodynamique, donne le rendement énergétique (η) comme étant le rapport entre l'énergie de sortie (E_o) par rapport à l'énergie d'entrée (E_i). Le rendement énergétique d'un cuiseur solaire boîte est calculé en utilisant l'équation (39) ci-dessous :

$$\eta = \frac{E_o}{E_i} = \frac{(mc_p)_w \cdot (T_{wf} - T_{wi})}{I_s \cdot \Delta t \cdot A_{sc}} \quad (6)$$

II.11. Conclusion

Dans ce second chapitre il a été constaté qu'un cuiseur solaire est un moyen écologique et économique de préparer les aliments. Les cuiseurs solaires capturent les rayons du soleil au moyen de surfaces brillantes ou miroirs, qui réfléchissent les rayons du soleil et les concentrent sur un récipient de cuisson, à cette concentration de rayons lumineux, s'ajoute un effet de serre dans le cas des cuiseurs boîtes. Et pour surmonter les besoins énergétiques en cas de mauvais temps ou pendant la nuit, le stockage thermique d'énergie est compté parmi les meilleures solutions techniques possibles pour la cuisson solaire. Plusieurs prototypes de cuiseurs solaires ont été réalisés à travers le monde sans et avec stockage et les résultats s'avèrent relativement satisfaisants.

Dans ce qui suit, nous avons présenté la partie pratique du travail, dont nous faisons une étude expérimentale d'un cuiseur solaire parabolique, conçu et réalisé par les chercheurs de l'URAER, Ghardaïa, dans le but d'une contribution à l'amélioration de ces performances thermiques.

CHAPITRE III

Etude expérimentale et discussion des résultats

III.1. Introduction

Un cuiseur solaire est une technologie qui peut fournir de la chaleur de façon naturelle et renouvelable, pour la cuisson, il utilise souvent la technique de concentration des rayons solaires et/ou le phénomène de l'effet de serre. Dans le troisième chapitre, une évaluation des performances par analyse des profils thermiques du cuiseur solaire parabolique sera effectuée, une caractérisation du cuiseur est également envisagée. Par ailleurs, des tests sont réalisés durant plusieurs jours de l'année avec différentes conditions climatiques et différentes configurations et le temps d'ajustement du cuiseur est effectué d'une manière bien étudiée. Les résultats issus des tests réalisés seront discutés et interprétés pour vérifier aussi bien le bon fonctionnement de l'ensemble et sa faisabilité/rentabilité.

III.2. Etude expérimentale du cuiseur solaire parabolique

Dans cette étude, les températures mesurées au niveau du cuiseur par les thermocouples à travers le module de l'unité d'acquisition de données AGILENT 34972A seront affichées numériquement et graphiquement sur un écran d'un ordinateur. De plus, les tests sont réalisés sur plusieurs jours dans différentes conditions climatiques et les temps d'ajustement du cuiseur sont réalisés de manière étudiée. Les résultats des tests effectués seront discutés et interprétés pour vérifier le bon fonctionnement du système. Les paramètres qui caractérisent le cuiseur seront bien déterminés en fonction des conditions climatiques locales de la région. Les courbes de chauffage et de refroidissement qui caractérisent cette cuisinière seront également obtenues.

III.2.1. Description technique du cuiseur solaire parabolique

Comme le montre la figure (III.1), le concentrateur solaire parabolique (PSC) fait référence aux systèmes de concentration à points focaux, il comprend un réflecteur et l'absorbeur, dans lequel l'ustensile, est placé dans la zone focale. La forme du concentrateur est du type parabolique ayant un diamètre d'ouverture de 0.9 m, la zone réfléchissante du concentrateur solaire est de 0.63 m², la distance focale du concentrateur est de 0.5m alors que la zone focale du concentrateur est de 0.10 m².

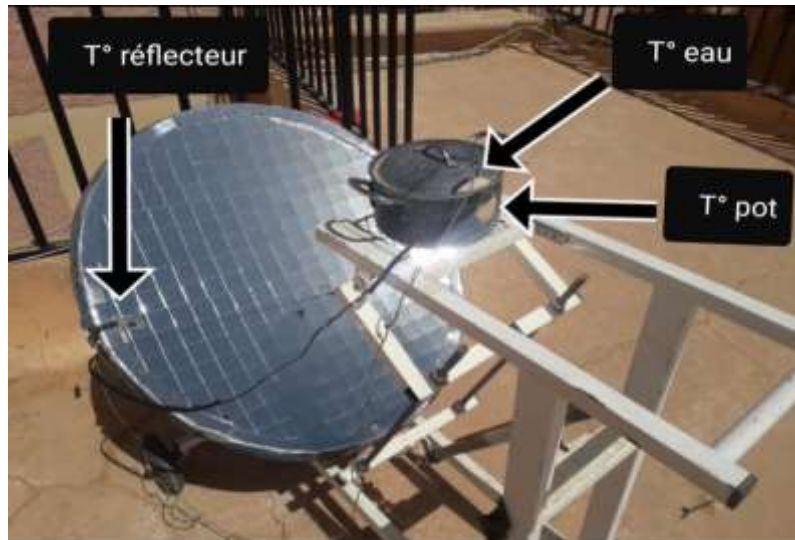


Figure III.1. Description technique du cuiseur solaire parabolique.

Le rapport de concentration du condensateur est calculé comme étant d'environ 20 lorsque de petits segments des miroirs sont assemblés pour former le collecteur, et la réflectivité des segments de miroir est de 0.8. Une marmite en Aluminium (20 cm de diamètre et 10 cm de hauteur) remplie d'eau et munie d'un couvercle noir a été placée au foyer de la cuisinière (Fig. III.2). La distance focale du concentrateur ainsi que la surface d'ouverture de la parabole sont données par les équations suivantes :

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

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

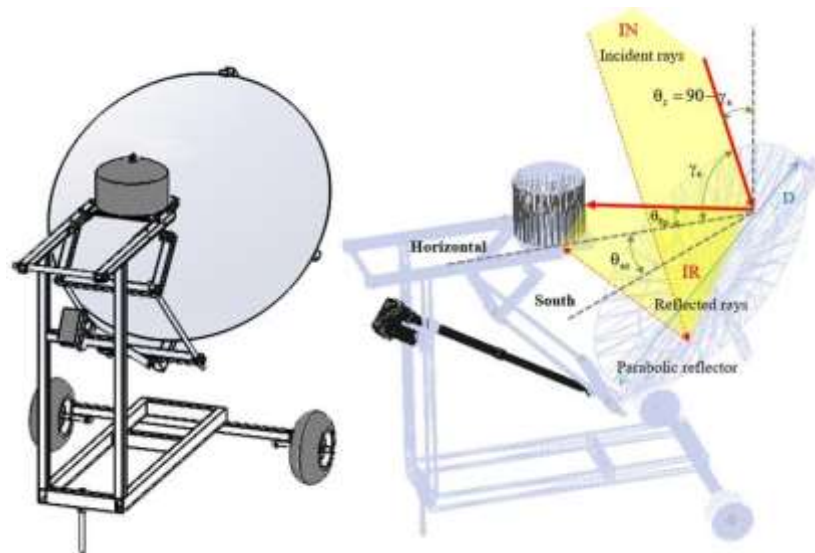


Figure III.2. Schéma du cuiseur parabolique de l'URAER, Ghardaïa et les différentes composantes du rayonnement incident sur le concentrateur.

III.2.2. Temps nécessaire d'ajustement (inclinaison et orientation) du cuiseur

La puissance produite par les cuiseurs solaires dépend de la quantité de lumière à laquelle ils sont exposés. Étant donné que la position du soleil change au cours de la journée et afin de capter le maximum de rayonnement solaire, les cuiseurs solaires doivent être constamment réorientés vers le soleil, en suivant sa trajectoire pendant la cuisson.

Le suivi manuel est effectué à différents intervalles pendant la période de cuisson. Le CSP suit manuellement les mouvements du soleil chaque 10 minutes depuis sa position initiale du réflecteur à 10h30 jusqu'à la position finale à 14h, heure à laquelle les tests s'arrêtent. La figure (III.3) montre une vue prise à deux moments différents, où l'on observe le changement de direction du concentrateur en suivant le soleil.



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

III.3. Acquisition de données

III.3.1. Montage des capteurs de mesures et installation de la chaîne d'acquisition de données

La maîtrise du comportement thermique d'un cuiseur solaire nécessite un suivi régulier des températures en plusieurs points pendant la cuisson durant son fonctionnement. A cet effet, divers capteurs de température sont utilisés, qui sont connectés à l'unité d'acquisition de données. D'autres appareils tels que des pyranomètres sont nécessaires pour mesurer le rayonnement global, direct et direct normal. Une station météo professionnelle pour mesurer la vitesse du vent, la direction du vent et l'humidité. Les données collectées ; en temps réel, sont affichés sous forme numérique et graphique (Fig. III.4) et enregistrés dans un fichier importable sur Excel.



Figure III.4. Visualisation des températures sur un micro-ordinateur connecte à une unité d'acquisition de donnée.

III.3.2. Schéma synoptique de la chaîne de mesure

La figure (III.5) ci-dessous représente le schéma de principe global de notre installation, cette dernière étant constituée de plusieurs thermocouples de type K implantés à différents endroits du cuiseur solaire, et d'autres capteurs permettant la mesure de paramètres climatiques (température ambiante, éclairement solaire et vitesse du vent) est utilisé, associé à une unité d'acquisition de

données AGILENT 34972A [55], connectée à son tour à un micro-ordinateur via un port USB. Le port USB permet un grand nombre d'applications à faible volume en termes de fils de connexion. La chaîne d'acquisition de données comprend les outils de mesure suivants :

- Thermocouple de type K pour mesurer les températures à différents endroits de la cuisinière.
- Pyranomètre et pyréliomètre pour mesurer le rayonnement solaire.
- station météorologique (mesure de paramètres climatiques, etc.).
- Module d'acquisition de données Agilent 34972A.

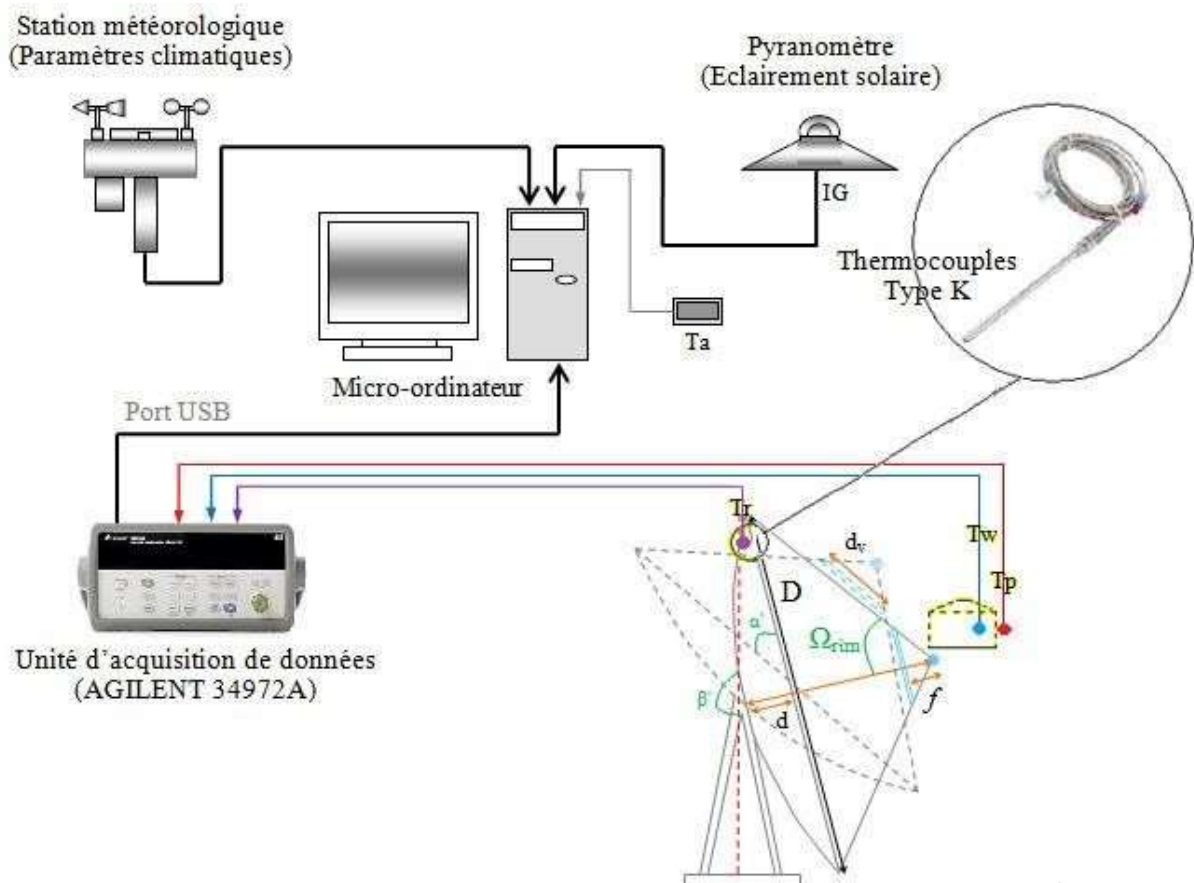


Figure III.5. Schéma synoptique de l'installation du ciseur solaire parabolique.

III.4. Tests effectués et discussion des résultats

Cette partie concerne l'expérimentation de deux ciseurs solaires : un ciseur solaire parabolique et un ciseur solaire du type boîte réalisées à l'URAER, Ghardaïa. Les profils de température des deux ciseurs solaires qui ont été expérimentalement mesurés et enregistrés à l'extérieur (en plein air) peuvent être catégorisés pour la comparaison des deux systèmes de cuisson solaire. Selon les conditions de test, il existe deux catégories : les tests sans charge et les tests avec

charge d'eau (1 kg, 2 kg). Pour tous les tests, l'orientation des cuiseurs est nécessaire afin de suivre les mouvements du soleil, il s'effectue toutes les 10 minutes avec un réglage régulier des positions du réflecteur miroir du cuiseur boîte et du réflecteur parabolique (inclinaison) pour assurer une réflexion maximale des rayons sur les ustensiles de cuisson.

III.4.1. Description des tests effectués et des données expérimentales utilisées

Des essais expérimentaux ont été menés à l'Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables d'Alger, situé à Ghardaïa, sud algérien (32.39°N, 3.78°E, 463 m d'altitude). Pendant l'expérience, la température ambiante (T_a), la température de l'eau dans le récipient (T_w), la température sur l'absorbeur du cuiseur boîte (T_p) et la température sur le réflecteur du cuiseur parabolique (T_r), le rayonnement solaire direct normal sur le concentrateur (IN) et la vitesse du vent (W_s) ont été mesurés et enregistrés à un intervalle de temps régulier. L'éclairement solaire global incident a été mesuré à l'aide d'un pyromètre Kipp & Zonen CMP21 et l'éclairement solaire direct normal est mesuré avec un pyréliomètre K & Z CHP1, en W/m^2 . La vitesse du vent (en m/s) a été mesurée en utilisant un anémomètre NRG 40H. La précision de l'anémomètre est de l'ordre de 1%. Pour les tests retenus, la vitesse du vent a toujours été inférieure à 1.3 m/s, elle est reconnue comme faible ; ainsi, l'effet du vent et sa direction serait négligeable et sans effet sur nos mesures.

La température ambiante (en °C) et l'humidité relative (en %) ont également été mesurées avec un capteur de température du type Campbell CS215 et une sonde de mesure d'humidité ainsi qu'une station météorologique. Trois thermocouples sont placés à des endroits spécifiques et différents du cuiseur parabolique et sont utilisés pour mesurer la température au niveau du réflecteur et de l'absorbeur. Un thermocouple spécial a été inséré depuis un trou percé dans le couvercle du l'ustensile peint en noir et immergé dans l'eau à l'intérieur du l'ustensile de cuisson à 20 mm au-dessus du fond de celui-ci. La mesure des paramètres climatiques et expérimentaux est ensuite réalisée à travers le système d'acquisition de données par ordinateur (data-logger AGILENT34972A) pour un intervalle de 10 minutes.

III.4.2. Tests standardisés des cuiseurs

III.4.2.1. Profils des températures pour des tests de stagnation et de chaleur sensible

Le test de chauffage de l'eau est réalisé selon la procédure de Mullick [56]. La charge d'eau totale est de 8 kg/m^2 de surface d'ouverture, et pour la surface d'ouverture de notre cuisinière, la charge d'eau totale est estimée à 1.3 kg. Les figures III.6 et III.7 montrent les températures de

l'absorbeur, de l'air, de l'eau dans les pots et de l'éclairement solaire, pour un ciel dégagé, en fonction du temps pour des journées en saison hivernale.

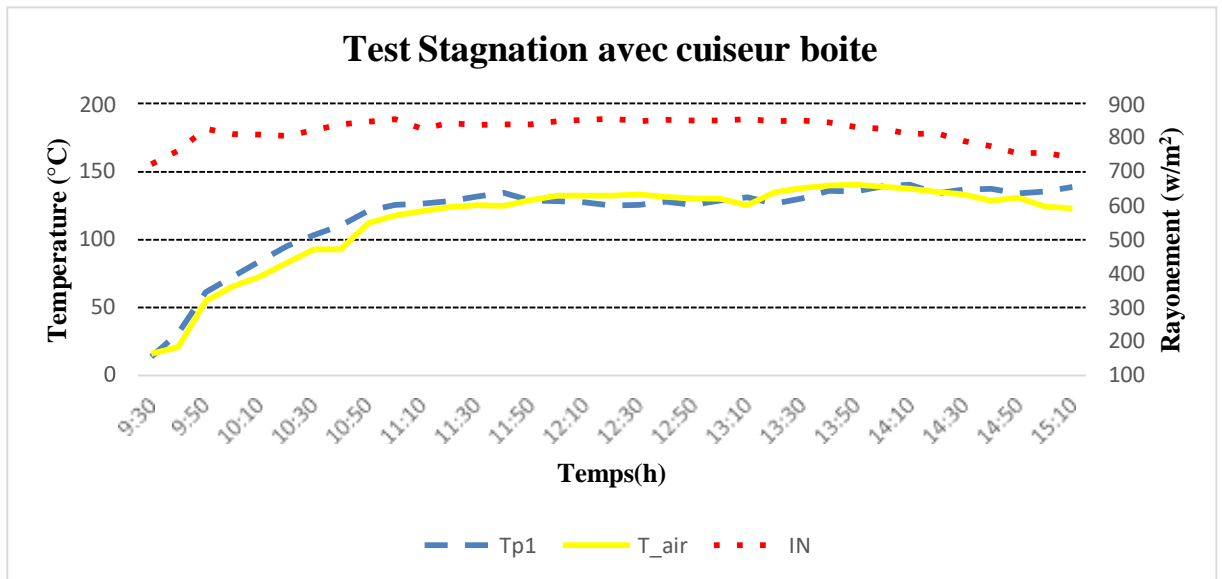


Figure III.6. Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées au niveau du cuiseur sous des conditions de test de stagnation 28 Décembre 2021.

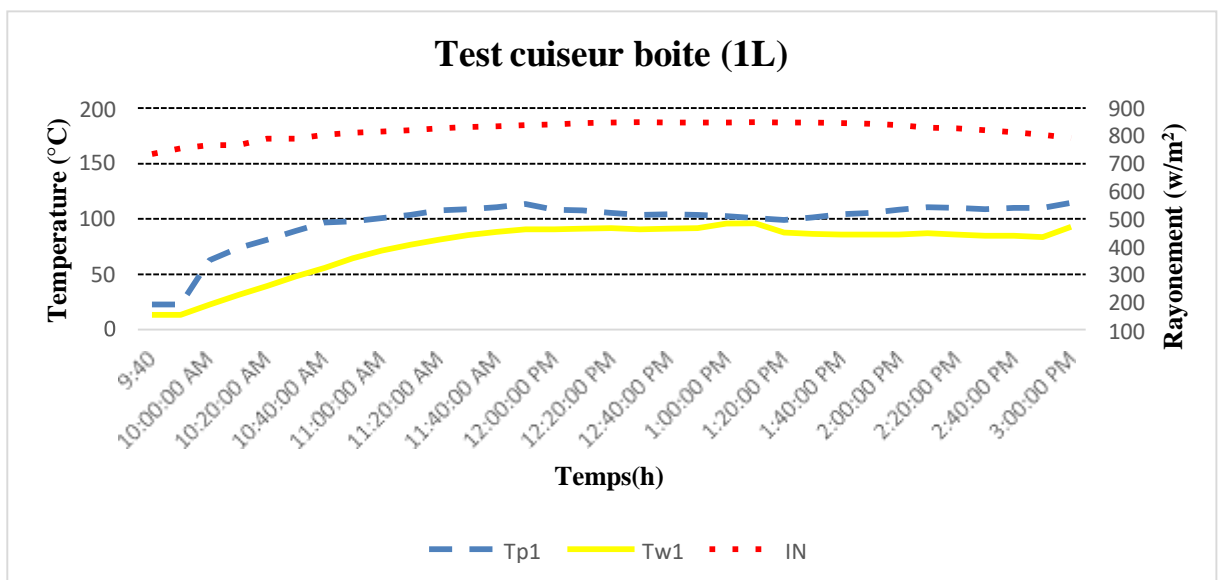


Figure III.7. Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées au niveau du cuiseur sous des conditions de chaleur sensible 29 Décembre 2021.

Pour le premier essai, la température maximale de la plaque absorbante est de 140.2 °C mesurée à 14h10 heure locale (Fig. III.6), avec une valeur de rayonnement solaire direct normal de

811 W/m². Les résultats obtenus en saison hivernale (28 Décembre 2021) ont montré une hausse remarquable des températures jusqu'à la stagnation autour de 11h. Pendant l'hiver, le cuiseur recevra des valeurs d'intensité non négligeable malgré la hauteur du soleil, qui est faible en hiver.

Pour le test de chauffage de l'eau (Fig. III.7), nous avons commencé le test à 09h40min. La température initiale de l'eau est de 13.7°C et la température ambiante est de 22.8°C. La température de la plaque absorbante atteint un maximum de 113.4 °C à 11 h 50, ce qui correspond à une valeur de rayonnement solaire de 837 W/m². Le temps nécessaire pour élever la température de l'eau à 90°C est de 90 minutes.

III.4.2.2. Différence de température d'eau

La température de l'eau à l'intérieur de la cuve est comparée à la température ambiante pour vérifier l'efficacité du cuiseur. La figure (III.8) montre un exemple d'essai de chauffage de l'eau réalisé le 10 Janvier 2022. La figure montre l'évolution de la différence de température entre l'eau dans l'ustensile et l'air ambiant en fonction de l'heure de la journée. A 10h, la différence de température était d'environ 28.6°C, à ce moment la température de l'eau était de 30.7°C et la température ambiante était de 21.3°C. Cette différence atteint une valeur maximale de 63.8 °C à 11h50, heure à laquelle la température ambiante était de 22.1 °C. Les résultats ont montré que le concentrateur était capable de maintenir la température de l'eau au-delà de la température ambiante durant toute la période de cuisson avec une augmentation continue de la différence température.

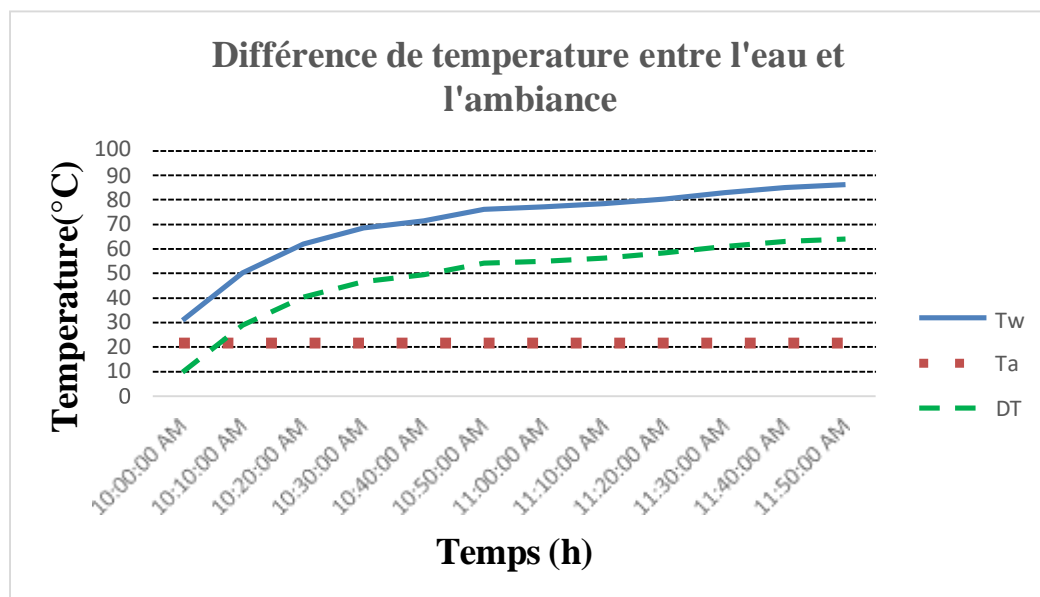


Figure III.8. Courbe de différence de température d'eau et l'ambiance pour le test du 10 janvier 2022.

III.4.2.3. Profils des températures pour des tests relatifs à l'influence du vent

Les effets des facteurs externes et principalement le vent affectent la température de l'ustensile négativement (Fig III.9), c'est pourquoi nous avons pensé à ajouter une boîte en verre pour minimiser ; voir éliminer, l'effet du vent (Fig III.10). Pour cela nous avons choisi des épaisseurs de verre de 5mm et 8mm (Fig III.11). La boîte en verre permet aussi de créer un effet de serre autour de l'ustensile et permettre l'augmentation des températures. Un exemple de graphe est donné pour un test de chauffage sensible de 1L avec les deux boîtes à vitre (Fig III.12).

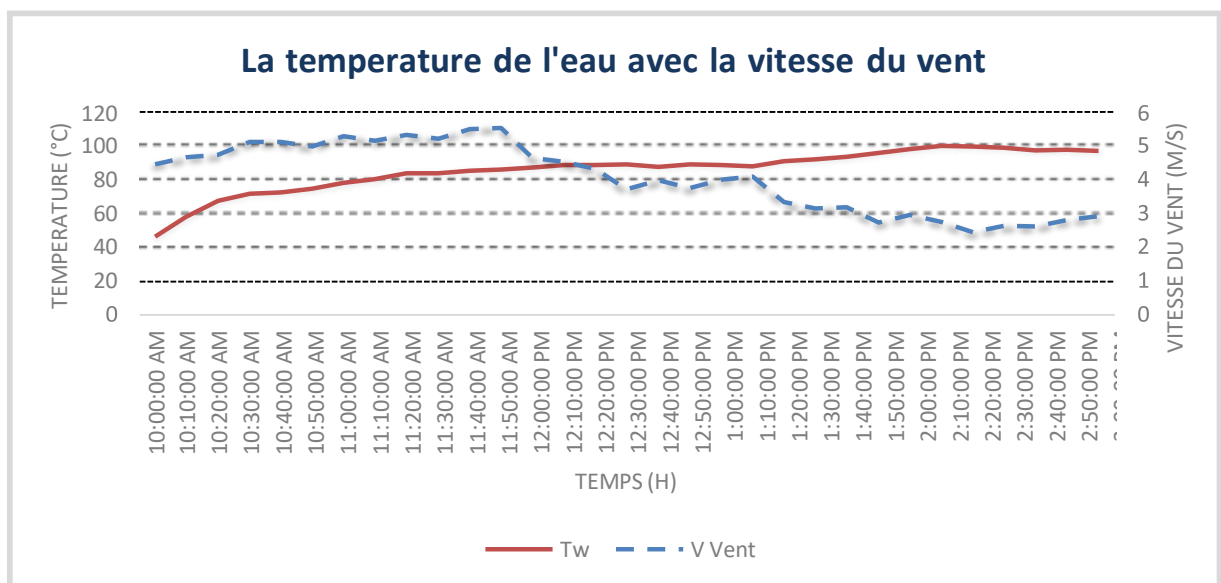


Figure III.9. Test montrant l'effet de la vitesse du vent (m/s) sur l'évolution des températures de l'eau (13 janvier 2022).



Figure III.10. Vue du cuiseur parabolique durant les tests de chauffage effectués sans et avec la



Figure III.11. Test du cuiseur avec la boîte vitré avec une épaisseur de 5mm et 8mm.

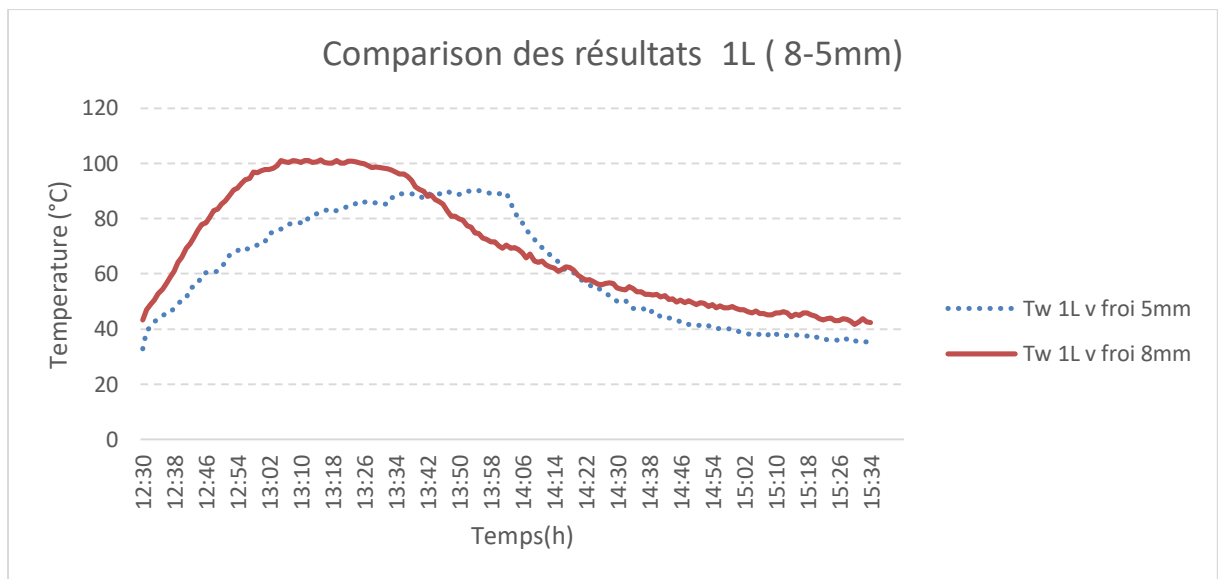


Figure III.12. Comparaison des résultats des températures de l'eau avec la boîte d'épaisseur de 8mm (12 Mai 2022) et 5mm (17 Mai 2022) pour une charge de 1L.

- Après plusieurs tests, nous avons choisi les journées 12 Mai 2022 pour 8 mm et 17 Mai 2022 pour 5 mm, en raison de la convergence du rayonnement solaire entre elle, pour une comparaison très proche et précise.

III.4.2.4. Profils des températures pour des tests de chauffage et refroidissement

Des tests de chauffage et de refroidissement de l'eau ont été effectués sur le cuiseur à concentration avec une surface d'ouverture de 0.66 mètre carré. Le pot est en aluminium avec une surface extérieure de 0.03 m². Le rapport entre le trou et la surface du pot C est de 22. La capacité calorifique du pot est de 0.921 KJ / kg. Un litre d'eau est chauffé à 90-95°C au cours de ces expériences. Le concentrateur est initialement réglé de manière à ce que la tache lumineuse soit située au fond de l'ustensile. Lorsque la température de l'eau atteint 90° - 95° C, le concentrateur est ombragé avec un grand parapluie de pique-nique et une courbe de refroidissement est obtenue (Fig III.13) :



Figure III.13. Vue du cuiseur parabolique durant les tests de chauffage et refroidissement effectués sans et avec la boîte en verre.

La figure (III.14) montre une courbe typique de chauffage et de refroidissement avec une charge de 2L sans utilisation de la boîte en verre et les figures (III.15) et (III.16) illustrent des courbes de chauffage et de refroidissement avec une charge de 2L avec utilisation d'une boîte en verre d'épaisseur variable et les figures (III.17) et (III.18) illustrent des courbes de chauffage et de refroidissement avec une charge de 1L avec utilisation d'une boîte en verre d'épaisseur variable, les tests sont effectués durant les mois d'Avril et de Mai 2022.

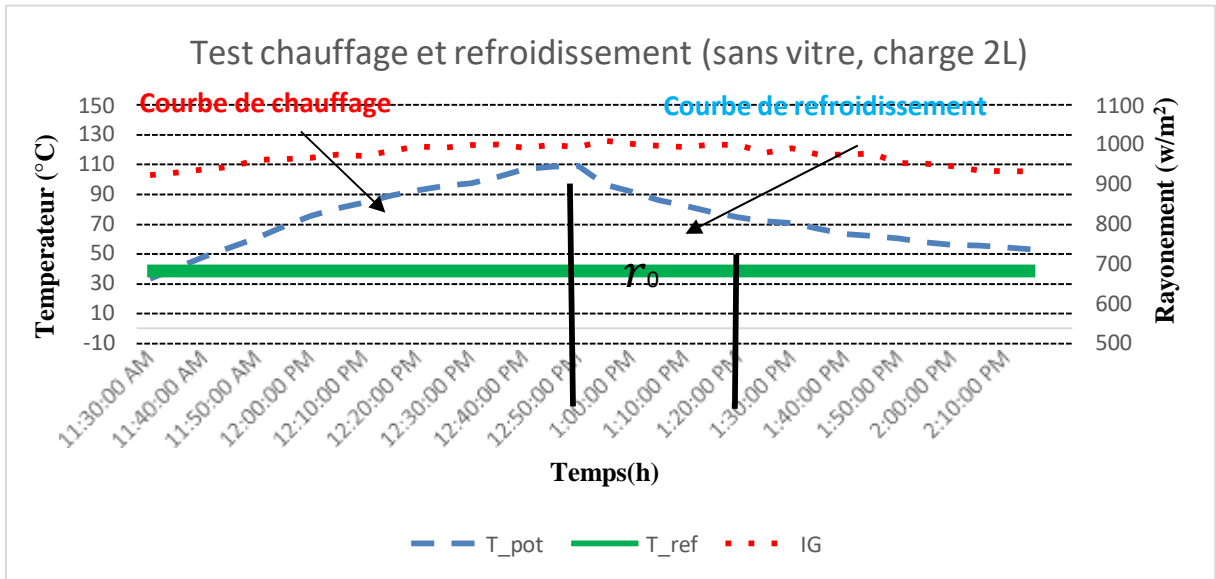


Figure III.14. La variation de la température de l'eau dans un test de chauffage sensible et refroidissement sans vitre le 17 Avril 2022.

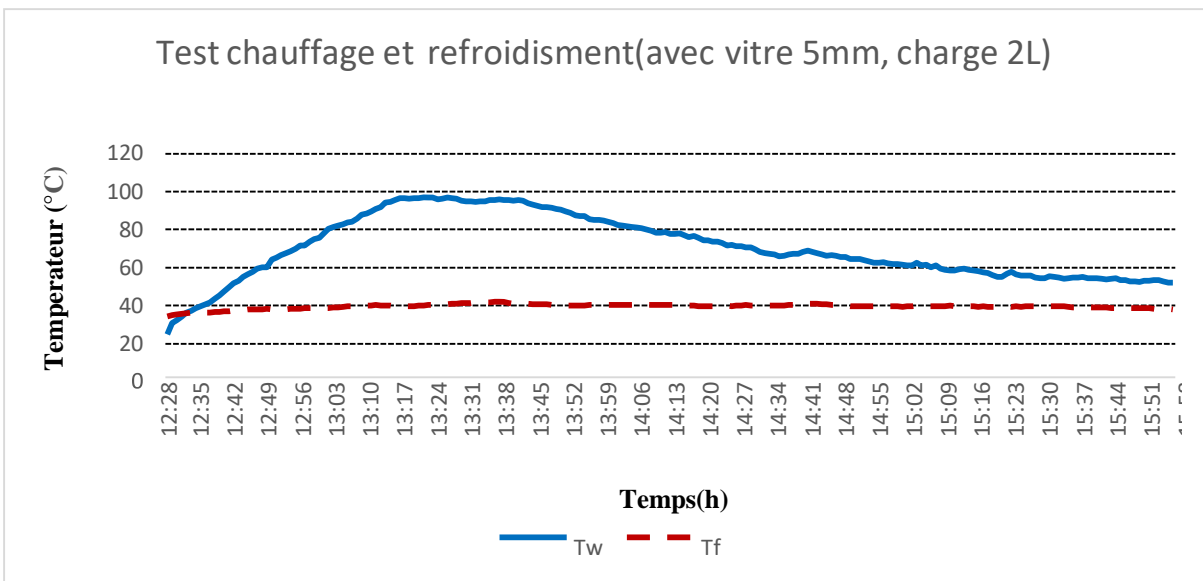


Figure III.15. La variation de la température de l'eau dans un test de chauffage sensible et refroidissement avec vitre (5mm) le 8 Mai 2022.

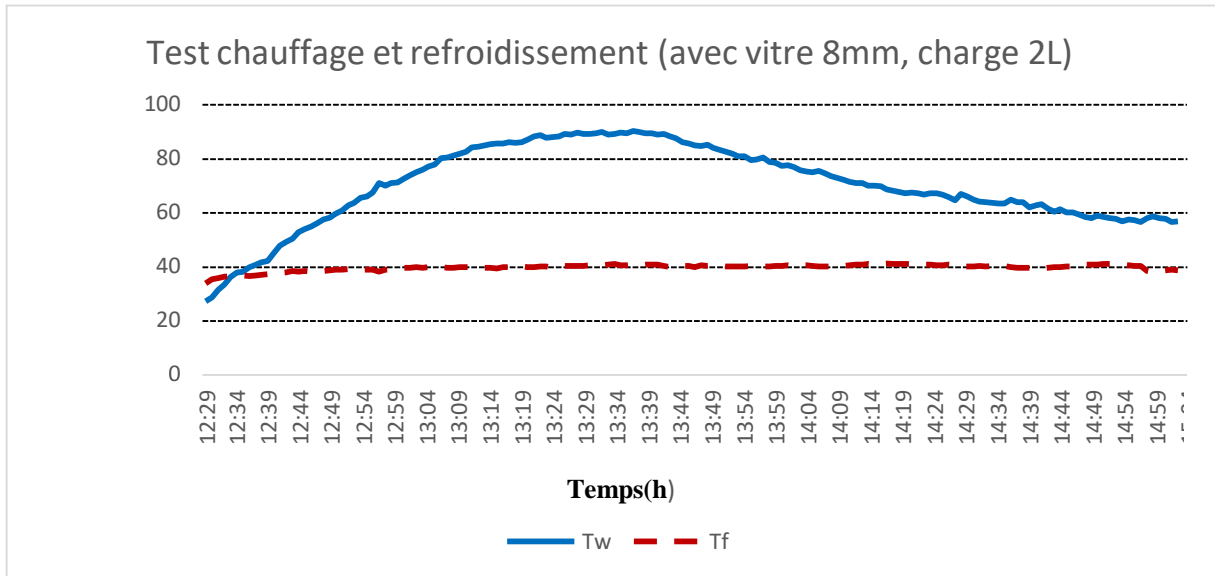


Figure III.16. La variation de la température de l'eau dans un test de chauffage sensible et refroidissement avec vitre (8mm) le 11 Mai 2022.

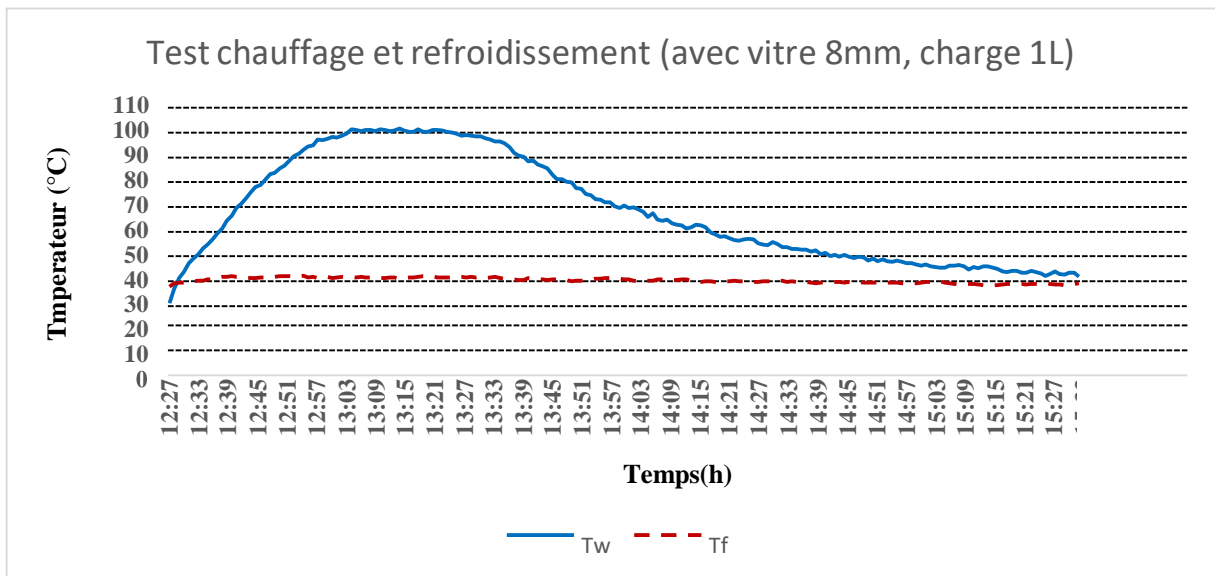


Figure III.17. La variation de la température de l'eau dans un test de chauffage sensible et refroidissement avec vitre (8mm) le 12 Mai 2022.

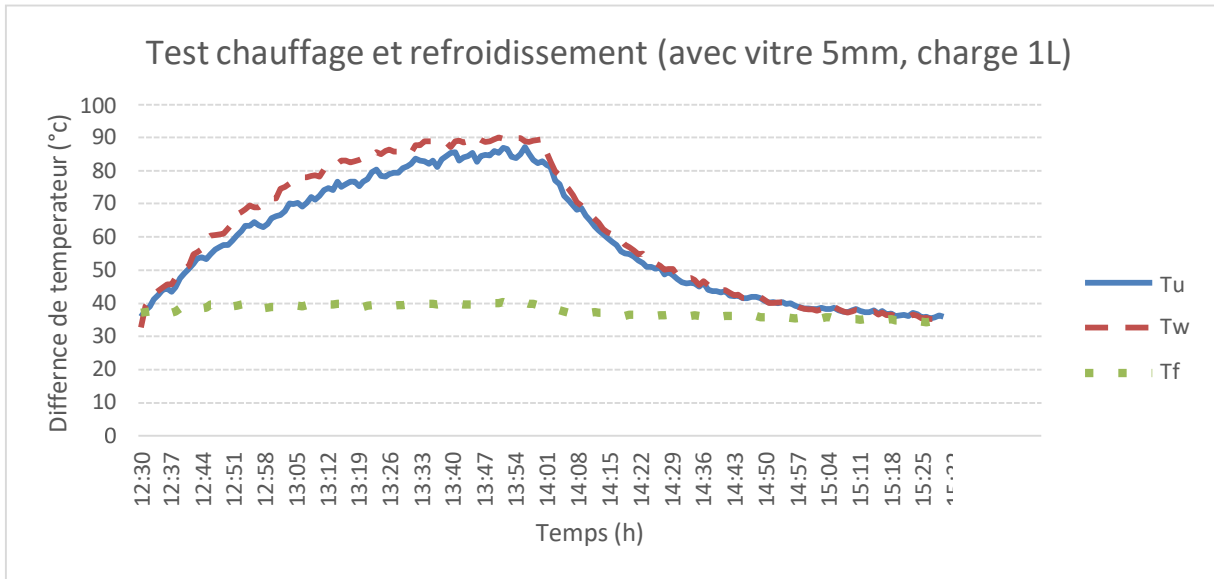


Figure III.18. La variation de la température de l'eau dans un test de chauffage sensible et refroidissement avec vitre (5mm) le 12 Avril 2022.

On peut remarquer d'une manière générale que après l'ajout de la boite en verre quelques soit l'épaisseur du verre, les températures se trouve augmentées par rapport à la configuration du cuiseur sans boite (1h30 contre 1h pour atteindre la stagnation), ceci est dû au faite que l'ajout de la boite élimine l'effet de refroidissement par le vent qui diminue les températures, autrement dit : le vent à un effet inversement proportionnel aux températures. Nous avons remarqué aussi que l'épaisseur de 8 mm est plus appropriée au cuiseur parabolique car la vitre de 5mm d'épaisseur se retrouve fissurée et cassée après quelques moments d'utilisation à cause des températures élevées (Fig III.19)



Figure III.19. Vue de la boite en verre utilisée de 8 mm (intacte) et de 5 mm (cassée).

III.5. Comparaison des courbes de températures

III.5.1. Courbes des températures de l'eau pour différentes charges

Lors de ce test réalisé au mois de Janvier, la marmite a été remplie d'un premier volume d'eau (1 litre) et le cuiseur concentrateur mis à sa position initiale. La température de l'eau T_{w1} augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire atteignant un maximum de $86\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 11 heures (Fig. III.20). Le lendemain dans les mêmes conditions climatiques, l'ustensile est chargé d'un volume de 2 litres d'eau (Fig. III.20) et l'évolution de la température de l'eau est observée dans le même profil qu'avec une charge de 1 litre mais avec un maximum de $84\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 11h. On peut aussi voir que l'eau dans le second cas (2 litres) met plus de temps à atteindre $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (température adaptée à la cuisson) que dans le premier cas (1L) et nous pouvons conclure que la masse du liquide dans le récipient affecte les performances du cuiseur.

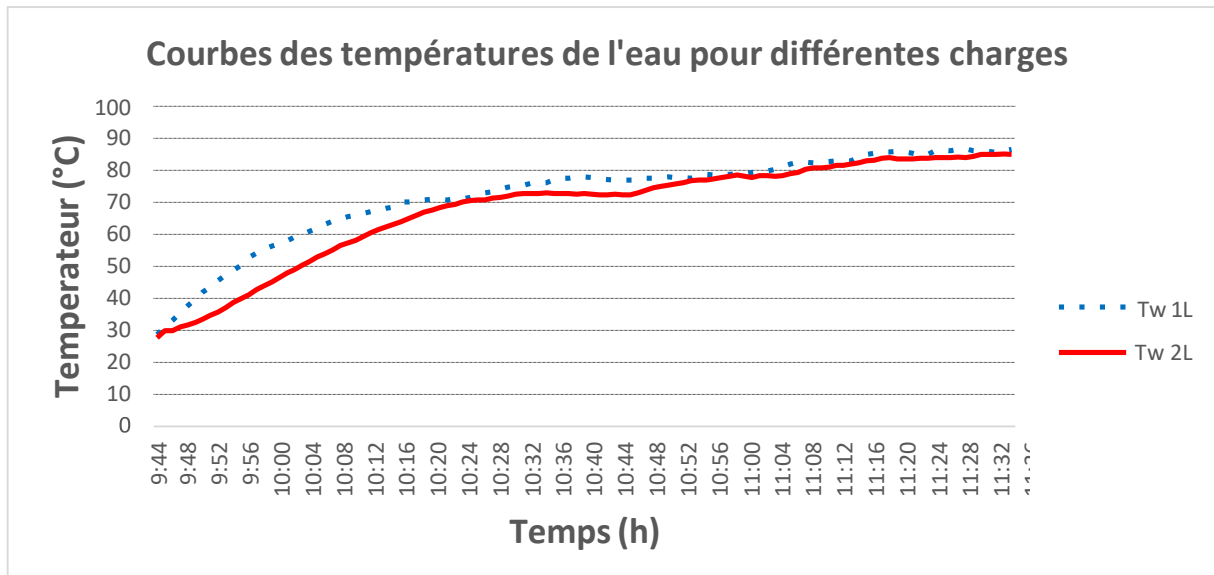


Figure III.20: Variations journalières des courbes des températures de l'eau pour différentes charges 1L et 2L.

III.5.2. Courbes des températures de l'eau pour différents condition climatiques

Ce test concerne la comparaison entre les graphes des températures obtenus des tests du cuiseur solaire parabolique pour un jour clair et un jour perturbé (en raison de l'intermittence des passages nuageux). Les variations de l'éclairement direct normal (avec poursuite solaire) incident sur le cuiseur parabolique, la température du réflecteur, de l'ustensile et la température de l'eau dans

le pot de cuisson, mesurés en temps réel dans des conditions de test de chaleur sensible (chauffage) par ciel clair et perturbé et en absence du vent, sont représentées sur la figure III.21 et la figure III.22 pour un jour du mois de Décembre de la saison hivernale.

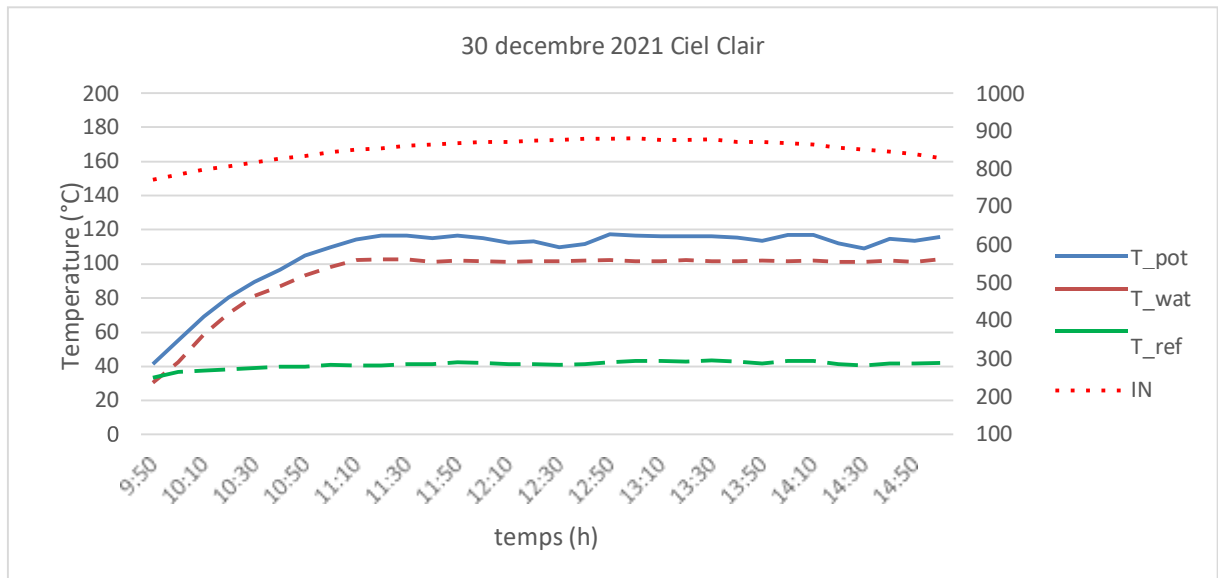


Figure III.21: Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées du cuiseur parabolique sous des conditions de ciel clair (30 Décembre 2021).

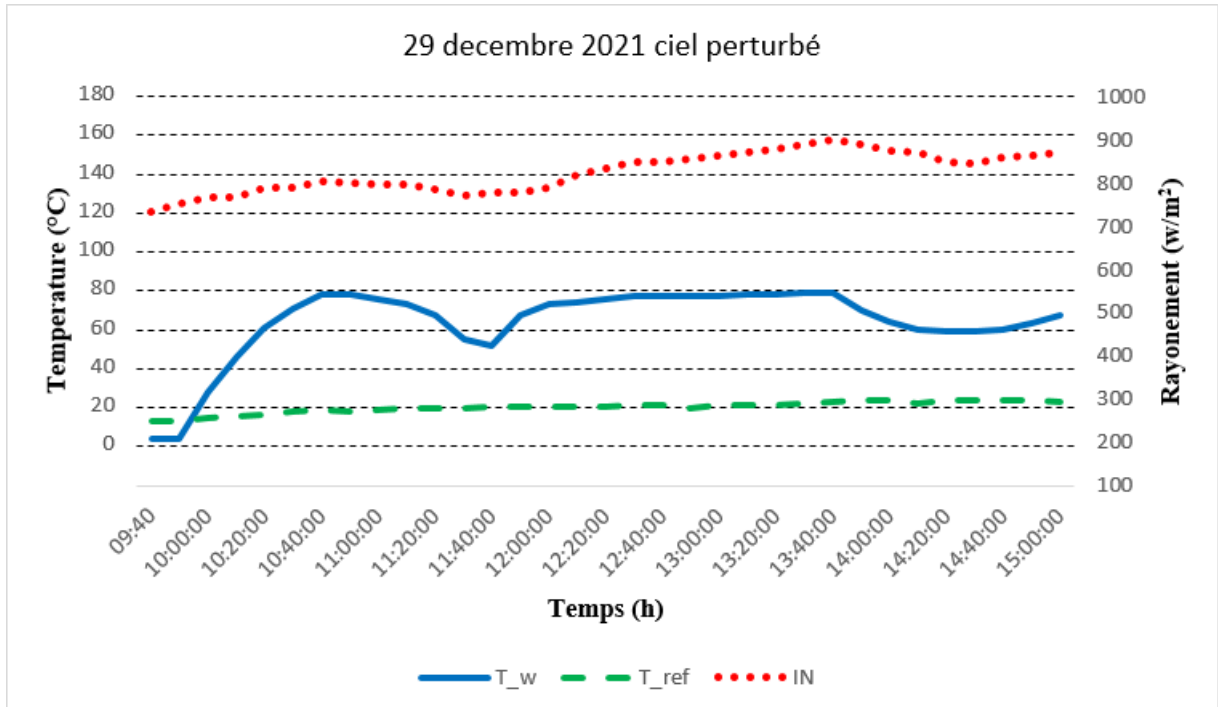


Figure III.22: Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées du cuiseur parabolique sous des conditions de ciel perturbé (39 Décembre 2021).

Pour des conditions de ciel clair, le cuiseur atteint une température d'eau maximale de 80°C souhaitable pour la cuisson juste après 40 min d'exposition avec une valeur d'éclairement solaire direct normal dépassant les 817 W/m². La température de l'eau reste stagnante pendant un grand intervalle de la journée (4 heures), ce qui permet une cuisson pendant différents moment de la journée à des températures saines.

Pour les conditions de ciel perturbé, la température de l'eau est comprise entre 60 et 80 °C pour approximativement 2 h de la période expérimentale, elle ne dépassera les 80°C. Ces valeurs ont été mesurées à une valeur d'éclairement solaire direct normal ne dépassant pas les 800 W/m² à midi et une température ambiante moyenne égale à 21 °C. Suivant ces résultats obtenus ; dans des conditions de ciel perturbé, montrent que le cuiseur solaire ne peut être exploité pour la cuisson à cause des valeurs des températures de l'ustensile transmis à l'eau dedans qui restent faibles et conduisent à des temps de cuisson très élevés. Dans ce cas le cuiseur peut être utilisé pour des fins de préchauffage.

III.5.3. Courbes des températures de l'eau pour deux différents types de cuiseurs

Au cours de ce test, les deux cuiseurs avec une charge d'eau de 1L dans les ustensiles sont laissées exposés au rayonnement solaire entre 9h40 et 15h00 (Fig. III.23). Les températures de l'eau à l'intérieur des ustensiles ont été enregistrées toutes les 10 min d'intervalle, les valeurs d'intensité solaire (IN) et de température ambiante (T_a) ont également été mesurées. Les résultats de cet essai sont illustrés sur la courbe de la figure III.24, obtenue pour un jour d'hiver (29 décembre 2021).



Figure III.23: Vue prise des deux différents types de cuiseurs testés simultanément (29 Décembre 2021).

Selon la courbe de la figure (III.24), il est clair que la température de l'eau dans les deux ustensiles met du temps à atteindre le maximum. Néanmoins, on peut remarquer que la température de l'eau dans l'ustensile cuiseur parabolique est bien supérieure à celle de l'ustensile cuiseur boîte, elle dépasse les 80°C dès le début de la journée et atteint 102°C juste après 10h40 matin ou la pression dans l'ustensile augmente et la vapeur d'eau s'accumule, tandis que pour le cuiseur boîte, il faut attendre jusqu'à 11h30 pour atteindre 85°C. C'est un point positif pour le cuiseur parabolique puisque ces valeurs de température vont être transmises au fluide (qui est de l'eau) lors de la cuisson. Des valeurs élevées de température de l'air sont donc recherchées.

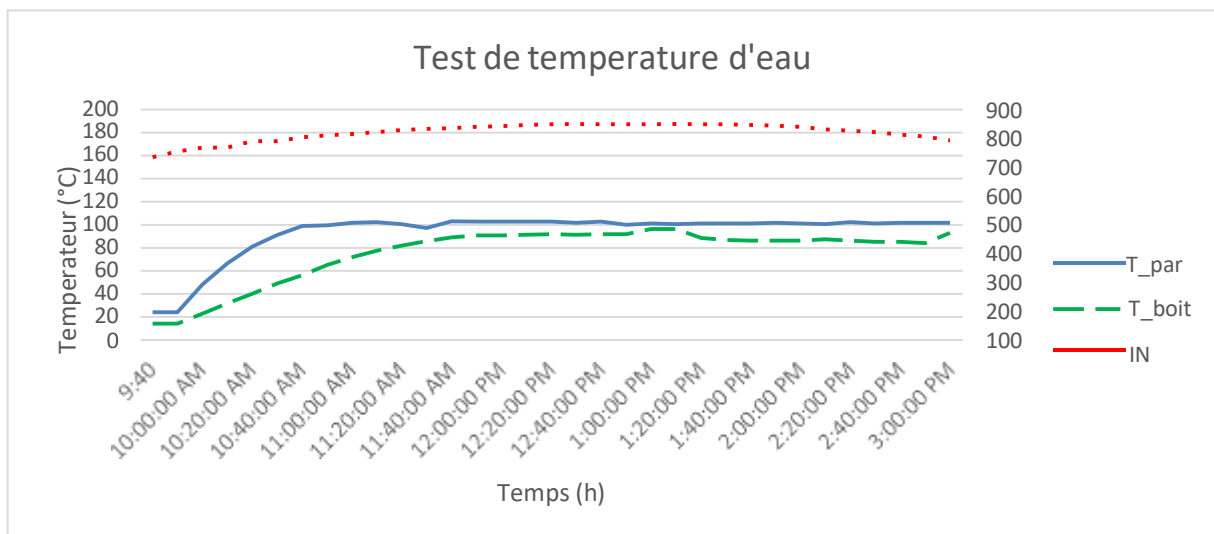


Figure III.24: Variation des températures de l'eau mesurées à l'intérieur des ustensiles des cuiseurs et variation de l'éclairement solaire correspondant au (29 décembre 2021).

III.5.4. Quelques tests de cuissons effectués à l'aide du cuiseur concentrateur

- **Test de cuisson des escalopes**

Grâce à cette première expérience du 18 Mai 2022, nous avons pu préparer des escalopes de poulet avec quelques légumes. Début de cuisson était au environ de 9h, la cuisson a duré environ une 43 min (jusqu'à 9h43 min). A la fin de la cuisson les escalopes et les légumes étaient parfaitement cuits (Fig III.25).



**Début du
test de
cuisson**



**Fin du test
de cuisson**

Figure III.25: Vue prise lors d'un test de cuisson des escalopes avec quelques légumes dans l'ustensile du cuiseur parabolique (le 18 Mai 2022).

- **Test de préparation d'un café presse**

Avec cette deuxième expérience du 18 Mai 2022, nous avons préparé du café dans une presse placé au foyer du cuiseur solaire. Débutant au environ de 8h22min, le café a pris 31 minutes pour être prêt, c'est-à-dire vers 8h53, comme le montrent la figure III.26 suivante :



Début du
test de
cuisson



Fin du test
de cuisson

Figure III.26: Vue prise lors d'un test de préparation d'un café dans une presse placé au foyer du cuiseur parabolique (le 18 Mai 2022).

III.6. Evaluation des performances thermiques du cuiseur

III.6.1. Tracé de la courbe caractéristique du cuiseur parabolique

Des tests de chauffage et de refroidissement de l'eau ont été effectués sur le cuiseur parabolique afin de tracer la courbe caractéristique du cuiseur parabolique. Le pot est en aluminium avec une surface externe de 0.03 m^2 . Le rapport ouverture / surface de pot, C , est de 22. La capacité thermique du pot est de 2 KJ/kg . Un litre d'eau est chauffé à $90-95 \text{ }^\circ\text{C}$ durant ces tests. Le concentrateur est ajusté initialement de sorte que la tache lumineuse soit positionnée sur le fond du

pot, près de son bord. Lorsque la température de l'eau atteint 90° - 95 °C, le concentrateur est mis à l'ombre et la courbe de refroidissement est obtenue.

La courbe caractéristique correspondante de notre cuiseur est illustrée sur la figure III.27 pour diverses valeurs de températures ambiantes et pour un éclairement de 750 W/m². La lecture de cette courbe se fait de la manière suivante: A une latitude de 32° avec une valeur d'éclairement solaire moyenne de 750 W/m² et une température ambiante moyenne de 30 °C, le temps nécessaire pour faire bouillir une quantité d'eau bien déterminée est de 50 min.

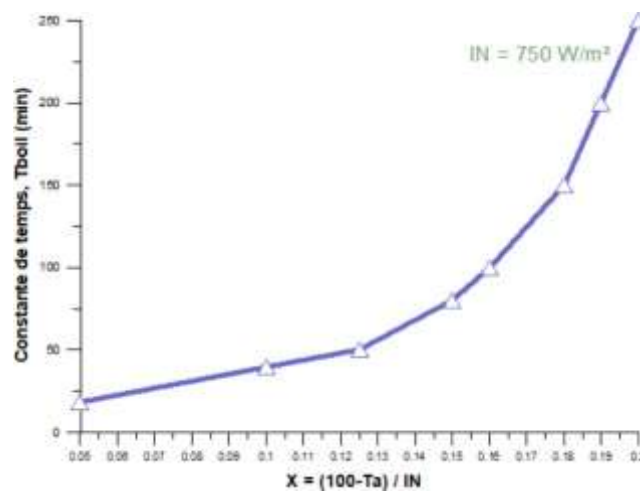


Figure III.27: Courbe caractéristique des performances du cuiseur réalisé pour un éclairement solaire de 750 W/m².

III.6.2. Paramètres caractérisant le cuiseur parabolique

La constante de temps de refroidissement peut être déduite à partir de la courbe de refroidissement, elle est égale à $\tau_o = 40$ minutes. Après avoir déterminé la constante de temps de refroidissement, on peut alors trouver la valeur de F'UL qui est de 93 W/m² pour la figure III.14 et il est de l'ordre de 67 W/m² pour la figure III.16.

Les valeurs du facteur d'efficacité optique (F'η_o) du concentrateur parabolique a été déterminée à partir de la courbe de chauffage sensible sur des intervalles de 10 minutes (τ). Pour le premier intervalle de test, la valeur initiale de la température de l'eau doit être utilisée pour Tw₁ et la valeur de la température de l'eau à la fin de l'intervalle de 10 minutes pour Tw₂. Par la suite, la valeur de Tw₂ pour le premier intervalle doit être utilisée comme Tw₁ pour le deuxième intervalle. Ce processus doit être poursuivi pour les intervalles de tests suivants. On observe que le rendement optique augmente à mesure que la tache lumineuse se déplace vers le centre du fond du pot, puis

décroît lorsque la tache lumineuse s'éloigne du centre. Les valeurs ont été trouvées presque identiques. Ainsi, l'éclairement solaire affecte très peu les valeurs du facteur d'efficacité optique. Les principaux facteurs influençant ces valeurs sont la réflectivité du réflecteur et l'absorptivité de l'ustensile. Les valeurs moyennes de $F'\eta_0$ sont acceptables (0.38) en raison de la grande réflectivité du concentrateur qui est fait de pièces de verre, de la surface d'interception effective et de l'absorption de la surface extérieure l'ustensile de cuisson et de l'orientation adéquate du concentrateur toutes les 10 minutes.

III.6.3. Courbe du rendement instantané

La figure III.28 illustre des droites du rendement instantané du cuiseur solaire parabolique en fonction de $(\Delta T / I_n)$, au cours de deux tests :

L'équation de la courbe pour 1.5 kg de charge est : $\eta = 57.4 - 798.7 \Delta T / I_n$

L'équation de la courbe pour 2 kg de charge est : $\eta = 48.2 - 691.8 \Delta T / I_n$

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

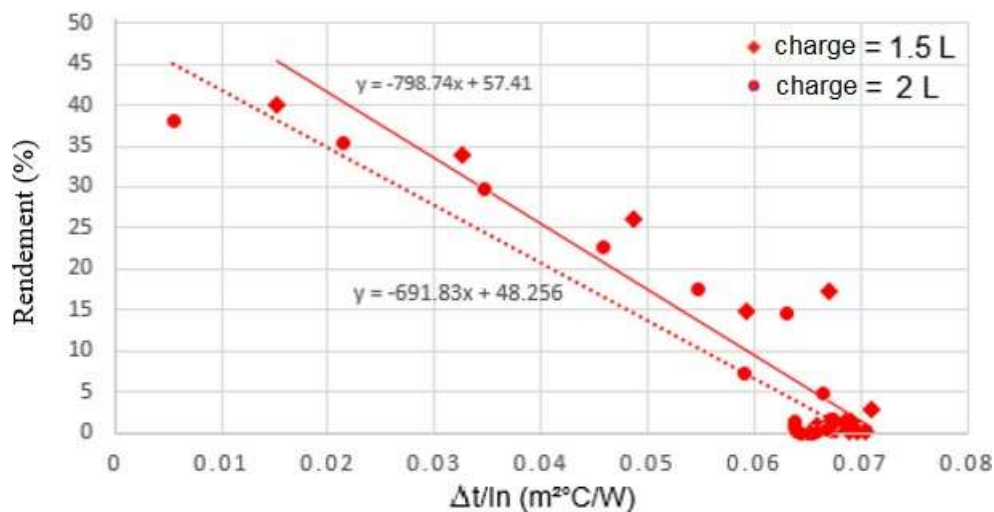


Figure III.28: Rendement instantané pour deux tests effectués sur le cuiseur solaire parabolique.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, une évaluation des performances du cuiseur parabolique réalisé suivant les Normes Internationaux est présentée. Les résultats des tests effectués sur le cuiseur solaire parabolique correspondant sont illustrés et discutés. A partir des résultats des tests, il est démontré que le temps pour atteindre la stagnation est plus court dans les cuiseurs paraboliques, ceci à un bénéfice sur les temps de cuisson qui sont réduits.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

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

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

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

Les tests expérimentaux sont réalisés dans le but démontrer l'efficacité du cuiseur parabolique à accomplir la tâche de cuisson et améliorer ces performances. A partir des résultats des tests, il est démontré que :

- Le temps pour atteindre la stagnation est plus court dans les cuiseurs parabolique, ceci à un bénéfice sur les temps de cuisson qui sont réduits.
- En période nuageuse le cuiseur parabolique qui ne fonctionne pas avec un éclairement diffus peut être utilisé pour un préchauffage ou pour réchauffer les aliments.
- Les pertes thermiques importantes au niveau du foyer du cuiseur parabolique peuvent être réduites avec une simple boîte en verre choisie avec précision.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Mefti ; M.Y Bouroubi ; H. Mimouni, Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N° 2, P12, décembre 2002.
- [2] J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [3] M. Capderou, 'Atlas solaire de l'Algérie', Modèles théoriques et expérimentaux, vol. 1, t1, office des publications universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [4] Site internet : https://fr.wikipedia.org/wiki/C3_89nergie_solaire.
- [5] Site internet : <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-solaire-6679/>.
- [6] YETTOU. F. 'Conception et réalisation d'un système de cuisson solaire destiné au site saharien (Ghardaïa, Algérie)', Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté de Technologie Département d'Electrotechnique, Université Hadj Lakhdar Batna, 2015.
- [7] M. Geyer, 'Report on the SolarPACES, START Mission to Algeria', IEA SolarPACES, USA, 34 p., 2003
- [8] 'Algérie: Bilan énergétique national de l'année 2005', Ministère de l'Energie et des Mines, Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables, 2006.
- [9] Alain FERRIERE et Gilles FLAMANT IMP-CNRS, Centre du Four Solaire, BP5, 66125 Font-Romeu, Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies.
- [10] Pierre Garcia, Outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur, thèse de doctorat, université de Perpignan, France, (2007).
- [11] Site internet : www.atlascuisinesolaire.com.
- [12] Syndicat des énergies renouvelables 13-15, rue de la Baume 75008 Paris, juin 2012.
- [13] P. Bessemoulin, J.Oliviéri, Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, France:Document Meteo-France (Service central d'exploitation de la meteorology and Centre radiométrique de Carpentras), 2000.
- [14] Jean-Marc Bonnefond. Pratiques et outils de mesure des rayonnements naturels dans les domaines visibles, solaire et infrarouge. Les Capteurs de mesures du rayonnement naturel, INRA, UR1263 EPHYSE, - F-33140, Villenave d'Ornon.
- [15] Yakhelef Yasser et Mehdaoui Adel, Contribution à la détermination expérimentale des performances thermiques d'un cuiseur solaire parabolique. 2018/2019.

- [16] 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
- [17] http://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2014/10/cartegeographique_GHARDAIA.html
- [18] <https://fr.dreamstime.com/illustration-stock-latitude-longitude-coordonn%C3%A9es-image60730680>. Consulté le : 05-06-21 publie le : 04-02-17
- [19] <http://www.meridienne.org/atelier/glossaire/angle-horaire/> Consulté le : .05-06-21 publie le : 04-06-14
- [20] J. Hofierka and M. Sári, 'The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications', Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy, 11- 13 September 2002.
- [21] YETTOU Fatiha, 'Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude', Mémoire de magister, Département d'électronique électricité solaire, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER, 2009.
- [22] BAROUD Hinde et DJEKAOUA Habiba, Estimation de l'ensoleillement par deux modèles semi-empiriques dans la région de Ghardaïa, Mémoire de Master académique, 2017/2018.
- [23] Pierre Bessemoulin et Jean Olivieri, Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, La Meteorologie 8e serie - n° 31 - septembre 2000.
- [24] A. Ricaud, "Gisement solaire et transfert énergétique", université de CERGY-PONTOISE, mémoire master énergies renouvelables, jan 2011.
- [25] «SOLARPACES,» solarpaces, 2013. [En ligne]. Available: <http://www.solarpaces.org/>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [26] 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.
- [27] Thèse de Doctorat en Sciences Présentée par : YETTOU Fatiha 'Conception et réalisation d'un système de cuisson solaire destiné au site saharien (Ghardaïa, Algérie)'.Univ Batna 2 Faculté de Technologie, Département d'Electrotechnique.
- [28] Solar cookers, How to make, Use and enjoy,10th Edition, 2004, solarcookers.org.
- [29] M. Asma, L.Messaouda, dirigé par : Dr S.Lazher et Dr Y. Fatiha 'étude expérimentale pour la détermination de la courber caractéristique d'un cuiseur solaire parabolique testé sous climat aride de Ghardaïa', Univ Batna 2 faculté de technologie.
- [30] http://solarcooking.wikia.com/wiki/Solar_Cooking_NV
- [31] <http://solarcooking.Org/directory.htm>

- [32] F. Yettou, A. Gama, B. Azoui, A. Malek, Etude comparative entre deux types de cuiseurs solaires boîtes en milieux arides, 2ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables (SIENR12), 15-17 Octobre 2012, Ghardaïa – Algérie.
- [33] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek, N. L. Panwar, A. Gama, T. Arrif, H. Merarda, Comparative assessment of two different designs of box solar cookers under Algerian sahara conditions, *Revue des Energies Renouvelables CDER*, Volume 18, Numéro 2, pages 227-234, Juin 2015.
- [34] F. Y. Gama, B. Azoui, A. Malek, N.L. Panwar, A. Gama, Energetic and exergetic evaluation of solar box cooker in Algerian climatic conditions, *Int. J. Exergy*, Vol. 16, No. 3, pp.337–357, (2015).
- [35] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek, A. Gama, T. Arrif, H. Merarda, R. Khelifi, Contribution à la cartographie de l'efficacité d'un cuiseur solaire de type boîte en Algérie – Résultats préliminaires –, 1ère Conférence Nationale sur les Energies Renouvelables et leurs Applications (CNERA'14), 18-19 Février 2014, Adrar – Algérie.
- [36] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek, A. Gama, N. L. Panwar, Estimation et cartographie des températures d'un cuiseur solaire boite avec et sans réflecteur en Algérie, 3ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables (SIENR14), 13-14 Octobre 2014, Ghardaïa – Algérie.
- [37] <http://wikipedia.com>.
- [38] «Solar Cookers International,» SCI, [En ligne]. Available : <http://www.solarcookers.org>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [39] «iD Cook, le spécialiste de la cuisson solaire,» IDCOOK, 2011. [En ligne]. Available : <http://www.iDCOOK.com>. [Accès le 13 Décembre 2014]
- [40] Document, «Cuiseurs solaires : comment construire, employer et apprécier,» Solar Cooker International (SCI), California, USA, 2004.
- [41] Solar Cooking, SCInet, [En ligne]. Available : <http://solarcooking.org/>.
- [42] Solar Cookers International, SCI, [En ligne]. Available : <http://www.solarcookers.org>.
- [43] A. Dizier, F. Pignon, «Manuel de cuisson solaire,» Edition commune SCI / iD COOK, Paris, France, 2005
- [44] C fait maison, 2014. [En ligne]. Available : <http://www.cfaitmaison.com>.
- [45] Christelle Souriau & David Amelin, La collection Pro-Agro est une coédition d'Ingénieurs Sans Frontières Cameroun (ISF Cameroun) et du Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA). CTA – P.O. Box 380 – 6700 AJ Wageningen – Pays-Bas – www.cta.int ISF Cameroun – BP 7105 – Douala-Bassa – Cameroun – www.isf-cameroun.org © CTA et ISF 2014.
- [46] Thirugnanasambandam M, Iniyan S, Goic R. A review of solar thermal technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010 ; 14 :312–322.

- [47] Thèse de Doctorat en Sciences Présentée par : YETTOU Fatiha 'Conception et réalisation d'un système de cuisson solaire destiné au site saharien (Ghardaïa, Algérie)'. Univ Batna 2 Faculté de Technologie, Département d'Electrotechnique.
- [48] M. Asma, L.Messaouda, dirigé par : Dr S.Lazher et Dr Y. Fatiha 'étude expérimentale pour la détermination de la courber caractéristique d'un cuiseur solaire parabolique testé sous climat aride de Ghardaïa', Univ Batna 2 faculté de technologie.
- [49] MOUSSAOUI WIDAD, SOUANEF SOUAD ; Investigation expérimentale pour l'évaluation des performances d'un cuiseur solaire parabolique testé sous climat aride (Ghardaïa); MEMOIRE DE FIN D'ETUDES présente pour obtenir le diplôme de Master ;université de batna 2
- [50] Solar Cooking, SCInet, [En ligne]. Available : <http://solarcooking.org/>.
- [51] Solar Cookers International, SCI, [En ligne]. Available : <http://www.solarcookers.org>.
- [52] C fait maison, 2014. [En ligne]. Available : <http://www.cfaitmaison.com>.
- [53] A. Dizier, F. Pignon, «Manuel de cuisson solaire,» Edition commune SCI / iD COOK, Paris, France, 2005
- [54] Christelle Souriau & David Amelin, La collection Pro-Agro est une coédition d'Ingénieurs Sans Frontières Cameroun (ISF Cameroun) et du Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA). CTA – P.O. Box 380 – 6700 AJ Wageningen – Pays-Bas – www.cta.int ISF Cameroun – BP 7105 – Douala-Bassa – Cameroun – www.isf-cameroun.org © CTA et ISF 2014.
- [55] Agilent repport
- [56] Mullick SC, Kandpal TC, Kumar S. Thermal test procedure for a parabolic concentrator solar cooker. Solar Energy 1991;46(3):139e44.

