

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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



Université HADJ LAKHDAR Batna

Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique



Thèse de Doctorat en Sciences

Présentée par :

YETTOU Fatiha

Conception et réalisation d'un système de cuisson solaire destiné au site saharien (Ghardaïa, Algérie)

Soutenue le 10 Mars 2015 devant le jury composé de :

Pr. CHABANE Mabrouk	Professeur, Université Hadj Lakhdar, Batna	Président
Pr. AZOUI Boubekour	Professeur, Université Hadj Lakhdar, Batna	Rapporteur
Dr. MALEK Ali	Directeur de Recherche CDER, Alger	Co Rapporteur
Dr. TOUAFEK Khaled	M.R.A, URAER, Ghardaïa	Examineur
Dr. BEKKOUCHE Sidi Mohamed El-Amine	M.R.A, URAER, Ghardaïa	Examineur
Pr. AKSAS Mounir	Professeur, Université Hadj Lakhdar, Batna	Examineur

Année universitaire 2014/2015

REMERCIEMENTS

De nos jours, toutes les études pour la réalisation de travaux de recherche 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,

Dans ce contexte, je tiens à remercier vivement et à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail entre autres mes encadreurs: le Pr. Boubekour AZOUI, Professeur au département Electrotechnique de l'Université de Batna et le Dr. Ali MALEK, Directeur de Recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, Bouzaréah), pour avoir proposé et diriger ce travail et pour leurs supports, conseils, et motivation qui m'ont apportés durant tout ce projet et tant d'autres.

Ce travail a été réalisé à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables d'Alger. A cet effet, je tiens à remercier le Pr. YASSAA Noureddine, Directeur de Recherche et Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables, Dr. DJAFER Djelloul, Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, pour tout leur aide, disponibilité et le matériel qu'ils ont mis à ma disposition pour la réalisation de ce projet.

Je tiens à remercier vivement Dr. Amor GAMA, Chef de l'équipe Mini Centrales Solaires Thermodynamiques à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, qui a été toujours à mes côtés m'encourager et surtout pour sa patience, je le remercie également pour son aide à l'aboutissement de ce projet, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

The author gratefully acknowledges Dr. Narayan Lal PANWAR from Department of Renewable Energy Engineering, Maharana Pratap University of Agriculture and Technology, Udaipur (Rajasthan), India for providing scientific help, consistent motivations and encouragements to complete the research project. The author also gratefully acknowledges Pr. SC Mullick for providing scientific supports to complete this project.

Mes remerciements à Pr. Chérif LARBES, Pr. Mourad HADDADI, Pr. Mohamed Salah AIT CHEIKH, Pr. Chemseddine CHITOUR, Dr. Chaabane HAMOUDA, Pr. Hocine BEN MOUSSA, Dr. Lazhar SERIR, Pr. Maiouf BELHAMEL, Dr. Messaoud HAMOUDA, Pr. Abla CHAKER, Dr. Samira CHADER, Dr Hassiba ZERAIA, Dr Djohra KOUSSA, qui m'ont beaucoup aidé depuis mes premiers pas dans le solaire et qui m'ont offert la possibilité de continuer dans ce domaine, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie également le Professeur Mabrouk CHABANE; Président du jury, qui me fera l'honneur de présider le jury. Mes remerciements aussi au jury qui ont acceptés d'examiner ce travail, à savoir : Dr. Khaled TOUAFEK, Dr. Sidi Mohamed El-Amine BEKKOUCHE et Dr. Mounir AKSAS.

Un grand merci à toute ma famille et à tous ceux qui me sont chers.

En ce jour solennel qui clôt le cycle de mes études qu'il me permet de dédier ce noble travail à la mémoire de mon père: Mr. Abdellah YETTOU, Ex directeur des projets de la société DNC, Algérie.

Table des matières

RESUME (Arabe)

RESUME (Français)

RESUME (Anglais)

NOMENCLATURE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

01

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE SOLAIRE ET ETAT DE L'ART DES SYSTEMES DE CUISSON SOLAIRE

1.1.	Introduction	06
1.2.	Le rayonnement et l'énergie solaire	06
1.2.1.	Le rayonnement solaire	06
1.2.2.	Les instruments de mesure du rayonnement solaire	07
1.2.2.1.	La mesure du rayonnement solaire direct	07
1.2.2.2.	La mesure du rayonnement solaire global et diffus	07
1.2.3.	L'énergie solaire	08
1.2.4.	Les applications de l'énergie solaire	09
1.2.4.1.	Le solaire passif	09
1.2.4.2.	Le solaire actif	09
1.2.4.3.	Le solaire photovoltaïque	10
1.2.5.	Les technologies solaires à concentration	10
1.2.5.1.	Le potentiel solaire mondial et les ressources solaires en Algérie	10
1.2.5.2.	Le principe de fonctionnement des systèmes à concentration	11
1.2.5.3.	Les types de concentrateurs solaires	12
1.3.	Les cuiseurs solaires	13
1.3.1.	L'histoire de la cuisson solaire	13
1.3.2.	L'état de l'art et les modèles de base des cuiseurs solaires	15
1.3.2.1.	Le cuiseur à panneaux	15
1.3.2.2.	Le cuiseur de type boîte	15
1.3.2.3.	Le cuiseur parabolique	15
1.3.3.	Les températures et temps de cuisson	16
1.3.4.	La classification des cuiseurs solaires	17
1.3.4.1.	Les cuiseurs solaires sans stockage (cuisson directe et indirecte)	17
1.3.4.2.	Les cuiseurs solaires avec stockage (stockage de chaleur sensible et latente)	20
1.3.4.3.	Nouvelle classification des cuiseurs solaires	23
1.3.5.	L'étude, la conception et le développement des cuiseurs solaires à travers le monde	24
1.3.5.1.	Les cuiseurs solaires de type boîte	24
1.3.5.2.	Les cuiseurs solaires à concentration	27
1.3.5.3.	Les cuiseurs suiveurs du soleil	29
1.3.5.4.	Les cuiseurs stockeurs d'énergie	30
1.3.5.5.	Evaluation énergétique et exergétique des cuiseurs solaires	32
1.3.6.	Contribution des cuiseurs solaires à la réduction du dioxyde de carbone	33
1.3.7.	Les fours solaires	34
1.3.7.1.	L'héliodyne de Bouzaréah	34
1.3.7.2.	L'héliodyssée d'Odeillo	36
1.4.	Problématique: Limites des cuiseurs solaires	38
1.5.	Conclusion	39

CHAPITRE 2 : ETUDE THEORIQUE ET REALISATION EXPERIMENTALE D'UN CUISEUR SOLAIRE BOITE

2.1.	Introduction	40
2.2.	Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan par ciel clair	41
2.2.1.	Modélisation du facteur de trouble de Linke par ciel clair	41
2.2.2.	Modélisation des paramètres géométriques et atmosphériques	42
2.2.2.1.	Paramètres horaires	42
2.2.2.2.	Paramètres de position	43
2.2.2.3.	Paramètres de l'atmosphère	45
2.2.3.	Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal	47
2.2.3.1.	Eclairement hors atmosphère	47
2.2.3.2.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	48
2.2.3.3.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	49
2.2.3.4.	Eclairement solaire global incident sur un plan horizontal	50
2.2.4.	Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque	51
2.2.4.1.	Angle d'incidence	51
2.2.4.2.	Eclairement solaire global incident sur un plan quelconque	52
2.2.4.3.	Eclairement direct incident sur un plan quelconque	52
2.2.4.4.	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque	52
2.3.	Conception mécanique du cuiseur	54
2.3.1.	Description du cuiseur boîte	54
2.3.2.	Dimensionnement et conception du cuiseur boîte sous logiciel SolidWorks	55
2.3.3.	Angles d'inclinaison du réflecteur	56
2.4.	Simulation optique du cuiseur	57
2.4.1.	Simulation optique avec le logiciel TracePro	57
2.4.2.	Simulation optique des cuiseurs solaires pour des conditions climatiques extrêmes	59
2.4.2.1.	Cuiseurs sans réflecteurs additionnels	59
2.4.2.2.	Cuiseurs avec un réflecteur principal	60
2.4.2.3.	Cuiseurs avec un réflecteur secondaire	61
2.4.2.4.	Cuiseurs avec deux réflecteurs additionnels (principal et secondaire)	63
2.4.2.5.	Cuiseur avec deux réflecteurs additionnels latéraux	64
2.4.2.6.	Cuiseur avec design combiné et design optimisé	65
2.4.3.	Résultats de la simulation optique pour diverses conditions climatiques	66
2.4.3.1.	Cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteurs additionnels	66
2.4.3.2.	Cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec poursuite à une dimension (Plan Nord-Sud)	67
2.4.3.3.	Cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec poursuite 2D dans la direction N-S et E-O	69
2.5.	Réalisation expérimentale du cuiseur	71
2.5.1.	Etapas de réalisation et caractéristiques du cuiseur boîte proposé	71
2.5.2.	Intégration des réflecteurs au cuiseur réalisé (booster mirrors)	72
2.6.	Conclusion	74

CHAPITRE 3 : EVALUATION DES PERFORMANCES DU SYSTEME DE CUISSON SOLAIRE

3.1.	Introduction	76
3.2.	Temps nécessaire d'ajustement du cuiseur	76
3.2.1.	Principe du suivi continu du soleil	77
3.2.2.	Méthode proposée	78
3.2.2.1.	Équations mathématiques	78
3.2.2.2.	Simulation de la réflexion des rayons solaires	79
3.2.3.	Distribution du flux solaire sur les récepteurs	80
3.2.4.	Détermination du temps pour l'ajustement du cuiseur	81
3.3.	Acquisition de données	84
3.3.1.	Montage des capteurs de mesures et installation de la chaîne d'acquisition de données	84
3.3.2.	Schéma synoptique de la chaîne de mesure	85
3.3.3.	Quelques résultats des tests préliminaires (profil des températures)	86
3.4.	Évaluation des performances thermiques du cuiseur	88
3.4.1.	Les Normes Indiennes de Mullick et le Standard Européen de Funk	88
3.4.2.	Évaluation des performances selon les paramètres des Normes Indiennes	88
3.4.2.1.	Détermination du paramètre 'First figure of merit'	88
3.4.2.2.	Détermination du paramètre 'Second figure of merit'	89
3.4.2.3.	Détermination du temps d'ébullition (Boiling time) et de la courbe caractéristique du cuiseur (Characteristic curve)	90
3.4.3.	Évaluation des performances selon les paramètres du Standard Européen	90
3.4.3.1.	Calcul de la puissance de cuisson (Cooking power)	90
3.4.3.2.	Calcul de la puissance de cuisson ajustée (Adjusted cooking power)	91
3.5.	Évaluation thermodynamique des cuiseurs solaires	91
3.5.1.	Concept énergie/exergie	91
3.5.2.	Analyse énergétique et exergétique	92
3.5.2.1.	Détermination du rendement énergétique du cuiseur	92
3.5.2.2.	Détermination du rendement exergétique du cuiseur	92
3.6.	Tests effectués et discussion des résultats	94
3.6.1.	Description des tests effectués et données expérimentales utilisées	94
3.6.2.	Comparaison entre caractéristiques des deux cuiseurs réalisés	95
3.6.2.1.	Profil des températures pour le test sans charge d'eau et sans réflecteurs	96
3.6.2.2.	Profil des températures pour le test avec charge d'eau et sans réflecteurs	97
3.6.2.3.	Profil des températures pour le test avec charge d'eau et avec réflecteurs	98
3.6.2.4.	Résultats des tests de stagnation de température (Calcul de F_1)	99
3.6.2.5.	Résultats des tests de chaleur sensible (Calcul de F_2)	99
3.6.2.6.	Résultats des tests de chauffage d'eau (effet des boosters)	100
3.6.2.7.	Discussion des résultats obtenus	100
3.6.3.	Tests et résultats des performances suivant les Normes Indiennes et le Standard Européen du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée	101
3.6.3.1.	Première figure of merit	102
3.6.3.2.	Seconde figure of merit	104
3.6.3.3.	Période de chaleur sensible et courbe caractéristique du cuiseur	106
3.6.3.4.	Puissance de cuisson	108
3.6.4.	Tests et résultats des rendements du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée	109
3.6.4.1.	Température de l'eau et la différence de température dans le cuiseur	112
3.6.4.2.	Comparaison de l'énergie et l'exergie de sortie du cuiseur	113

3.6.4.3.	Rendement énergétique et exergetique du cuiseur	114
3.6.4.4.	Influence des réflecteurs ajoutés sur les rendements du cuiseur	115
3.6.4.5.	Influence de la variation de la charge sur les rendements du cuiseur	118
3.6.5.	Tests et résultats des éléments caractéristiques de performances du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée	120
3.6.5.1.	Courbe de régression déterminante des efficacités spécifiques du cuiseur	120
3.6.5.2.	Détermination des paramètres indicateurs des performances du cuiseur	122
3.7.	Validation des résultats obtenus	125
3.7.1.	Comparaison des résultats avec d'autres cuiseurs	125
3.7.2.	Résultats de quelques préparations à l'aide du cuiseur boîte réalisé	129
3.8.	Conclusion	130

CHAPITRE 4 : FAISABILITE DE LA CUISSON SOLAIRE EN ALGERIE : CARTES DU CUISEUR SOLAIRE

4.1.	Introduction	132
4.2.	Première approche (approche optique) pour la cartographie des températures du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée sans et avec réflecteur en Algérie	133
4.2.1.	Méthodologie adoptée	133
4.2.1.1.	Exemple de simulation pour le site de Ghardaïa	135
4.2.1.2.	Validation expérimentale des résultats de simulation obtenus pour le site de Ghardaïa	136
4.2.2.	Mapping des cartes des températures du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée suivant la première approche	138
4.2.2.1.	Mapping des cartes de l'éclairement et de l'éclairement solaire concentré (approche optique)	139
4.2.2.2.	Mapping des cartes des températures du cuiseur sans et avec ajout du réflecteur (approche optique)	141
4.2.2.3.	Mapping de la carte de l'efficacité du cuiseur solaire réalisé suivant l'approche optique	144
4.3.	Deuxième approche (approche thermique) pour la cartographie des températures du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée sans et avec réflecteur en Algérie	145
4.3.1.	Modèle mathématique thermique du cuiseur solaire boîte proposé	145
4.3.2.	Validation expérimentale des résultats du modèle mathématique sur le site de Ghardaïa	149
4.3.3.	Mapping des cartes des températures du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée suivant la deuxième approche	150
4.3.3.1.	Mapping des cartes de l'irradiation solaire	150
4.3.3.2.	Mapping des cartes du cuiseur sans réflecteur (approche thermique)	151
4.3.3.3.	Mapping des cartes du cuiseur avec réflecteur (approche thermique)	152
4.3.3.4.	Mapping des cartes de l'efficacité du cuiseur solaire réalisé suivant l'approche thermique	154
4.4.	Etude économique du CSB _{SRI} réalisé à Ghardaïa	156
4.5.	Conclusion	157
	CONCLUSION GENERALE	158
	BIBLIOGRAPHIE	160

ملخص

يتزايد تدريجياً الطلب العالمي للطاقة لتغطية احتياجاته اليومية للطبخ بتزايد عدد السكان. في الجزائر، الاحتطاب من أجل الطبخ يتسبب في نفاذ الثروة الغابية وبالتالي التصحر الذي يؤدي إلى عواقب وخيمة على النظام البيئي. من ناحية أخرى، استخدام مصادر الطاقة التقليدية (الغاز الطبيعي) يؤدي إلى مشاكل بيئية خطيرة. هذا المشروع يمثل في دراسة، تصميم، محاكاة وانجاز مطبخ شمسي من نوع علبة. لجعل هذا المطبخ الشمسي فعال في جميع الظروف المناخية المختلفة في الجزائر خاصة الجنوب، قمنا بتكييف شكل المطبخ الشمسي ليتلاءم مع مناخ الجزائر باقتراح شكل خاص للمطبخ الشمسي الا وهو تميل السطح الاقط للمطبخ، كذلك اضافة مرايا عاكسة لتركيز اشعة الشمس على لوحة تسخين المطبخ. هذا الشكل الجديد يسمح بتحسين خصائص الجهاز وحل بعض المشاكل المعروفة في الطبخ الشمسي من بينها المردود الضعيف الناجم عن الحرارة الغير كافية. المطبخ الشمسي المقترح تم انجازه ومعاينته حسب المعايير والمقاييس الدولية، في مدينة غرداية الصحراوية تحت شروط مناخية متعددة، عدة اجهزة وادوات قياس استخدمت لمعاينة ومراقبة سلوك الجهاز. كذلك قمنا بتحليل مفصل لتقييم الاداء الحراري للجهاز وخصائصه وكذلك قمنا بمقارنة المردود الحراري للمطبخ المقترح مع مطبخ شمسي عادي انجز لهذا الغرض. كذلك مقارنة عامة للجهاز المقترح مع جميع المطابخ الشمسية المنجزة لحد الان في العالم. امكانية استخدام الطابخ الشمسية في جميع مناطق الجزائر يعتبر محور هام في هذه الاطروحة، وذلك بدراسة فعالية هذه الاجهزة وامكانية ادماجها باستخدام وانجاز خرائط جغرافية.

كلمات مفتاحية : الاشعاع الشمسي، مطبخ شمسي علبة سطح لاقط مائل، عواكس إضافية، المردود الحراري، تقييم الاداء، خريطة جغرافية للمطبخ الشمسي.

RESUME

La demande énergétique mondiale pour couvrir les besoins en cuisson augmente progressivement avec l'augmentation de la population humaine. En Algérie, la récolte du bois pour la cuisson provoque son épuisement et aggrave le problème de la rareté de cette ressource provoquant la déforestation et induit à des conséquences désastreuses sur l'écosystème. D'autre part, l'utilisation des sources énergétiques conventionnelles (gaz naturel) conduit à de sérieux problèmes environnementaux. Ce travail consiste à l'étude, la conception, la simulation et la réalisation d'un cuiseur solaire boîte. Pour rendre le cuiseur efficace dans les différentes conditions climatiques de l'Algérie; notamment celles du Sud, nous avons adapté le cuiseur au climat Algérien en proposant un design de cuiseur avec surface réceptrice inclinée (surface d'ouverture) muni de miroirs réfléchissant et concentrant l'éclairage solaire sur la plaque absorbante du cuiseur. Cette nouvelle configuration permettant d'améliorer les performances du cuiseur et résoudre; de ce fait, quelques problèmes liés à la cuisson solaire à savoir; les rendements minimes de ces dispositifs dues aux faibles températures. Le cuiseur été réalisé et testé; selon les Normes et Standards Internationaux, au site saharien de Ghardaïa sous différentes conditions climatiques avec un ajustement adéquat du cuiseur et une chaîne d'acquisition de données est installée pour le contrôle du système. L'évaluation des performances thermiques du cuiseur est analysée en détail et les caractéristiques du design proposé ainsi que son rendement thermique sont aussi comparés à celles d'un cuiseur ordinaire, réalisé également à cet effet. Une validation des résultats obtenus à partir du système de cuisson par comparaison avec diverses réalisations à travers le monde est effectuée. La faisabilité de la cuisson solaire sur l'ensemble du territoire national; fera ensuite l'objet de cette thèse, par l'étude de l'efficacité et la possibilité d'intégration du cuiseur solaire réalisé à travers l'élaboration des cartes du cuiseur solaire.

Mots – clés: Eclairage solaire, cuiseur solaire boîte, surface réceptrice inclinée, réflecteurs additionnels, rendement thermique, évaluation des performances, cartes du cuiseur solaire.

ABSTRACT

The global energy requirement to cover the needs in cooking is expected to increase with the increase of human population. In Algeria, harvesting of wood for cooking causes its exhaustion and accentuates more the problem of the scarcity of this resource causing deforestation and leads to disastrous consequences of the ecosystem. On the other hand, the use of conventional energy sources (natural gas) causes serious environmental problems. This work concerns the study, design, simulation and realization of a box type solar cooker. In order to make the cooker more efficient for different Algerian climatic conditions, especially south ones, a novel design of a box solar cooker with south tilted collecting surface equipped with booster mirrors as reflectors to redirect solar irradiance on the absorber plate was proposed. This new shape is adopted in order to enhance the cooker performances and permits to solve the problems associated with solar cooking systems such as low efficiency due to lower achieved temperatures. The realized cooker is experimented according to the International Standards in Ghardaïa Algerian Sahara city under various climatic conditions with adequate time adjustment of the cooker. A data acquisition system is installed to control the cooker parameters. Evaluation of the thermal performance of the cooker analyses in detail and the features of the proposed as well as its thermal efficiency are also compared with a conventional solar cooker realized for this purpose. The results obtained through the developed system were also compared with selected cooker designs available across the world. The feasibility of the proposed box solar cooker across the Algeria climatic condition along with solar cooker maps for its effectiveness was also carried out in the present study.

Keywords: Solar irradiance, box solar cooker, tilted collecting surface, booster mirrors, thermal efficiency, performance evaluation, solar cooker maps.

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
t	Temps	Heure
N	Numéro du jour	[-]
N_p	Angle journalier	rad
φ	Latitude du lieu	rad
λ	Longitude du lieu	rad
z	Altitude du lieu	m
ω	Angle horaire	rad
δ	Déclinaison solaire	rad
γ_s	Hauteur du soleil	rad
γ_s^{cor}	Hauteur du soleil corrigée	rad
θ_z	Angle zénithal	rad
θ_{az}	Azimut du soleil	rad
θ_i	Angle d'incidence des rayons solaires	rad
θ_{vp}	Angle entre la surface verticale contenant la normal sur le plan et la verticale passant par le centre du disque solaire	rad
γ_p	Inclinaison du plan	rad
θ_p	Orientation du plan	rad
T_L	Facteur de trouble de Linke	[-]
T_{Lc}	Facteur de trouble de Linke corrigé par pression atmosphérique	[-]
B_A	Coefficient d'Angstrom	[-]
W_v	Hauteur d'eau condensable	cm
m_A	Masse d'air optique	[-]
δ_R	Epaisseur totale optique de Rayleigh	[-]
P	Pression atmosphérique	pas
P_0	Pression atmosphérique au niveau de la mer	pas
ε	Facteur d'excentricité	[-]
I_0	Constante solaire	W/m ²
G_0	Eclairement extraterrestre	W/m ²
G_0^h	Eclairement extraterrestre sur plan horizontal	W/m ²

$IB^h(\gamma_s, T_L)$	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	W/m^2
$ID^h(\gamma_s, T_L)$	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	W/m^2
$IG^h(\gamma_s, T_L)$	Eclairement global incident sur un plan horizontal	W/m^2
$IN(\gamma_s, T_L)$	Eclairement direct normal	W/m^2
$IB^i(\gamma_s, T_L)$	Eclairement direct incident sur un plan quelconque	W/m^2
$ID^i(\gamma_s, T_L)$	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque	W/m^2
$IG^i(\gamma_s, T_L)$	Eclairement global incident sur un plan quelconque	W/m^2
$T_{rb}(\gamma_s, T_L)$	Transmittance de l'éclairement direct	[-]
$T_{rd}(T_L)$	Transmittance de l'éclairement diffus	[-]
$F_d(\gamma_s, T_L)$	Fonction diffuse angulaire	[-]
$F(\gamma_p)$	Fonction de l'éclairement diffus sur un plan incliné	[-]
k_N	Coefficient liée à la Fonction $F(\gamma_p)$	[-]
K_b	Coefficient reliant l'éclairement direct et l'éclairement extraterrestre en surface horizontale	[-]
$r_i(\gamma_p)$	Fraction du ciel pour l'éclairement diffus sur un plan incliné	[-]
θ	Angle des rayons avec la verticale au plan du réflecteur	rad
α	Angle du réflecteur principal avec l'horizontal, (α_H pour le cuiseur à surface horizontale, α_I pour le cuiseur à surface inclinée)	rad
β	Angle d'inclinaison de la vitre du cuiseur à surface inclinée	rad
γ	Angle du réflecteur secondaire avec le plan horizontal	rad
λ	Angle du réflecteur latéral avec le plan horizontal	rad
χ	Angle d'inclinaison du réflecteur à partir de la surface inclinée	rad
θ_{rv}	Angle de l'incidence des rayons solaires à partir du miroir vers le vitrage	rad
α'	Angle d'inclinaison d'un concentrateur parabolique	rad
β'	Angle d'orientation d'un concentrateur parabolique	rad
Ω_{rim}	Angle d'ouverture d'un concentrateur parabolique	rad
I_{moy}	Eclairement concentré moyen incident sur l'absorbeur du cuiseur, (I_{Hmoy} pour le cuiseur à surface horizontale)	W/m^2
I_s	Eclairement solaire incident sur une surface horizontale au moment de stagnation = IG_h	W/m^2
\bar{I}_s	Eclairement solaire moyen reçu par une surface horizontale	W/m^2
I_n	Eclairement solaire standardisé ($700 W/m^2$)	W/m^2
Inc_r, Inc_a	Puissance des rayons incidents sur le foyer de la parabole et l'absorbeur de la	W

	boîte	
Inc_p, Inc_b	Puissance des rayons incidents sur le cuiseur parabolique et le cuiseur boîte (réflecteurs inclus)	W
los_f, los_a	Pertes optiques au niveau du foyer et de l'absorbeur	W
P	Puissance de cuisson	W
P_{adj}	Puissance de cuisson ajustée ou standardisée	W
P_{ini}	Puissance de cuisson à $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$	W
\bar{E}_{xo}	Puissance exergetique de sortie	W
\bar{E}_{xo_max}	Puissance crête exergetique	W
$\Delta T \bar{E}_{xo}$	Produit de l'écart de température exergetique	WK
E_i	Energie d'entrée du cuiseur	kJ
E_o	Energie de sortie du cuiseur	kJ
\bar{E}_i	Exergie d'entrée du cuiseur	kJ
\bar{E}_o	Exergie de sortie du cuiseur	kJ
T_{ps}	Température de l'absorbeur à la stagnation	$^\circ\text{C}$
T_{as}	Température ambiante à la stagnation	$^\circ\text{C}$
T_a	Température ambiante	$^\circ\text{C}$
\bar{T}_a	Température ambiante moyenne	$^\circ\text{C}$
T_{ra}	Température ambiante de référence	$^\circ\text{C}$
T_{wi}	Température initiale de l'eau	$^\circ\text{C}$
T_{wf}	Température finale de l'eau	$^\circ\text{C}$
T_w	Température de l'eau dans le pot	$^\circ\text{C}$
T_p	Température de la plaque absorbante	$^\circ\text{C}$
T_v	Température du couvercle en verre (vitrage)	$^\circ\text{C}$
T_r	Température de l'air à l'intérieur de la boîte	$^\circ\text{C}$
T_s	Température du corps noir du soleil (5800 K)	$^\circ\text{C}$
ΔT	Différence de température entre l'eau et l'ambiance	$^\circ\text{C}$
los_{rate}	Pertes optiques totales dans cuiseur parabolique et le cuiseur boîte	%
η_o	Rendement optique du cuiseur	%
η	Rendement énergetique du cuiseur	%
Ψ	Rendement exergetique du cuiseur	%
Ψ_{max}	Rendement exergetique max du cuiseur	%
η_{max}	Rendement énergetique max du cuiseur	%

F_1	Première figure of merit	m^2C/W
F_2	Seconde figure of merit	[-]
τ	Intervalle de temps pendant lequel la température de l'eau augmente de T_{wi} à T_{wf}	min
τ_{boil}	Temps d'ébullition pour la période de chaleur sensible	min
Δt	Intervalle de temps (10 min) entre deux prélèvements de données	min
F	Longueur focale d'un concentrateur parabolique	m
f	Point focal décalé d'un concentrateur parabolique	m
d_v	Longueur de l'ustensile de cuisson	m
D	Ouverture d'un concentrateur parabolique	m
L'	Longueur du cuiseur à surface horizontale	m
W'	Largeur du cuiseur à surface horizontale	m
W_h, W_i	Largeur effective des rayons solaires (W_h pour le cuiseur à surface horizontale, W_i pour le cuiseur à surface inclinée)	m
H'	Grande hauteur du cuiseur à surface inclinée	m
L	Longueur du cuiseur à surface inclinée	m
L_1	Longueur de la vitre du cuiseur à surface inclinée	m
W	Largeur du cuiseur à surface inclinée	m
H	Hauteur du cuiseur à surface horizontale	m
h	Petite hauteur du cuiseur à surface inclinée	m
A_{sc}	Surface d'ouverture du cuiseur solaire boîte	m^2
A_s	Surface d'ouverture du cuiseur solaire boîte ou surface de réception du point focal du cuiseur parabolique	m^2
A_r	Surface du réflecteur	m^2
A_v	Surface de la vitre	m^2
m_w	Masse ou quantité d'eau	kg
c_{pw}	Pouvoir calorifique de l'eau (4200 J/kg°K)	J/kg°K
$(mc_p)_w$	Capacité thermique de l'eau	J/°K
U_L	Coefficient de transfert thermique	W/Km ²
U_{Lxo}	Coefficient de pertes thermiques lié à l'exergie de sortie	W/Km ²
U_{LL}	Coefficient de pertes thermiques spécifique du cuiseur	W/Km ² kg
C_{moy}	Facteur de concentration moyen de l'éclairement solaire incident sur l'absorbeur du cuiseur	[-]
C_{max}	Facteur de concentration maximum de l'éclairement solaire incident sur	[-]

	l'absorbeur du cuiseur	
R^2	Coefficients de régression linéaire de détermination	[-]
F_{rv}	Facteur de forme	[-]
R_r	Réfectivité du miroir réflecteur	[-]
R_v	Réfectivité du vitrage	[-]
ρ_{sc}	Facteur de qualité	[-]
W_s	Vitesse du vent	m/s
n	Nombre d'ustensiles	[-]
Q_c	Transfert de chaleur par convection	W
Q_r	Transfert de chaleur par rayonnement	W
h_c	Coefficients de transfert de chaleur par convection	W m ² K
h_r	Coefficients de transfert de chaleur par rayonnement	W m ² K

LISTE DES FIGURES

Fig 1.1	Analyse spectrale du rayonnement solaire [21].	7
Fig 1.2	Instruments de mesure du rayonnement solaire [22]. (a): Pyréliomètre (mesure du rayonnement direct), (b): Pyranomètre (mesure du rayonnement global et diffus).	8
Fig 1.3	Vue d'une installation thermique. [24].	9
Fig 1.4	Vue d'une installation thermique (chauffe-eau solaire) [25].	9
Fig 1.5	Vue d'une installation photovoltaïque [27].	10
Fig 1.6	Ressources énergétiques solaires: (a) potentiel mondial [30]; (b) potentiel de l'Algérie [28].	11
Fig 1.7	Centrales solaires à concentration réalisées à travers le monde [32].	12
Fig 1.8	Schéma de principe d'une centrale à tour [4].	12
Fig 1.9	Schéma de principe d'un concentrateur parabolique [4].	12
Fig 1.10	Schéma de principe d'un concentrateur cylindro-parabolique [4].	13
Fig 1.11	Schéma de principe des miroirs de Fresnel [1].	13
Fig 1.12	Schéma de principe d'un cuiseur à panneaux [33].	15
Fig 1.13	Schéma de principe d'un cuiseur de type boîte [33].	15
Fig 1.14	Schéma de principe d'un cuiseur parabolique [33].	15
Fig 1.15	Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs [2].	16
Fig 1.16	Classification des cuiseurs solaires sans et avec stockage thermique [39].	17
Fig 1.17	Cuiseurs solaires boîtes avec réflecteurs additionnels: (a) quatre; (b) et huit réflecteurs.	18
Fig 1.18	Cuiseurs solaires concentrant la lumière par-dessus: (a) cuiseur à panneaux; (b) cuiseur à entonnoir.	19
Fig 1.19	Cuiseurs solaires concentrant la lumière par-dessous: (a) cuiseur sphérique; (b) cuiseur à miroirs de Fresnel; (c) cuiseur parabolique.	19
Fig 1.20	Cuiseur solaire indirect avec capteurs plans vitrés.	20
Fig 1.21	Cuiseurs solaires à stockage de chaleur sensible avec support de stockage: (a) l'huile à moteur; (b) l'huile végétale.	21
Fig 1.22	Schéma d'un cuiseur solaire à stockage de chaleur latente de type boîte avec PCM intégré en mode indirect [39].	22
Fig 1.23	Schéma de cuiseurs solaires à stockage de chaleur latente avec PCM intégré en mode indirect utilisant: (a) des capteurs plans; (b) des capteurs sous vides [39].	23
Fig 1.24	Cuiseurs solaires boîte fabriqué et testé par Nahar. [5]: (a) avec un seul réflecteur; (b) avec deux réflecteurs.	24
Fig 1.25	Schéma du cuiseur boîte avec réflecteurs: (a) exposés par la face supérieur testé par Negi et al. [52]; (b) exposés par la face inférieure étudié par Amer [7].	25
Fig 1.26	(a) Cuiseur séchoir- pyramide, (b) cuiseur chauffe-eau, réalisé par Kumar et al. [53, 54].	25
Fig 1.27	Schéma du cuiseur boîte avec un récipient mis sur support testé par Rao et al. [57].	26
Fig 1.28	Cuiseur solaire boîte réalisé et testé à l'URER /MS par Harmim et al. [60].	26
Fig 1.29	Cuiseur boîte réalisé et examiné par Harmim et al. [61, 62, 11]: (a) avec un réflecteur parabolique; (b) le récipient de cuisson avec ailettes.	27
Fig 1.30	(a) Cuiseur cylindro-parabolique étudié par Richard Petela [66], (b) schéma du	28

	cuseur cylindro-parabolique testé par Ozturk [67].	
Fig 1.31	(a) Cuseur parabolique avec des miroirs de Fresnel réalisé par Sonune et Philip [69], (b) cuseur parabolique composé et réalisé par Franco et al. [70].	28
Fig 1.32	(a) Cuseur parapluie réalisé par José M. Arenas [71], (b) cuseur parabolique réalisé par Grupp et al. [72].	29
Fig 1.33	(a) Cuseur cylindro-parabolique; (b) système de poursuite solaire, réalisés par Al-Soud et al. [73].	30
Fig 1.34	(a) Cuseur parabolique; (b) système de poursuite solaire (b), réalisés par Abu-Malouh et al. [74]	30
Fig 1.35	Schéma de l'unité de stockage de chaleur latente de forme cylindrique du cuseur boîte avec PCM fabriqué par Sharma et al. [76].	31
Fig 1.36	(a) Schéma du cuseur solaire parabolique indirect étudié par Mawire et al. [78], (b) Schéma du cuseur solaire cylindro-parabolique indirect étudié par Muthusivagami et al. [80].	31
Fig 1.37	(a) Schéma du cuseur solaire indirect contenant des réfrigérants étudié par Esen [81], (b) unité de stockage de chaleur latente avec PCM réalisé par Sharma et al. [82].	32
Fig 1.38	Cuseur solaire destiné à la cuisson de nourriture pour animaux proposé et réalisé par Panwar et al. [84]: (a) dimensions; (b) vue de côté du cuseur.	33
Fig 1.39	Héliodyne: premier four solaire mondial 1950 - CDER bouzaréah, Algérie [27].	35
Fig 1.40	Four solaire de Mont-Louis 1949, France.	37
Fig 1.41	Héliodyssée: four solaire d'Odeillo 1970, CNRS-PROMES, France [93].	37
Fig 2.1	Résultats obtenus pour le calcul du facteur de Linke: (a) par trois différentes méthodes; (b) à partir des données expérimentales sur le site de Ghardaïa.	42
Fig 2.2	Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.	43
Fig 2.3	Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimuth du soleil).	44
Fig 2.4	Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.	44
Fig 2.5	Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.	45
Fig 2.6	Variation de la hauteur du soleil en fonction de l'azimut solaire.	45
Fig 2.7	Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil.	46
Fig 2.8	Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.	47
Fig 2.9	Eclairement solaire extraterrestre.	48
Fig 2.10	Variation de l'éclairement solaire extraterrestre en fonction du jour.	48
Fig 2.11	Variations de la transmittance directe.	49
Fig 2.12	Variations de l'éclairement direct horizontal.	49
Fig 2.13	Fonction diffuse angulaire.	50
Fig 2.14	Variations de l'éclairement diffus horizontal.	50
Fig 2.15	Variations de l'éclairement global horizontal en fonction de la hauteur du soleil et du facteur de Linke.	51
Fig 2.16	Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.	51
Fig 2.17	Variations de l'éclairement direct incident sur un plan incliné.	52
Fig 2.18	Variations de l'éclairement diffus incident sur un plan incliné et ensoleillé.	54
Fig 2.19	Schéma d'un cuseur solaire de type boîte muni d'un réflecteur: (a) à surface horizontale; (b) à surface réceptrice inclinée.	54
Fig 2.20	Conception du cuseur solaire boîte avec logiciel SolidWorks et projection des plans pour la réalisation.	55
Fig 2.21	Dimensionnement des deux cuseurs solaires boîtes sous logiciel SolidWorks, (a) cuseur conventionnel, (b) cuseur proposé.	55

Fig 2.22	Conception du design final du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée: (a) avec un réflecteur additionnel principal; (b) avec deux réflecteurs additionnels.	56
Fig 2.23	Schéma de cuiseurs solaires boîtes muni de réflecteurs additionnels: (a) cuiseur ordinaire; (b) avec réflecteur principal; (c) avec un second réflecteur; (d) cuiseur à surface inclinée avec deux réflecteurs additionnels.	57
Fig 2.24	Utilisation du logiciel TracePro pour la simulation des cuiseurs solaires: (a) configuration de la source lumineuse; (b) Choix des options du mapping de l'éclairage concentré.	58
Fig 2.25	Utilisation du logiciel TracePro pour la simulation des cuiseurs solaires: (a) insertion des réflecteurs; (b) Choix des angles d'inclinaison des réflecteurs.	58
Fig 2.26	Simulation optique des deux cuiseurs au mois de Décembre sans réflecteurs additionnels.	59
Fig 2.27	Résultats de la simulation optique des cuiseurs sans réflecteurs additionnels au mois de Décembre: (a) à surface d'ouverture horizontale; (b) à surface d'ouverture inclinée.	59
Fig 2.28	Surface effective couverte par la réception et la réflexion des rayons solaires dans le cas de chaque cuiseur boîte.	60
Fig 2.29	Simulation optique des deux cuiseurs au mois de Décembre avec un réflecteur additionnel principal.	60
Fig 2.30	Résultats de la simulation optique des cuiseurs avec un réflecteur additionnel principal au mois de Décembre: (a) à surface d'ouverture horizontale; (b) à surface d'ouverture inclinée.	61
Fig 2.31	Simulation optique des deux cuiseurs au mois de Décembre avec un réflecteur additionnel secondaire.	61
Fig 2.32	Résultats de la simulation optique des cuiseurs avec un réflecteur additionnel secondaire au mois de Décembre: (a) à surface d'ouverture horizontale; (b) à surface d'ouverture inclinée.	62
Fig 2.33	Résultats de la simulation optique des cuiseurs avec un réflecteur additionnel secondaire au mois de Juin: (a) à surface d'ouverture horizontale; (b) à surface d'ouverture inclinée.	62
Fig 2.34	Simulation optique des deux cuiseurs au mois de Décembre avec deux réflecteurs additionnels.	63
Fig 2.35	Résultats de la simulation optique des cuiseurs avec deux réflecteurs additionnels au mois de Décembre: (a) à surface d'ouverture horizontale; (b) à surface d'ouverture inclinée.	63
Fig 2.36	Angles d'inclinaison des réflecteurs additionnels latéraux pour le cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée.	64
Fig 2.37	Simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs latéraux au mois de Décembre.	64
Fig 2.38	Résultats de la simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs latéraux au mois de Décembre.	65
Fig 2.39	Angles d'inclinaison des réflecteurs additionnels.	65
Fig 2.40	Simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec plusieurs réflecteurs additionnels au mois de Décembre.	65
Fig 2.41	Résultats de la simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée au mois de Décembre: (a) avec plusieurs réflecteurs additionnels; (b) avec deux réflecteurs additionnels (design optimisé).	66
Fig 2.42	Tracé des rayons solaires pour la simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteurs: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.	67

Fig 2.43	Résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteurs additionnels: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.	67
Fig 2.44	Tracé des rayons solaires pour la simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec un réflecteur additionnel: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.	68
Fig 2.45	Résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec un réflecteur additionnel: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.	68
Fig 2.46	Résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec un réflecteur additionnel au mois de d'Avril: (a) distribution du rayonnement concentré; (b) relief représentatif du facteur de concentration.	69
Fig 2.47	Tracé des rayons solaires pour la simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs additionnels: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.	69
Fig 2.48	Résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs additionnels: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.	70
Fig 2.49	Résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs additionnel au mois de Mars: (a) distribution du rayonnement concentré; (b) relief représentatif du facteur de concentration.	70
Fig 2.50	Etapas de réalisation du cuiseur solaire boîte: (a) Boîtier interne en verre; (b) dépôts de l'isolant sous la plaque absorbante; (c) Isolation du boîtier interne; (d) fixation de l'absorbeur en Aluminium; (e) Ajout de l'ustensile de cuisson peint en noir; (f) boîtier de dérivation.	71
Fig 2.51	Vues des deux designs de cuiseurs solaires boîtes réalisés à URAER, Ghardaïa: (a) cuiseur boîte à surface réceptrice horizontale avec deux réflecteurs additionnels pliables; (b) cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs additionnels pliables; (c) cuiseur boîte à surface réceptrice horizontale avec réflecteur principal plié; (d) cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec réflecteur principal plié; (e) cuiseur boîte conventionnel avec deux réflecteurs en état fonctionnel; (f) cuiseur boîte proposé avec deux réflecteurs en état fonctionnel.	73
Fig 3.1	Illustration de l'effet du non-ajustement des cuiseurs boîtes: (a) ombrage exercé sur l'absorbeur; (b) différentes positions par rapport au soleil.	77
Fig 3.2	(a) Position du miroir réflecteur d'un cuiseur solaire boîte, (b) position du récipient de cuisson par rapport au point focal du cuiseur solaire parabolique.	79
Fig 3.3	Exemple de schéma des rayons concentrés dans le cas du cuiseur solaire boîte: (a) direction correcte; (b) direction incorrect des rayons.	80
Fig 3.4	Exemple de schéma des rayons concentrés dans le cas du cuiseur solaire parabolique: (a) le collecteur est orienté directement vers le soleil, (b) la collecteur est mal orienté.	80
Fig 3.5	Le profil de l'éclairement concentré au niveau: (a) de l'absorbeur du cuiseur solaire boîte; (b) du foyer du cuiseur solaire parabolique, le 23 décembre à 12 h.	81
Fig 3.6	Résultats de simulation de la distribution du flux des rayons solaires: (a) sur l'absorbeur du cuiseur solaire boîte; (b) sur le foyer du cuiseur solaire parabolique, le 23 décembre à 12:30 h.	81
Fig 3.7	Variation des pertes optiques an niveau de l'absorbeur du cuiseur boîte et du foyer du cuiseur parabolique en fonction du temps de la journée, durant le solstice d'hiver.	83
Fig 3.8	Evolution du profil des températures dans le cas d'un test du cuiseur boîte sans ajustement.	84
Fig 3.9	Chaîne de mesure et acquisition de données: (a) implémentation des capteurs de	85

	mesure;	
	(b) affichage des températures acquises.	
Fig 3.10	Schéma synoptique de l'installation du cuiseur solaire boîte.	85
Fig 3.11	Eclairages solaires global, diffus et direct incident sur un plan horizontal (jour nuageux).	86
Fig 3.12	Evolution des températures mesurées: (a) pour le test du matin (ciel très nuageux); (b) pour le test de l'après-midi (ciel peu nuageux).	87
Fig 3.13	Vue des cuiseurs boîtes réalisés avec surface réceptrice horizontale et surface réceptrice inclinée mis en service lors des tests de comparaison à l'URAER, Ghardaïa: (a) orientation des cuiseurs suivant une saison hivernale; (b) orientation des cuiseurs suivant une saison estivale.	96
Fig 3.14	Variation des températures mesurées à différents endroits des cuiseurs correspondant à un éclairage solaire global du 14 Février 2013 pour le cuiseur ordinaire et du 10 Février 2013 pour le nouveau cuiseur, utilisées pour déterminer la première figure of merit.	97
Fig 3.15	Variation des températures de l'eau mesurées dans les ustensiles des deux cuiseurs et variation de l'éclairage solaire global correspondant (du 17 Février 2013), utilisées pour déterminer la seconde figure of merit.	97
Fig 3.16	Variation des températures mesurées de l'absorbeur, des températures de l'eau en fonction de l'heure locale, pour les deux cuiseurs boîtes dans le cas sans, avec un seul et avec deux réflecteurs.	98
Fig 3.17	Tracé optique des rayons solaires: (a) incident sur l'absorbeur du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice horizontale, largeur du faisceau lumineux est W_h ; (b) incident sur l'absorbeur du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée, largeur du faisceau lumineux est W_i .	101
Fig 3.18	Vue du cuiseur boîte réalisé avec surface réceptrice inclinée muni de réflecteurs additionnels mis en service lors des tests d'évaluation à l'URAER, Ghardaïa: (a) orientation des cuiseurs suivant une saison hivernale; (b) orientation des cuiseurs suivant une saison estivale.	102
Fig 3.19	Les variations journalières de l'éclairage solaire et des températures mesurées de la plaque absorbante du cuiseur, sans utilisation du réflecteur, sous des conditions de test de stagnation, (a) pour un ciel couvert en un jour d'hiver de l'année 2013, (b) pour un ciel couvert en un jour d'été de l'année 2014.	103
Fig 3.20	Les variations journalières de l'éclairage solaire et des températures mesurées de la plaque absorbante du cuiseur, sans utilisation du réflecteur, sous des conditions de test de stagnation, (a) pour un ciel clair en un jour d'hiver de l'année 2013, (b) pour un ciel clair en un jour d'été de l'année 2014.	103
Fig 3.21	Les variations journalières de l'éclairage solaire et des températures mesurées des éléments du cuiseur, sans utilisation du réflecteur, sous des conditions de test de chaleur sensible, (a) pour un jour d'hiver de l'année 2013, (b) pour un jour d'été de l'année 2014.	105
Fig 3.22	Caractérisation du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée à une latitude de 32° : Evolution de la courbe du temps d'ébullition en fonction des températures de l'eau pour un jour type d'hiver; (b) courbe caractéristique des performances $(\times \tau)$ du cuiseur réalisé pour un éclairage solaire de 750 W/m^2 .	107
Fig 3.23	Expérimentation de la puissance de cuisson du cuiseur solaire réalisé en un jour clair d'hiver en Février 2014: (a) variations journalières de l'éclairage direct	108

	normal et des températures de l'eau mesurées (charge de 2 kg) avec utilisation du réflecteur; (b) puissance de cuisson ajustée en fonction de la différence de température.	
Fig 3.24	Expérimentation de la puissance de cuisson du cuiseur solaire réalisé en un jour clair d'été en Juin 2014: (a) variations journalières de l'éclairement direct normal et des températures de l'eau mesurées (charge de 2 kg) avec utilisation du réflecteur; (b) puissance de cuisson ajustée en fonction de la différence de température.	109
Fig 3.25	Les variations journalières de l'éclairement solaire direct normal, global, diffus et de la température ambiante pour les six jours de tests au mois de Mai et de Juin à Ghardaïa.	110
Fig 3.26	Différents angles servants au calcul de l'éclairement solaire total I_s incident sur le cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée (CSBSRI), testé par la méthode énergétique/exergétique.	111
Fig 3.27	Profils des températures correspondants au test réalisé le 10 Juin 2013 en fonction du temps: (a) températures de de la plaque absorbante (T_p), de l'air intérieur (T_r), de la vitre (T_v), de ustensile de cuisson (T_w) et courbe de l'éclairement solaire; (b) différence de température entre l'eau et l'ambiance.	112
Fig 3.28	Graphes du rendement énergétique et exergétique du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée en fonction du temps de la journée pour le test du 10 Juin 2013.	114
Fig 3.29	Comparaison entre les températures de l'absorbeur et les températures de l'eau du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée en fonction du temps, sans l'utilisation, avec utilisation d'un seul et avec deux réflecteurs.	116
Fig 3.30	Comparaison entre les rendements énergétiques du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée sans l'utilisation, avec utilisation d'un seul et avec deux réflecteurs	116
Fig 3.31	Comparaison entre les rendements exergétique du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée sans l'utilisation, avec un seul et avec deux réflecteurs.	117
Fig 3.32	Variation de la température de l'eau dans le cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée en fonction du temps pour 1 et 2 litres de charge d'eau, sans et avec utilisation d'un réflecteur additionnel.	118
Fig 3.33	Variation des rendements énergétiques et exergétiques en fonction du temps du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée pour 1 et 2 litres de charge d'eau avec utilisation d'un réflecteur additionnel.	119
Fig 3.34	Effet de la différence de température sur le rendement énergétique et exergétique du CSBSRI réalisé pour le test du 04/02/2013, sans l'ajout du réflecteur et avec une charge d'eau de 2 L.	121
Fig 3.35	Effet de la différence de température sur le rendement énergétique et exergétique du CSBSRI réalisé pour le test du 02/02/2014, avec l'ajout d'un réflecteur et avec une charge d'eau de 2 L.	121
Fig 3.36	Détermination des paramètres indicateurs de performances du CSBSRI pour le test du 04/02/2013, sans l'ajout du réflecteur et avec une charge d'eau de 2 L: (a) variation de la puissance exergétique de sortie; (b) variation des pertes en puissance exergétique, en fonction de la différence de température.	123
Fig 3.37	Détermination des paramètres indicateurs de performances du CSBSRI pour le test du 02/02/2014, avec l'ajout d'un réflecteur et avec une charge d'eau de 2 L: (a) variation de la puissance exergétique de sortie; (b) variation des pertes en puissance exergétique, en fonction de la différence de température.	124
Fig 3.38	Vue de quelques préparations à l'aide du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée:	130

	(a) préparation d'un café; (b) préparation des cuisses de poulet.	
Fig 4.1	Zones du monde prioritaires pour le développement de la cuisson solaire [181].	133
Fig 4.2	Représentation des étapes de réalisation des cartes suivant l'approche optique [182].	135
Fig 4.3	Vue du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée retenu pour le mapping des cartes à l'échelle national: (a) réflecteur hors service; (b) réflecteur principal en fonctionnement; (c) réflecteur latéral hors service.	135
Fig 4.4	Exemple de résultats de la simulation optique de l'éclairement concentré incident sur l'absorbeur d'un cuiseur boîte à surface d'ouverture inclinée sur le site de Ghardaïa: (a) cuiseur sans réflecteur au mois de Décembre; (b) cuiseur avec réflecteur au mois de Décembre; (c) cuiseur sans réflecteur au mois de Juin; (d) cuiseur avec réflecteur au mois de Juin.	136
Fig 4.5	Résultats de la simulation de l'éclairement concentré incident sur l'absorbeur du cuiseur boîte à surface d'ouverture inclinée avec réflecteur additionnel sur le site de Ghardaïa: (a) au mois de Septembre 2013 à midi; (b) au mois de Mai 2013 à 11 h.	137
Fig 4.6	Résultats pratiques de l'évolution des températures de l'absorbeur du cuiseur boîte réalisé, mesurées sur le site de Ghardaïa pour les tests du 22 Septembre et 29 Mai 2013.	138
Fig 4.7	Exemple de tracé brute des températures de l'absorbeur d'un cuiseur boîte obtenu par ciel clair pour le jour type du mois de Décembre.	139
Fig 4.8	Tracé des cartes de l'éclairement solaire direct maximal, incident sur le plan récepteur du cuiseur boîte, obtenu par ciel clair pour un jour: (a) de la saison hivernale; (b) de la saison estivale.	140
Fig 4.9	Tracé des cartes de l'éclairement solaire global maximal, incident sur le plan récepteur du cuiseur boîte, obtenu par ciel clair pour un jour type: (a) du mois de Décembre; (b) du mois de Juin.	140
Fig 4.10	Cartographie l'éclairement solaire concentré sur l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée, obtenue par ciel clair pour un jour type du mois de Décembre: (a) sans réflecteur additionnel; (b) avec réflecteur additionnel, pour divers sites de l'Algérie.	141
Fig 4.11	Cartographie l'éclairement solaire concentré sur l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée, obtenue par ciel clair pour un jour type du mois de Juin: (a) sans réflecteur additionnel; (b) avec réflecteur additionnel, pour divers sites de l'Algérie.	141
Fig 4.12	Cartographie des températures de l'absorbeur du cuiseur boîte réalisé, sans l'ajout de réflecteur additionnel, obtenue par ciel clair pour un jour type: (a) de la saison hivernale; (b) de la saison estivale.	142
Fig 4.13	Cartographie des températures de l'absorbeur du cuiseur boîte réalisé, avec l'ajout de réflecteur additionnel, obtenue par ciel clair pour un jour type: (a) de la saison hivernale; (b) de la saison estivale.	142
Fig 4.14	Cartographie des températures de l'absorbeur du cuiseur boîte, obtenue par ciel clair pour un jour type: (a) du mois de Mars sans réflecteur; (b) du mois d'Octobre avec	143

	réflecteur.	
Fig 4.15	Cartographie de l'efficacité du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée répartis sur quatre zones de l'Algérie suivant l'approche optique.	144
Fig 4.16	Divers modes de transfert de chaleur dans un cuiseur solaire: (a) cuiseur boîte ordinaire; (b) cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée.	146
Fig 4.17	Comparaison entre les valeurs théoriques et expérimentales des différents éléments du cuiseur réalisé pour un jour type du mois de Mai 2013.	149
Fig 4.18	Cartes du facteur de trouble de Linke pour ciel clair en Algérie: (a) pour le mois de Décembre; (b) pour le mois de Juin.	150
Fig 4.19	Cartes de l'éclairement solaire instantané (à midi) incident sur l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteur additionnel pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.	151
Fig 4.20	Cartes de l'éclairement solaire instantané (à midi) incident sur l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec réflecteur additionnel pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.	151
Fig 4.21	Cartes des températures du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteur additionnel pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.	152
Fig 4.22	Cartes des températures du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteur additionnel pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Mars; (b) au mois de Septembre.	152
Fig 4.23	Cartes des températures du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec réflecteur additionnel principal pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.	153
Fig 4.24	Cartes des températures du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec réflecteur additionnel principal pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Mars; (b) au mois de Septembre.	153
Fig 4.25	Représentation des températures atteintes par l'absorbeur du cuiseur boîte avec réflecteur au mois de Janvier pour quelques sites de l'Algérie.	154
Fig 4.26	Carte de l'efficacité du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteur additionnel sur l'ensemble du territoire Algérien durant l'année.	155
Fig 4.27	Carte de l'efficacité du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec un réflecteur additionnel sur l'ensemble du territoire Algérien durant l'année.	155

LISTE DES TABLEAUX

Tab 2.1	Caractéristiques techniques du cuiseur boîte réalisé à l'URAER, Ghardaïa.	74
Tab 3.1	Energie solaire concentrée au niveau du cuiseur boîte et du cuiseur parabolique, pertes optiques au niveau de l'absorbeur et du foyer des cuiseurs, respectivement. Tous les paramètres sont en W.	82
Tab 3.2	Calcul de l'angle d'inclinaison du miroir réflecteur du cuiseur solaire boîte à surface d'ouverture horizontale (α_H) et du cuiseur solaire boîte à surface d'ouverture inclinée (α_I), pour quelques jours type de l'année en fonction des paramètres de position du soleil.	84
Tab 3.3	Incertitudes et plages de fonctionnement des paramètres expérimentaux.	95
Tab 3.4	Valeurs calculées de la constante du temps τ_{boil} pour différentes valeurs d'éclairement solaire et de température ambiante.	106
Tab 3.5	Résultats de l'énergie (E_o) et l'exergie de sortie (Ξ_o) du cuiseur boîte à surface inclinée.	113
Tab 3.6	Comparaison des températures de stagnation de notre cuiseur solaire avec d'autres cuiseurs boîtes réalisés dans le monde.	125
Tab 3.7	Comparaison des valeurs de la première et la deuxième figure of merit de notre cuiseur solaire avec d'autres cuiseurs boîtes réalisés dans le monde.	126
Tab 3.8	Expression de la puissance de cuisson ajustée de notre cuiseur solaire comparée avec d'autres cuiseurs boîtes réalisés dans le monde.	127
Tab 3.9	Paramètres du rendement énergétique et exergétique calculés de notre cuiseur solaire comparés avec d'autres cuiseurs boîtes réalisés dans le monde.	127
Tab 3.10	Paramètres indicateurs des performances obtenus pour notre cuiseur solaire comparés avec d'autres cuiseurs boîtes réalisés dans le monde.	129
Tab 3.11	Tests de cuisson pour différents produits alimentaires à l'aide de notre cuiseur réalisé.	129
Tab 4.1	Evaluation économique du cuiseur boîte réalisé à l'URAER, Ghardaïa.	157

INTRODUCTION GENERALE

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique résultant d'une croissance exceptionnelle des besoins énergétiques de l'humanité. Le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une augmentation importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'utilisation de sources d'énergies fossiles. D'autres facteurs comme les émissions de CO₂ et le caractère limité de nos réserves fossiles n'ont pas été pris en compte, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser d'autres sources d'énergies, tout en tenant compte des notions économiques et environnementales [1].

Comme alternative à ces préoccupations, le développement et l'implémentation des énergies renouvelables est incontournable, des ressources énergétiques illimitées et abondamment disponibles existent et doivent être exploitées. Certaines, comme l'énergie éolienne ou hydraulique connaissent déjà un développement technique et commercial important. D'autres, comme l'énergie solaire et thermoélectrique, sont techniquement disponibles mais leur compétitivité économique n'est pas encore atteinte pour diverses considérations. Actuellement, il existe une volonté mondiale pour remédier à tous ces problèmes par le recours aux énergies renouvelables à grande échelle.

A l'heure de la prise de conscience massive des effets du réchauffement climatique, il est primordial de considérer l'énergie solaire comme l'une des alternatives possibles aux combustibles fossiles [1]. Cette source d'énergie; qui est l'objectif de notre travail, se caractérise par une absence de pollution et une disponibilité exceptionnelle. D'autre part, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie présentent beaucoup d'avantages. Cette source d'énergie est utilisée de manières différentes, par exemple; dans les systèmes thermiques pour la production d'eau chaude, ou dans les systèmes photovoltaïques pour la production d'électricité, il apparaît dès lors que l'énergie solaire peut apporter de réelles solutions.

La cuisson solaire est l'une des applications possibles de cette énergie. Le cuiseur solaire contribue à résoudre deux des problèmes majeurs dans le monde : l'aggravation du manque d'énergie pour la cuisson et le fléau des maladies liées à l'eau. La moitié de la population mondiale cuisine à l'aide du feu de bois et vit dans des régions favorables à l'exploitation de l'énergie solaire. Selon l'ONU, deux tiers de la population mondiale, c'est-à-dire deux milliards de personnes, souffrent du manque de bois [2]. 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 [2], et peut donc à cet effet éviter le

égagement d'une grande quantité de gaz à effet de serre [3]. 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]. La concentration du rayonnement solaire permet, pour une surface de capteur donnée, de diminuer la surface de réception effective et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur. Ainsi la température atteinte après transformation en chaleur est plus élevée que pour des dispositifs à capteurs sans concentration. Les principaux dispositifs optiques qui permettent de concentrer l'énergie solaire mettent en œuvre des surfaces réfléchissantes (miroirs). La forme géométrique qui donne la meilleure concentration est la parabole, les fours solaires sont des variantes de la parabole, à foyer fixe [4].

L'intérêt de la communauté internationale pour le concept de la cuisson solaire a largement augmenté au cours de la dernière décennie, renforcé par les craintes d'un pic puis d'un déclin de la production de pétrole, du gaz et d'autres carburants fossiles. A cela s'ajoutent la quête de nouvelles sources d'énergie pour répondre à l'augmentation de la demande énergétiques mondiale pour couvrir les besoins en cuisson et l'inquiétude vis-à-vis de l'accumulation des gaz à effet de serre aggravant les problèmes environnementaux et le risque de la désertification des zones menacées par la déforestation.

L'Algérie dispose d'une grande superficie, dont la majorité constitue le Sahara. Dans les régions arides ensoleillées où vie les nomades, dont les besoins à la cuisson; liés à la récolte du bois augmentent progressivement, aggravent le problème de la rareté de cette ressource et provoquent sont épuisement de plus en plus. Dans ces zones éloignées, où ces gens n'ont pas d'alternatives aux feux de bois et prenant en compte les habitants des villes sahariennes qui utilisent principalement le gaz naturel (fossile) comme énergie de cuisson, l'énergie solaire est considérée la meilleure solution pour remédier à ces problèmes et autant d'autres. L'Algérie avec son gisement solaire très important à de grandes possibilités de développement de la filière. Aujourd'hui, le pays a donc le devoir de mettre en place une politique incitative dans le cadre de l'exploitation et la vulgarisation de ces dispositifs. Le recours à ces technologies ouvrira de nouvelles perspectives et permettra de préserver les réserves actuelles et d'apporter une alternative au pétrole et au gaz, du point de vue revenu national du pays et sources d'énergie.

Dans ce contexte, le travail de recherche présenté dans cette thèse est une contribution pour une meilleure intégration des dispositifs à cuisson solaire (cuiseurs solaires boîtes) dans la vie quotidienne (les domiciles) et leur vulgarisation dans tout le pays. Cependant, il a été constaté que le design classique des cuiseurs solaires boîtes (à surface d'ouverture horizontale); commercialisés à grande

échelle dans le monde, ne permet pas d'atteindre; pour la plus part des aliments, des températures suffisamment nécessaires à la cuisson. Plusieurs études ont été réalisées à travers le monde dans le but d'améliorer leur rendement en agissant par exemple sur la nature de la matière isolante [5, 6], la qualité et la forme de l'absorbeur [7, 8], et/ou l'utilisation d'un double vitrage comme couverture [9, 10], ou encore sur la forme des récipients de cuisson [11, 12] ...etc., mais sans résultats intéressants: les températures restent toujours basses et le rendement faibles. De ce fait, ces types de cuiseurs ne résolvent pas les problèmes majeurs de la cuisson solaire et ne répondent pas aux besoins des utilisateurs en matière de cuisson de divers aliments. D'où l'idée de chercher un design de cuiseur boîte qui constituera une solution optimale à ce genre de problème. Notre proposition s'est portée sur un design de cuiseur solaire boîte avec une surface réceptrice inclinée permettant de minimiser l'ombrage exercé sur la plaque absorbante par augmentation de la surface d'ouverture, ce qui permet de gagner une quantité importante de rayonnement solaire. Et pour recevoir encore un supplément d'énergie, nous avons effectué une étude optique pour l'intégration des réflecteurs (boosters mirrors) dans la conception du design final de notre cuiseur. La réalisation et l'utilisation de ce genre de cuiseur boîte (à surface réceptrice inclinée) sera capable d'offrir une alternative meilleure aux problèmes de cuisson solaire cités précédemment, à savoir : fonctionnement à des températures relativement élevées, réduction du temps de cuisson, amélioration du rendement thermique, éviter le risque de nourriture brûlée, la cuisson d'une gamme importante d'aliments, ajustement moins fréquent du dispositif...etc.

Et dans l'objectif de permettre une avancée progressive du développement de la filière, l'efficacité de ces technologies en Algérie reste au préalable à démontrer car ces dernières devront être adaptées au climat Algérien, notamment celui du Sud du pays. A cet effet, notre cuiseur; après réalisation, sera expérimenté et testé sur le site saharien de Ghardaïa, afin d'identifier les différents paramètres le caractérisant et de prouver la faisabilité et la rentabilité d'un tel système dans les régions du Sud Algérien. La généralisation de l'utilisation d'un tel cuiseur boîte au niveau national; dans les régions côtières qu'au Sahara, sera ensuite à étudier.

Cette thèse qui décrit notre travail est architecturée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des notions générales sur l'énergie solaire et ces applications ainsi que le potentiel solaire de notre pays. Une étude détaillée sur les cuiseurs solaires sera présentée, depuis la source primaire qui est le rayonnement solaire jusqu'à l'architecture du système de cuisson solaire, son principe de fonctionnement, les différents types, leurs méthodes de conception ainsi que le stockage d'énergie dans les systèmes à cuisson solaire. Un grand intérêt est porté à leur développement et leur utilisation à travers le monde et leur contribution à réduction des gaz à effet de serre est

également étudiée. Nous aborderons également les systèmes à fours solaires qui utilisent les technologies solaires à concentration. A la fin de ce premier chapitre, nous avons analysé les limites techniques des cuiseurs solaires afin d'identifier la problématique du projet et de présenter l'objectif de cette thèse.

Dans le second chapitre, nous nous intéressons à l'étude et la réalisation du système de cuisson solaire proposé (cuiser boîte à surface réceptrice inclinée). Nous commencerons par une conception mécanique du cuisier à l'aide du logiciel SolidWorks [13] puis, une simulation optique en utilisant le logiciel TracePro 7.0 [14], les configurations de l'ajout des réflecteurs associés au cuisier seront également étudiées à travers des simulations interprétées afin de définir un design de conception optimisé. Dans la seconde étape, nous passerons à la partie pratique du travail où nous décrirons la réalisation du cuisier solaire avec ses réflecteurs additionnels ainsi que le dispositif d'articulation adopté et les différents matériaux utilisés pour la fabrication. Un second cuisier boîte ordinaire (à surface réceptrice horizontale) sera également réalisé et présenté dans ce chapitre, il servira de référence et de comparaison avec le cuisier proposé du point de vue performances optiques et thermiques.

A ce stade, une modélisation de l'éclairement solaire s'avère indispensable, le modèle de calcul de l'éclairement solaire choisi (modèle r.sun [15]) est également bien représenté dans ce chapitre. Les transmittances nécessaires pour le calcul des deux composantes directe et diffuse de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal et incliné; par ciel clair, sont programmées avec Matlab 7.10 [16] et leurs variations sont illustrées sous formes graphiques. Les formules des paramètres géométriques et atmosphériques nécessaires ont été également programmées et représentées. Une détermination expérimentale du facteur de trouble de Linke est réalisée pour le site de Ghardaïa et une base de données est établie à partir du site Soda [17], du fait que le modèle de calcul de l'éclairement solaire adopté fait appel à la détermination de ce facteur.

Dans le troisième chapitre, une évaluation des performances du cuisier boîte réalisé est effectuée selon les Normes et Standards Internationaux. Un schéma synoptique de la chaîne d'acquisition de données sera dressé et expliqué. Eventuellement, les instruments de mesure utilisés pour collecter les diverses paramètres seront présentés. Les températures mesurées au niveau du cuisier à travers l'unité d'acquisition de donnée AGILENT 34972A [18]; à savoir : température de l'absorbeur, température du vitrage, température de l'air interne ...etc, seront visualisées numériquement et graphiquement sur l'écran d'un micro-ordinateur. Par ailleurs, des tests sont réalisés pour diverses configurations du cuisier et durant plusieurs jours de l'année avec différentes conditions climatiques, le temps d'ajustement du cuisier est effectué d'une manière bien étudiée. Les résultats issus des tests réalisés

seront discutés et interprétés pour vérifier aussi bien le bon fonctionnement de l'ensemble et sa faisabilité/rentabilité. Les paramètres caractérisant le cuiseur suivant les Normes et Standards Internationaux; à savoir : les figures of merits, la puissance de cuisson, temps d'ébullition.....etc, seront bien déterminés et la courbe caractéristique de notre cuiseur sera dressée selon les conditions climatiques locales (caractérisation du cuiseur), ajustée. Le rendement énergétique et exergétique du cuiseur sont également calculés et les paramètres indicateurs des performances du cuiseur seront ensuite déduits. Le chapitre se terminera par une validation des résultats obtenus à partir du système de cuisson réalisé par comparaison avec diverses réalisations à travers le monde.

Après une simulation de la répartition des rayons solaires incidents sur l'absorbeur d'un cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée en milieux arides durant l'année, une réalisation pratique du cuiseur à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, de Ghardaïa et une éventuelle évaluation de ces performances thermiques, le dernier chapitre s'est focalisé sur le développement de deux méthodologies d'estimation des températures de la plaque absorbante atteintes par le cuiseur boîte réalisé durant son fonctionnement pour plusieurs sites de l'Algérie. Selon la première approche, nous sommes basés essentiellement sur la simulation optique des irradiations solaires incidentes sur l'absorbeur du cuiseur boîte. Une méthode a été développée pour extraire l'éclairement concentré moyen reçu. L'équation mathématique d'un corps noir 'black body radiation equation' permettra ensuite de déduire les températures atteintes par l'absorbeur du cuiseur boîte. Selon la deuxième approche, un modèle mathématique régissant le bilan thermique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée a été développé sous Matlab 7.10. Le modèle mathématique développé solidaire du programme initial calculant les irradiations solaires permettent d'estimer et de calculer les différentes températures du cuiseur boîte d'une manière itérative pour n'importe quel moment de la journée et pour tous les jours de l'année. Les résultats obtenus par les deux méthodes, projetés sur des cartes illustratives par utilisation du logiciel Surfer 8.02 [19]; ont permis la détermination de l'efficacité du cuiseur, sujet de l'étude; sur l'ensemble du territoire Algérien, ce qui a permis la classification des zones du territoire national les mieux appropriées à l'exploitation de ce type de cuiseur.

Finalement une conclusion générale contenant les interprétations et les perspectives envisagées terminera cette thèse.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LE SOLAIRE ET ETAT DE L'ART DES SYSTEMES DE CUISSON SOLAIRE

1.1. INTRODUCTION

Les cuissons traditionnelles sont néfastes pour l'environnement et participent à l'aggravation de la pollution et le réchauffement de la planète, elles utilisent souvent des énergies fossiles dont les stocks ne sont pas illimités, les cuissons au bois contribuent à la déforestation dans certaines régions. C'est pourquoi l'utilisation d'un cuiseur solaire peut s'avérer être la solution la plus écologique pour la cuisson des aliments.

Dans ce premier chapitre, une étude sur les cuiseurs solaires sera présentée, depuis la source primaire qui est l'éclairement solaire jusqu'à l'architecture du système de cuisson, son principe de fonctionnement, 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 premier chapitre et leur impact environnemental sera étudié.

1.2. LE RAYONNEMENT ET L'ENERGIE SOLAIRE

1.2.1. Le rayonnement solaire

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 μm . La figure (1.1) représente la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi [20] :

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

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 kW/m^2 à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface

terrestre dépasse rarement 1200 W/m^2 . La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui augmentent ou diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [20].

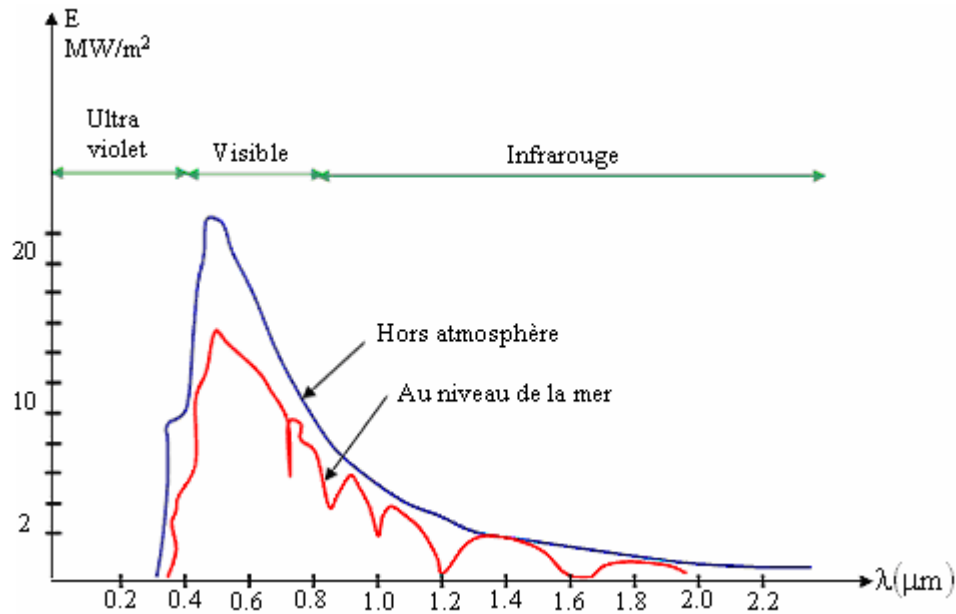


Fig 1.1: Analyse spectrale du rayonnement solaire [21].

1.2.2. Les instruments de mesure du rayonnement solaire

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

1.2.2.1. La mesure du rayonnement solaire direct

Au sol, la mesure du rayonnement solaire direct est faite à l'aide d'un pyrhéliomètre (Fig 1.2.a), cet instrument est en permanence orienté vers le soleil et ne mesure que le rayonnement provenant du seul disque solaire. Le rayonnement capté est absorbé par une surface noire, la différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement direct. Pour mesurer la répartition spectrale du rayonnement solaire, on utilise un spectroradiomètre qui fournit la densité spectrale d'éclairement énergétique du rayonnement [20].

1.2.2.2. La mesure du rayonnement solaire global et diffus

La mesure du rayonnement solaire global est faite à l'aide d'un pyranomètre (Fig 1.2.b), cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie. Le domaine spectral couvert s'étend de 0.3 à $3 \mu\text{m}$. Le rayonnement reçu est converti en chaleur par la surface noircie. La

différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global; elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série [20].



Fig 1.2: Instruments de mesure du rayonnement solaire [22].

(a): Pyrhéliomètre (mesure du rayonnement direct), (b): Pyranomètre (mesure du rayonnement global et diffus).
(Photo de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – URAER, Ghardaïa)

La mesure du rayonnement solaire diffus est faite à l'aide du même instrument (Fig 1.2.b), auquel on a adjoint un écran occultant le rayonnement solaire direct. Selon les cas, cet écran peut être, soit un disque ou une sphère dirigée en permanence vers le soleil, soit une bande pare-soleil parallèle au plan équatorial et déplacée en fonction de la déclinaison solaire [20].

1.2.3. L'énergie solaire

L'énergie solaire présente certains avantages non négligeables sur les autres sources énergétiques, elle est [21] :

- Locale: elle est disponible partout sur notre planète;
- Gratuite: seul l'investissement dans l'installation solaire est nécessaire;
- Propre: l'utilisation des capteurs plans ou modules photovoltaïques ne pollue en rien l'environnement;
- Silencieuse: les rayons solaires nous arrivent dans le plus grand silence;
- Durable: de part son caractère renouvelable, elle est durable.

Les premières tentatives d'exploitation de l'énergie solaire utilisaient l'interaction rayonnement matière, c'est-à-dire l'échauffement d'un corps noir au soleil. Aujourd'hui, nous captions l'énergie solaire pour chauffer les maisons et l'eau, et pour produire de l'électricité, et cela au moyen de trois

différentes méthodes et technologies: l'énergie solaire passive, l'énergie solaire active et l'énergie photovoltaïque [23].

1.2.4. Les applications de l'énergie solaire

1.2.4.1. Le solaire passif

Le terme passif renvoie aux techniques utilisées pour capter l'énergie, ces techniques misent sur la conception des immeubles et le type de matériaux utilisés pour les construire plutôt que sur de l'équipement mécanique [23]. Aujourd'hui, la conception solaire passive utilise les éléments fondamentaux d'un immeuble (les murs, la toiture et les fenêtres) pour contrôler la quantité d'énergie solaire absorbée ou perdue (Fig 1.3). La conception solaire passive aide aussi à conserver la fraîcheur en été.



Fig 1.3: Confort thermique dans un habitat (habitat passif) [24].
(Photo de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – URAER, Ghardaïa)

1.2.4.2. 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, tel que les systèmes à chauffe-eau solaires (Fig 1.4), qui utilisent les capteurs plan vitrés ou non vitrés pour chauffer de l'eau ou le chauffage des locaux et la ventilation solaire qui utilisent aussi des capteurs vitrés ou un bardage perforé pour chauffer l'air. Un autre exemple est celui qui utilise les centrales électriques solaires [23].



Fig 1.4: Vue d'une installation thermique (chauffe-eau solaire) [25].
(Photo de l'Unité de Recherche - Université de Batna)

1.2.4.3. Le solaire photovoltaïque

Le processus photovoltaïque; (Fig 1.5), transforme l'énergie de rayonnement du soleil en courant électrique continu. Le physicien Edmond Becquerel a décrit l'effet en 1839, mais ce n'est que vers le milieu et la fin des années 1950 que des cellules photovoltaïques pratiques ont été commercialisées [23]. Les systèmes photovoltaïques présentent certains problèmes :

- Les capteurs sont très chers et les rendements obtenus (de 6 à 14 % suivant les modèles dans les meilleures conditions possibles) sont faibles.
- Le prix du kilowattheure est environ 6 fois supérieur à ceux des centrales traditionnelles. La densité énergétique est très faible, ce qui nécessite la pose de grandes surfaces de panneaux solaires photovoltaïques [26].



Fig 1.5: Vue d'une installation photovoltaïque [27].
(Photo du Centre de Développement des Energies Renouvelables – CDER, Bouzaréah)

1.2.5. Les technologies solaires à concentration

1.2.5.1. Le potentiel solaire mondial et les ressources solaires en Algérie

Les sources d'énergie renouvelables dans les pays au bord de la méditerranée à elles seules peuvent faire face à la demande énergétique mondiale croissante. En effet, la ressource d'énergie la plus importante dans ces pays est l'irradiation solaire, avec un potentiel qui peut satisfaire la demande en l'électricité du monde entier [28]. Les technologies solaires utilisant les systèmes à concentration pour la production électrique exigent l'ensoleillement normal direct, qui représente entre 50 % et 90 % de la totalité du rayonnement solaire. Plus abondante dans une zone géographique appelée communément la ceinture solaire indiquée sur la figure (1.6a), la ressource en rayonnement solaire direct est considérable à l'échelle planétaire [4].

Avec 2381741 km² de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste du méditerranéen, selon une étude de l'agence aérospatiale allemande [28], l'Algérie offre de plus grandes possibilités intéressantes; à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires. En effet l'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel solaire énorme, selon les données d'ensoleillement figure (1.6b), l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillés au monde [29].

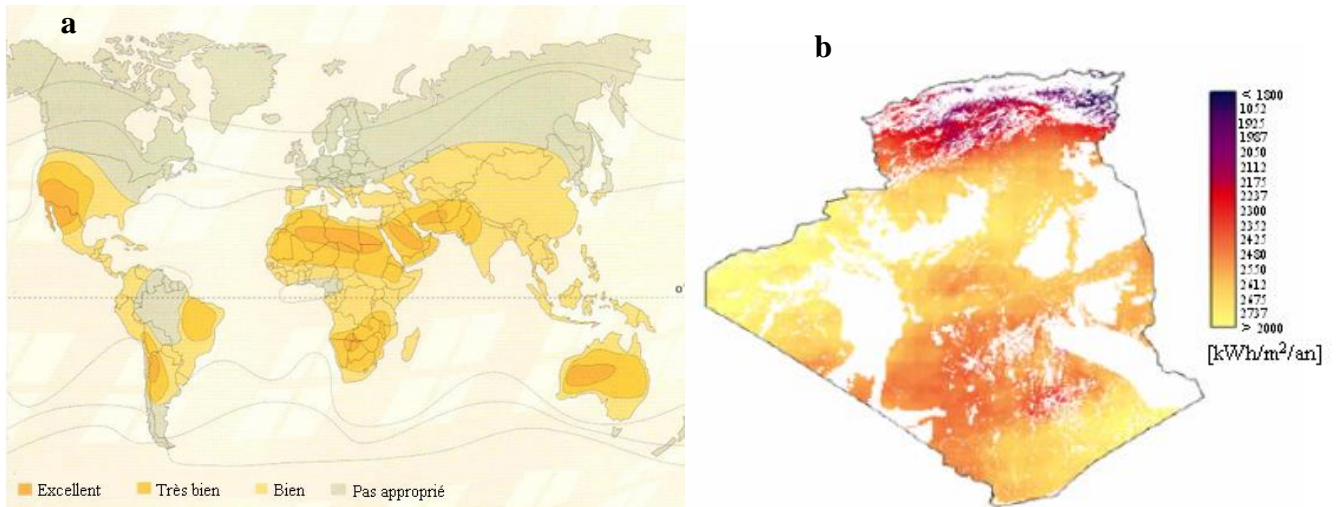


Fig 1.6: Ressources énergétiques solaires: (a) potentiel mondial [30]; (b) potentiel de l'Algérie [28].

1.2.5.2. Le principe de fonctionnement des systèmes à 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 [31]. Le temps de retour énergétique des installations solaires à concentration est que de 5 mois et leur durée de vie est estimée entre 25 et 30 ans [31]. La figure (1.7) illustre quelques réalisations mondiales des centrales solaires à concentration :



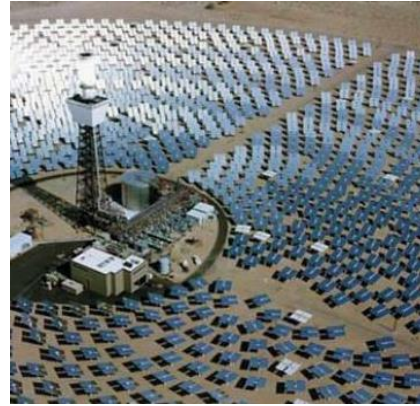


Fig 1.7: Centrales solaires à concentration réalisées à travers le monde [32].

1.2.5.3. Les types de concentrateurs solaires

Il existe pratiquement quatre principaux types de concentrateurs solaires. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels.

a. Les centrales à tour

Une centrale à tour (Fig 1.8), utilise un certain nombre de grands miroirs plats qui suivent le mouvement du soleil et qui concentrent la lumière sur un grand absorbeur situé au sommet d'une tour. Le système pompe un fluide, soit une huile synthétique à haute température ou du sel fondu, dans l'absorbeur où il est chauffé jusqu'à (550 °C) et ensuite utilisé pour produire de l'électricité [23].

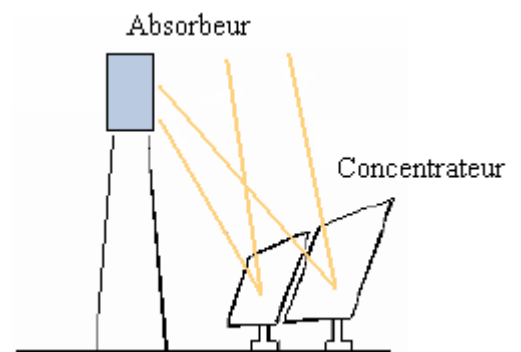


Fig 1.8: Schéma de principe d'une centrale à tour [4].

b. Les systèmes à réflecteur parabolique

Un système à réflecteur parabolique (Fig 1.9), utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur situé au foyer du récepteur. Le récepteur contient un fluide qui, lorsque les rayons du soleil le frappent, atteint une température de 750 à 1000 °C. Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité dans un petit moteur fixé au récepteur [23].

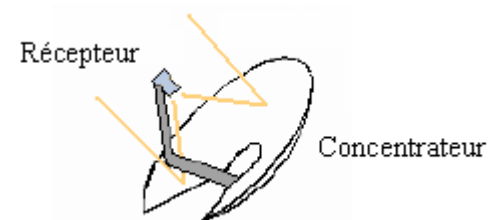


Fig 1.9: Schéma de principe d'un concentrateur parabolique [4].

c. Le système à réflecteur cylindro-parabolique

Comme son nom l'indique, ce système utilise une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole (Fig 1.10). La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Les températures du récepteur peuvent atteindre (400 °C) et peuvent produire de la vapeur afin de fournir de l'électricité [23].



Fig 1.10: Schéma de principe d'un concentrateur cylindro-parabolique [4].

d. Les systèmes à miroirs de Fresnel

La technologie des miroirs de Fresnel (Fig 1.11), utilise un premier étage de réflecteur installé sur le sol, le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur, ce second étage de réflecteurs joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur. Cette technologie pourrait mener à une réduction des coûts de production de 50 % par rapport à aux réflecteur traditionnels [1].

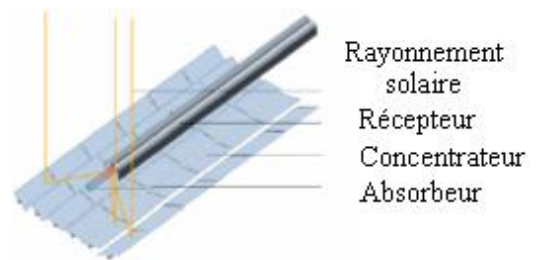


Fig 1.11: Schéma de principe des miroirs de Fresnel [1].

1.3. LES CUISEURS SOLAIRES

1.3.1. L'historique de la cuisson solaire [33, 34, 27]

Depuis des siècles, les gens ont séché au soleil, fruits, légumes, poissons et viandes pour les préserver. En 1767 le Français et Suisse Horace-Bénédict de Saussure a cuit des fruits dans un boîtier recouvert de trois carreaux en verre, et fait à partir de deux boîtes en bois d'épinette et de la laine comme matériel isolant. L'astronome britannique John Herschel a utilisé un cuiseur de type boîte en Afrique du Sud en 1830. La première utilisation de cuiseurs solaire aux États-Unis date de 1881 au cours de l'ascension de Samuel P. Langley au Mont Whitney, en Californie. Pendant les années 1860, Mouchot en Algérie a cuit avec un concentrateur concave. Charles Abbot a fabriqué une boîte avec des armatures réfléchissantes en forme de parabole qu'il a dirigée sur un récipient d'huile de moteur. Ce dernier fut chauffé à 177°C et la chaleur résiduelle a permis la cuisson plus tard en soirée. Dans les années 1900, Maria Telkes des États-Unis, a fait de la recherche sur plusieurs prototypes de cuiseurs solaires à panneaux. En général, ces premiers modèles de cuiseurs solaires étaient chers et incommodes.

La disparition des arbres ainsi que les pénuries de pétrole des années 1970 ont éveillé l'intérêt mondial dans les alternatives au pétrole. Les gouvernements de l'Inde et de la Chine ont développé et ont assuré la promotion des cuiseurs de type boîte et des concentrateurs paraboliques. En 1976 dans l'état de l'Arizona aux États-Unis, Barbara Kerr et Sherry Cole ont développé des cuiseurs de type boîte faciles à construire à domicile. Elles ont aussi travaillé sur des modèles de dessiccateurs et stérilisateur solaires de nourriture. Le professeur Robert Metcalf, de l'Université de Californie à Sacramento continue même aujourd'hui à faire des études scientifiques sur la pasteurisation solaire de l'eau et de partager ses connaissances dans beaucoup de pays.

Kerr, Cole, Metcalf et d'autres ont fondé Solar Cookers International (SCI) en 1987 pour diffuser la cuisson solaire pour le bénéfice des peuples et des environnements à travers le monde. Aujourd'hui plusieurs centaines d'ingénieurs, d'éducateurs, de coopérants et bénévoles, de fonctionnaires, de clubs, d'universités, de groupes religieux et de programmes pour réfugiés partagent leurs connaissances de cuisson solaires qui est devenu très répandue à travers le monde, surtout dans les régions isolées, pauvres et en voie de développement où plusieurs organisations internationales entretiennent des programmes d'aide et de promotion de la cuisson solaire au profit des populations locales.

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

En Algérie, la cuisson solaire est toujours méconnue par le grand public. Le projet lancé en 2004 et inscrit au programme de l'URER/MS a permis d'introduire cette activité en milieu saharien et de s'inscrire dans le répertoire international des promoteurs de la cuisson solaire ('International Directory of Solar Cooking Promoters'). Beaucoup d'efforts restent à fournir et un projet de grande envergure est nécessaire pour développer et vulgariser cette application qui peut être très bénéfique au niveau des régions isolées.

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

Il existe trois principaux modèles de base :

1.3.2.1. Le cuiseur à panneaux

Ce type (Fig 1.12), est constitué de différents panneaux plans réfléchissants et d'un récipient noir englobé dans un sac en plastique, placé sous une cloche en verre [35]. 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 [36].



Fig 1.12: Schéma de principe d'un cuiseur à panneaux [33].

1.3.2.2. Le cuiseur de type boîte

Ce modèle (Fig 1.13), est constitué d'un ou plusieurs panneaux plans réfléchissants qui concentrent les rayons du soleil sur le récipient [35]. 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 [36].

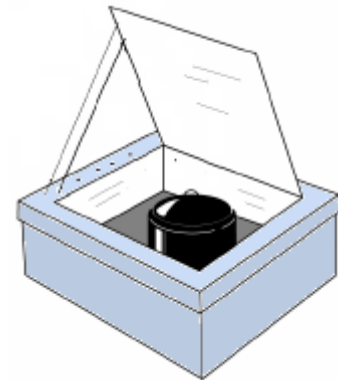


Fig 1.13: Schéma de principe d'un cuiseur de type boîte [33].

1.3.2.3. Le cuiseur parabolique

Le cuiseur parabolique (Fig 1.14), 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 [35]. La puissance d'un cuiseur parabolique solaire est équivalente à celle d'une plaque électrique ou à gaz [36]. On trouve généralement deux types: les cuiseurs paraboliques à réglage manuel et les cuiseurs paraboliques à réglage automatique.

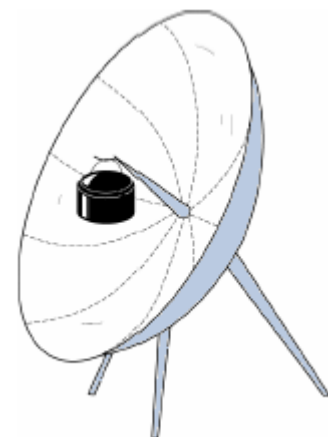


Fig 1.14: Schéma de principe d'un cuiseur parabolique [33].

1.3.3. Les températures et temps de cuisson

La cuisine solaire est un moyen écologique et économique de préparer les aliments. Le fonctionnement des cuiseurs solaires dépend uniquement de l'ensoleillement et non de la température extérieure. Par conséquent, ils s'utilisent aussi bien en été qu'en hiver et ce dans toutes les régions ensoleillées du globe. Un minimum de 40 minutes d'ensoleillement suffit pour un bon fonctionnement [37]. 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 [35]. Cependant, des températures comprises entre 80 et 90°C suffisent pour cuire les nourritures et gardent leur goût, humidité et éléments nutritifs (Fig 1.15) [37].

Les temps de cuisson sont très variables, ils varient considérablement en fonction de divers facteurs [38] 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 [2].

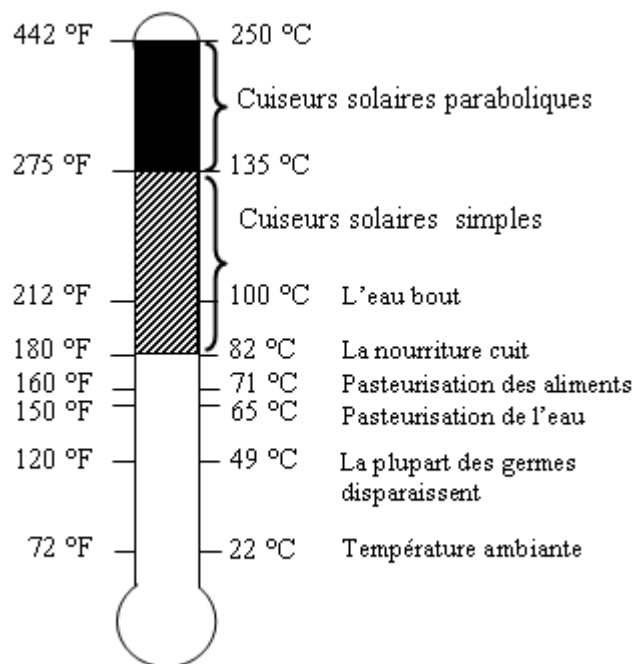


Fig 1.15: Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs [2].

1.3.4. La classification des cuiseurs solaires

Les cuiseurs solaires sont généralement classés par catégories au-dessous de deux groupes: les cuiseurs solaires sans stockage et les cuiseurs solaires avec stockage. Le classement des cuiseurs sous chaque groupe est illustré sur La figure (1.16) :

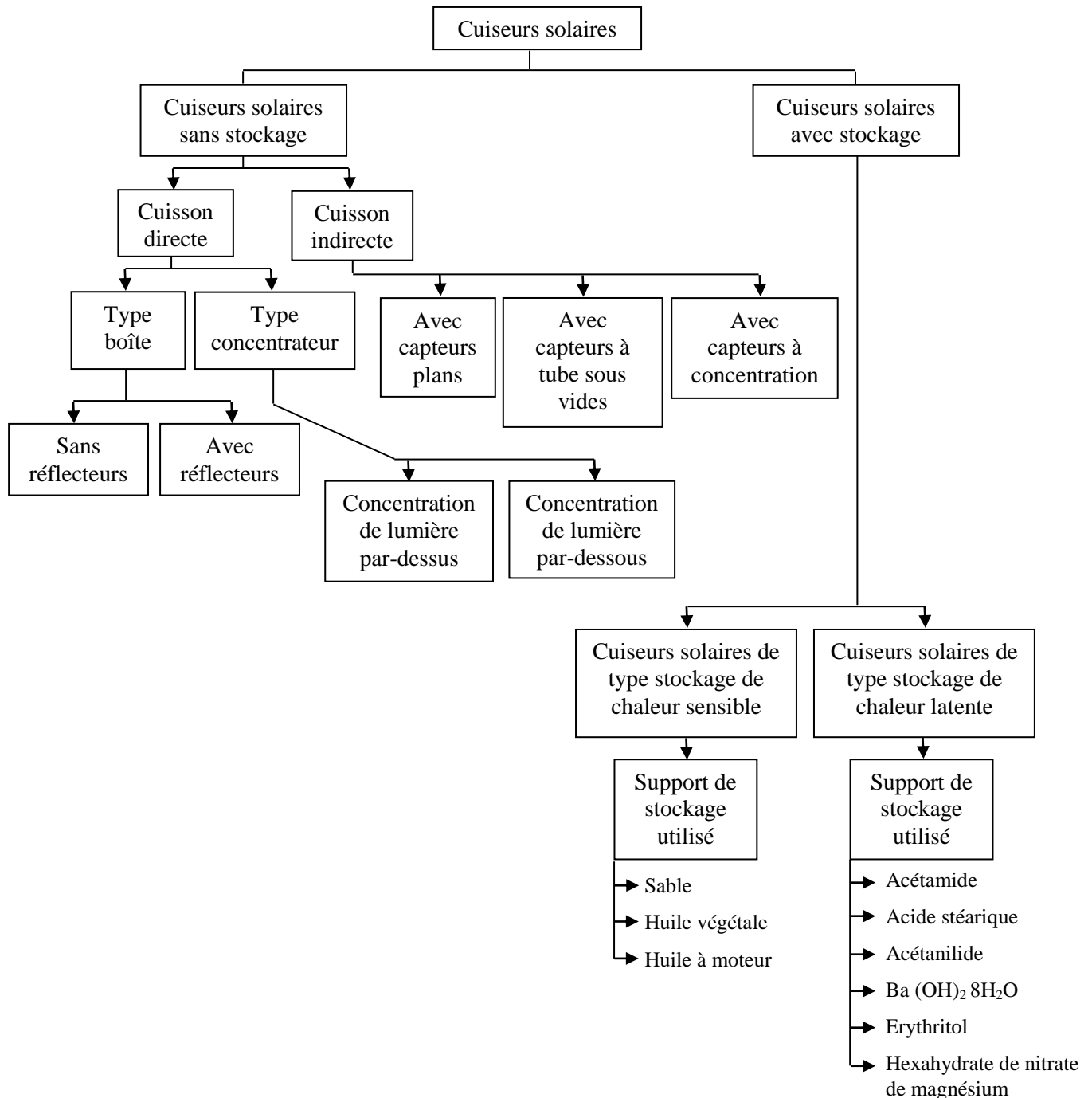


Fig 1.16: Classification des cuiseurs solaires sans et avec stockage thermique [39].

1.3.4.1. Les cuiseurs solaires sans stockage (cuisson directe et indirecte)

Les cuiseurs solaires sans stockage sont partagés en cuiseurs solaires directs et indirects suivant le mécanisme de transfert thermique, les cuiseurs solaires de type direct utilisent le rayonnement solaire

directement dans le procédé de cuisson tandis que les cuiseurs indirects utilisent un fluide caloporteur pour le transfert de la chaleur du collecteur à l'unité de cuisson.

a. Cuisson directe

Les cuiseurs solaires fonctionnant en mode directe commercialement réussis sont de type boîte et de type concentrateur.

Le cuiseur solaire de type boîte est comme son nom l'indique une boîte isolée avec simple ou double vitrage. Ce genre de cuiseur dépend uniquement de l'effet de serre dans lequel le verre transparent permet le passage du rayonnement solaire de longueur d'onde courte et il est opaque à la partie du rayonnement de longue longueur d'onde. Une double isolation des parois peut également servir à retenir plus de chaleur à l'intérieur du cuiseur [39]. Des miroirs peuvent être ajoutés pour refléter plus de rayonnement solaire vers le récipient de cuisson (Fig 1.17a et Fig 1.17b).

Les avantages de ce type de cuiseur incluent la simplicité de construction et de l'exploitation avec un minimum d'assistance humain pendant le procédé de cuisson. Ces cuiseurs sont également plus stables, ils peuvent conserver la nourriture chaude pour un bon moment. Les cuiseurs boîtes ne produisent pas de lueur et aucun risque du feu et de brûlures. Les inconvénients des cuiseurs solaires boîtes sont essentiellement due aux de basses températures utilisées et par conséquent une cuisson lente et parfois non achevée suite aux passages nuageux. Les cuiseurs de type boîte; même avec des réflecteurs additionnels, possèdent un facteur de concentration très petit.

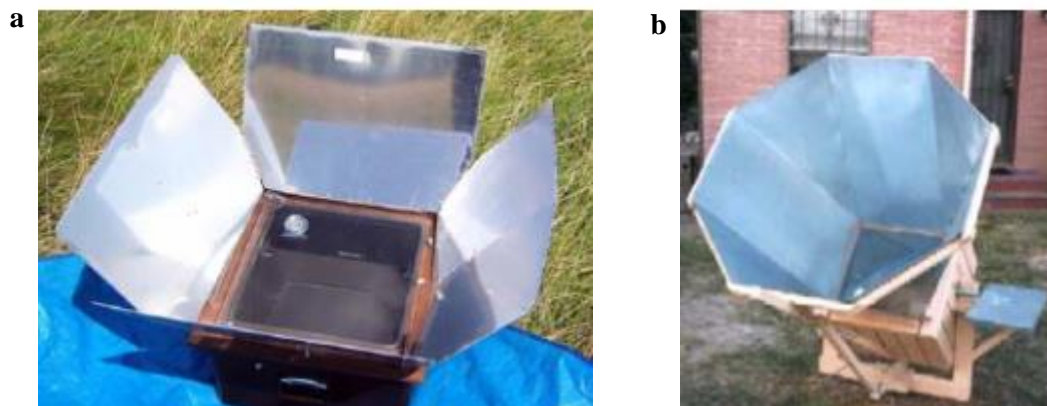


Fig 1.17: Cuiseurs solaires boîtes avec réflecteurs additionnels: (a) quatre; (b) et huit réflecteurs.

Pour les cuiseurs solaires de type concentrateurs, le récipient de cuisson est placé au point focal des miroirs concentrateurs, les cuiseurs concentrateurs sont souvent munis d'un système de poursuite solaire à un ou deux axes. Pour atteindre de plus hautes températures, ces cuiseurs utilisent des miroirs ou des lames de Fresnel, ils ont de ce fait un facteur de concentration élevé ce qui convient parfaitement à la cuisson. Parmi ces cuiseurs on trouve les cuiseurs concentrant la lumière par-dessus et les cuiseurs concentrant la lumière par-dessous [39].

Dans le premier type (Fig 1.18a et Fig 1.18b), la lumière est concentrée depuis le haut du récipient et ce mode de concentration d'énergie n'est pas très souhaitable pour faire cuire. Pour le deuxième type (Fig 1.19a, Fig 1.19b et Fig 1.19c), la lumière est concentrée au dessous du pot et ce mode est le plus commode pour la cuisson.

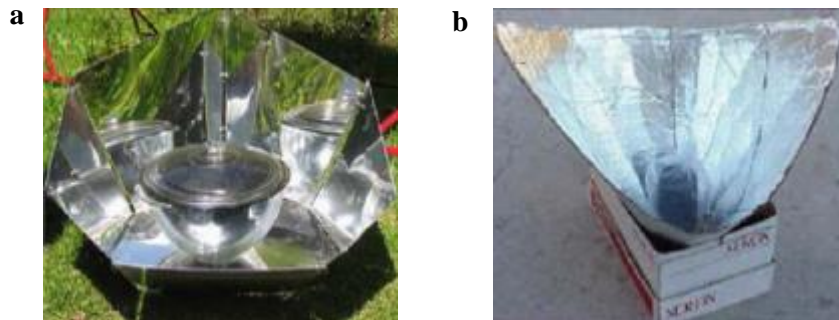


Fig 1.18: Cuisseurs solaires concentrant la lumière par-dessus: **(a)** cuisseur à panneaux; **(b)** cuisseur à entonnoir.



Fig 1.19: Cuisseurs solaires concentrant la lumière par-dessous: **(a)** cuisseur sphérique; **(b)** cuisseur à miroirs de Fresnel; **(c)** cuisseur parabolique.

Les avantages de ce type de cuisseur concernent les hautes températures de cuisson, la possibilité de cuire n'importe quel type de nourriture en un temps réduit. Les inconvénients sont dus à leur taille, leur coût, le risque des feux et de brûlures et essentiellement le besoin d'un ajustement fréquent du dispositif à fin de suivre le soleil en permanence.

b. Cuisson indirecte

Dans les cuisseurs solaires de type indirect, le récipient de cuisson est physiquement dissocié du collecteur et un support d'énergie est nécessaire pour transférer la chaleur du collecteur au récipient. Les cuisseurs solaires avec des capteurs plans vitrés, des capteurs à tubes sous vides et des capteurs à concentration sont les plus connus sous cette catégorie [39].

Les cuisseurs solaires avec capteurs plans vitrés (Fig 1.20) sont généralement munis de deux pots de cuisson avec possibilité d'incorporer le cuisseur à la construction de la cuisine, de l'huile de tournesol est utilisée comme support de transfert thermique. Les avantages de ce type de cuisseur sont les récipients volumineux, la rapidité de cuisson et la cuisson à l'intérieur de la maison. Les inconvénients

des cuiseurs utilisant des capteurs plans conventionnels sont la détérioration des performances dus au cycle réversible durant la nuit et les périodes nuageuses de la journée ainsi que la capacité de chaleur élevée, les inconvénients supplémentaires sont les pots inamovibles qui font que leur nettoyage soit difficile.



Fig 1.20: Cuiseur solaire indirect avec capteurs plans vitrés.

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

Les cuiseurs solaires avec capteurs à concentration utilisent souvent de grands concentrateurs paraboliques ou sphériques pour la génération de la vapeur nécessaire à la cuisson, ces concentrateurs sont généralement montés sur le toit et orientés vers le Sud. Le rayonnement solaire capté par les concentrateurs se concentre sur une chaudière cylindrique où la vapeur est produite pour faire cuire des repas à grande échelle. Les inconvénients de ce dernier type sont liés à leur taille et leur coût.

1.3.4.2. Les cuiseurs solaires avec stockage (stockage de chaleur sensible et latente)

Le besoin au stockage thermique intervient lorsqu'il y a une non équivalence entre la demande en énergie et la consommation énergétique. Les cuiseurs solaires doivent contenir un matériau de stockage de chaleur pour stocker l'énergie à fin de résoudre le problème de la cuisson en dehors des locaux et l'impossibilité de cuire la nourriture pendant les moments nuageux de la journée et durant la nuit. L'énergie thermique peut être stockée sous forme de changement d'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente ou thermochimique et parfois sous forme de la combinaison de ces modes [39].

a. Stockage de chaleur sensible

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

De l'huile à moteur est utilisée comme support de stockage généralement dans des cuiseurs boîtes (Fig 1.21a), où; pendant la journée, la température de stagnation maximale à l'intérieur du cuiseur avec le matériau de stockage est identique à la température à l'intérieur du cuiseur sans stockage mais elle est supérieure de plus d'une vingtaine de degrés la fin de l'après midi jusqu'à minuit. L'autre support de stockage thermique possible est le sable. En effet, le sable a été utilisé comme moyen de stockage pour cuire à l'intérieur des locaux, 6 heures de cuisson à l'extérieur ont été enregistrées et approximativement 3 heures par jour à l'intérieur ont été réalisées.

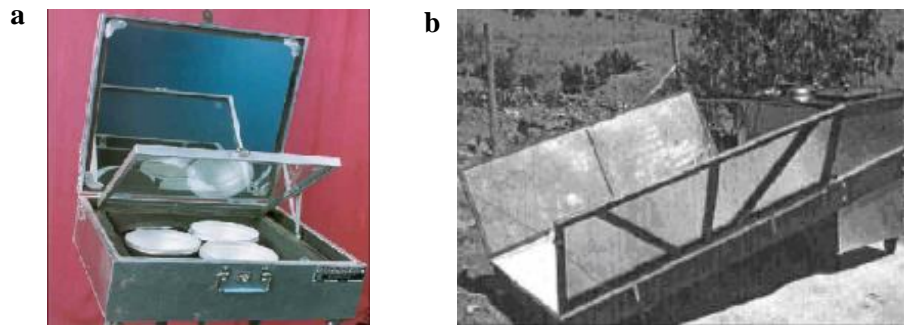


Fig 1.21: Cuiseurs solaires à stockage de chaleur sensible avec support de stockage: (a) l'huile à moteur; (b) l'huile végétale.

De l'huile végétale est aussi utilisée comme support de stockage, généralement en association avec des capteurs plans et une cuve de stockage thermique (Fig 1.21b), où l'huile végétale est utilisée comme fluide de transfert thermique, elle est chauffée au niveau du collecteur et conduite par la suite soit vers le récipient de cuisson soit vers l'unité de stockage à l'aide d'un système de régulation bien adapté. L'avantage de ce type de stockage est de garder la nourriture chaude le plus longtemps possible.

Les limitations principales des matériaux à stockage de chaleur sensible sont la capacité basse de chaleur spécifique et la diminution de l'efficacité de cuisson quand la température du matériau de stockage diminue pendant la décharge [39].

b. Stockage de chaleur latente

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

ciseurs solaires intégrés avec des PCM en tant que support de stockage thermique qui ont été développés et testés à travers le monde [39].

On a utilisé d'abord des PCM tel que l'acide stéarique (point de fusion 55 °C, chaleur latente de fusion 161 kJ/kg) et l'hexahydrate de nitrate de magnésium (température de fusion 89 °C) intégrés au-dessous des récipients de cuissons boîtes (Fig 1.22), l'inconvénient de ce type de conception est que le transfert thermique à partir du matériau au récipient pendant le mode de décharge est lent et plus de temps est nécessaire pour la cuisson en soirée, ce mode de stockage dépend non seulement de l'irradiation solaire et de la quantité de nourriture à cuire mais aussi des propriétés thermophysiques du PCM.

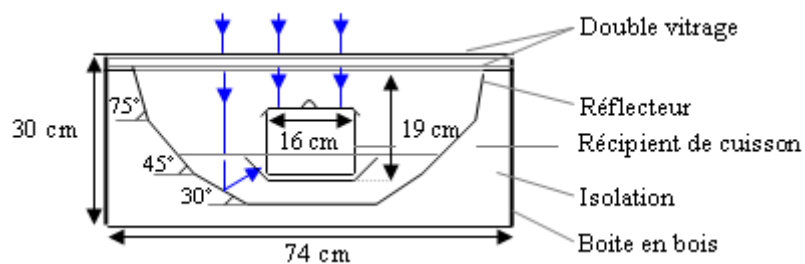


Fig 1.22: Schéma d'un ciseur solaire à stockage de chaleur latente de type boîte avec PCM intégré en mode indirect [39].

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

Et pour faciliter la cuisson pendant la nuit à l'intérieur de la maison, un ciseur solaire de type boîte avec stockage d'énergie a été développé, le ciseur contenait un simple capteur plan et des miroirs pour réorienter les rayons solaires vers le récipient de cuisson, le PCM choisi été de l'hydrate de sel $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$. Un ciseur du type indirect (Fig 1.23a), a été développé, ce ciseur est composé d'un capteur plan exposé à l'extérieur et d'un récipient de cuisson avec un PCM à l'intérieur du local, le PCM a été de l'hexahydrate de nitrate de magnésium (température de fusion 89 °C, chaleur latente de fusion 134 kJ/kg) intégré à l'unité de cuisson. Des tests ont été effectués sans charge et avec différentes charges à divers moments de la journée, les résultats indiquent que ce ciseur peut être utilisé avec succès pour cuire différents types de repas à midi, l'après-midi et pendant la soirée, il peut être également utilisé pour conserver les repas à chaud pour la matinée.

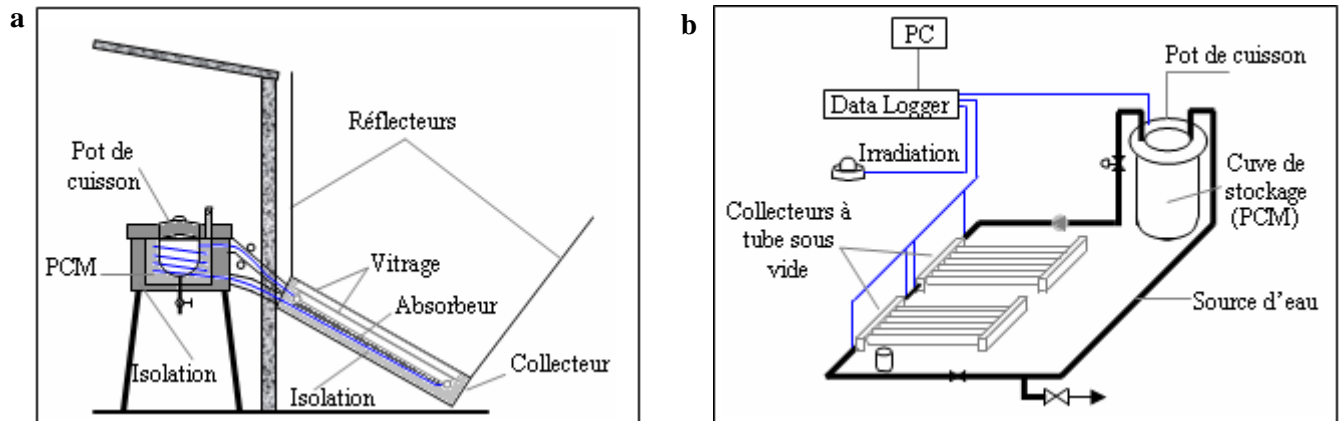


Fig 1.23: Schéma de cuiseurs solaires à stockage de chaleur latente avec PCM intégré en mode indirect utilisant: **(a)** des capteurs plans; **(b)** des capteurs sous vides [39].

Un autre cuiseur solaire indirect (Fig 1.23b), a été développé avec des capteurs à tube sous vides, le PCM utilisé est du erythritol (température de fusion 118 °C, chaleur latente de fusion 339.8 kJ/kg), où une pompe fait circuler un fluide caloporteur des capteurs vers l'unité de cuisson (entourée du PCM) à travers un échangeur de chaleur sous une boucle fermée, l'énergie stockée dans le PCM est utilisée pour faire cuire la nourriture durant nuit.

La température maximale du PCM en stockage de chaleur pour la cuisson solaire reportée dans la littérature est seulement de 120 °C ce qui n'est pas approprié pour faire frire et à faire cuire rapidement. Néanmoins quand le PCM est utilisé comme matériau de stockage dans la cuisson solaire, le mode indirect de chauffage est le plus approprié [39].

1.3.4.3. Nouvelle classification des cuiseurs solaires

Récemment; en 2014, Yettou el al. [40] ont publié une nouvelle classification des cuiseurs solaires, dans laquelle ces derniers sont répartis en trois grandes catégories selon le type de collecteur et de l'ordre de températures: les cuiseurs de type boîte, les cuiseurs de type concentrateur et les cuiseurs de type à foyer non-focal. Dans ces trois catégories principales sont inclus les cuiseurs avec modes de transfert de chaleur direct et indirect, cuiseurs avec ou sans stockage de chaleur et cuiseurs avec ou sans mécanisme de poursuite solaire intégré. Les cuiseurs solaires de type direct utilisent l'éclairage solaire d'une manière directe durant la cuisson, les cuiseurs indirects ont besoin d'un fluide caloporteur pour transférer la chaleur du collecteur à l'unité de cuisson. L'option 'stockage d'énergie' doit être associé à ces cuiseurs afin de permettre la cuisson en fin de soirée ou la nuit et remédier aux limites des cuiseurs solaires durant les moments nuageux ou l'insuffisance d'ensoleillement. Quelques fois, ces cuiseurs sont équipés d'un système de poursuite solaire à un seul ou deux axes.

1.3.5. L'étude, la conception et le développement des cuiseurs solaires à travers le monde

1.3.5.1. Les cuiseurs solaires de type boîte

a. Cuiseurs boîtes sans et avec réflecteurs

Beaucoup de travaux ont été effectués ces dernières décennies pour étudier et déterminer les performances thermiques des cuiseurs solaires de type boîte sans et avec réflecteurs, notamment en Inde [41-43], en Asie [44, 45], en Europe [46] et en Afrique [47, 48]. Kumar [49] a développé une corrélation pour le coefficient de pertes de chaleur d'un cuiseur solaire boîte qui a comme charge de l'eau, il a également présenté une analyse thermique pour évaluer le coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle du cuiseur [50]. Purohit et al. [41] ont construit et évalué un prototype de cuiseur solaire avec 4 réflecteurs et 2 récipients de cuisson, la conception du cuiseur est optimisée pour les zones intertropicales. Les tests ont montré que le prototype, qui a besoin de seulement 4 simples mouvements tout au long de l'année, convient parfaitement pour faire cuire les repas principaux de base.

En 2001, Nahar [5] a conçu, fabriqué (Fig 1.24a et Fig 1.24b), testé et comparé les performances d'un cuiseur solaire boîte à double réflecteurs avec un matériau isolant transparent avec celle d'un cuiseur boîte possédant un seul réflecteur sans matériau isolant. Mohamad et al. [51] ont conçu un simple cuiseur solaire boîte en bois avec un seul réflecteur, ils ont aussi fabriqué plusieurs unités de démonstration qui ont montrées des performances acceptables concernant les essais effectués sur terrain.

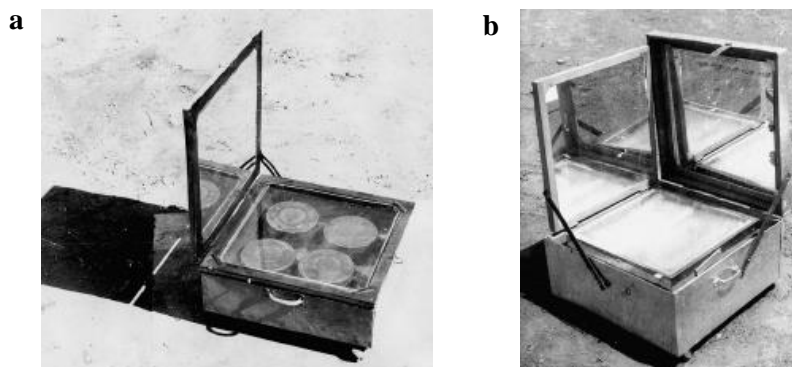


Fig 1.24: Cuiseurs solaires boîte fabriqué et testé par Nahar. [5]: (a) avec un seul réflecteur; (b) avec deux réflecteurs.

Negi et Purohit ont réalisé des tests sur les performances thermiques d'un cuiseur solaire type boîte (Fig 1.25a), utilisant des réflecteurs à concentration sans poursuite solaire. Ils ont montré que le cuiseur peut donner une meilleure collecte de la chaleur d'où une cuisson plus efficace [52]. Amer a présenté et largement étudié les performances d'un nouveau modèle de cuiseur solaire (Fig 1.25b), où

l'absorbeur est exposé au rayonnement solaire par le haut et par la face inférieure, un ensemble de réflecteurs sont utilisés pour diriger le rayonnement sur la face inférieure de la plaque absorbante [7].

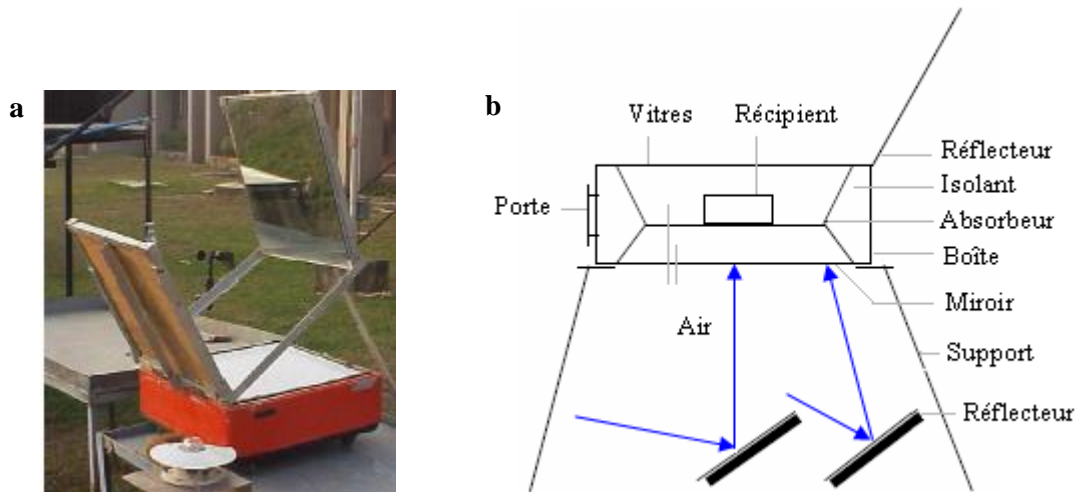


Fig 1.25: Schéma du cuiseur boîte avec réflecteurs: **(a)** exposés par la face supérieure testé par Negi et al. [52]; **(b)** exposés par la face inférieure étudié par Amer [7].

b. Cuiseurs boîtes à usage multiple

Kumar et al. ont conçu et fabriqué un cuiseur-séchoir solaire de type pyramide tronquée (Fig 1.26a), qui satisfait les normes prescrites par le Bureau des Standards de l'Inde concernant les cuiseurs solaires de type boîte, la géométrie tronquée de la pyramide concentre la lumière vers le bas du cuiseur, ils ont également recommandé quelques modifications pour obtenir de plus hautes températures et des temps de cuisson réduits [53]. Le groupe de travail ont ensuite conçu, fabriqué et testé un dispositif de type pyramide tronquée (Fig 1.26b), qui pourrait être utilisé pour la cuisine domestique aussi bien que pour le chauffage de l'eau. Une analyse économique simple illustre que ce genre de conception pourrait être financièrement viable et physiquement utile [54].

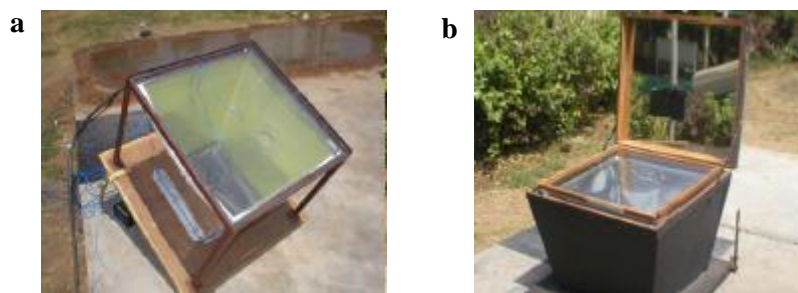


Fig 1.26: **(a)** Cuiseur séchoir- pyramide, **(b)** cuiseur chauffe-eau, réalisé par Kumar et al. [53, 54].

c. Cuiseurs boîtes et récipients de cuisson

Des études et des tests ont également été réalisés ces dernières années concernant le rôle du récipient à l'intérieur du cuiseur, la chaleur doit pénétrer dans le récipient et faire cuire la nourriture d'une manière uniforme. En 1999, Gaur et al. ont fait une étude des performances d'un cuiseur solaire boîte avec une modification de la forme des couvercles des ustensiles utilisés, ils ont conclu que les

performances peuvent être améliorées si un ustensile avec une forme concave de couvercle est utilisé au lieu d'un couvercle ordinaire [55]. Rao et Subramanyam ont étudié l'utilité de soulever le récipient sur des crochets, ce qui engendrera au bas du récipient une surface de transfert thermique et permettra d'atteindre plus rapidement des températures de saturation pour la cuisson [56], ils ont également testé un récipient (Fig 1.27), mis sur une cavité annulaire centrale et ils ont conclu que cette nouvelle configuration permet de diminuer le temps de cuisson [57]. En 2007, Reddy et Rao traitent avec une étude théorique et expérimentale détaillée l'amélioration des performances obtenues par un récipient de cuisson avec une cavité cylindrique centrale par rapport à un récipient cylindrique classique [58]. Par la suite ils ont comparé les performances d'un récipient de cuisson muni un couvercle enfoncé avec celles d'un récipient de cuisson conventionnel et ils ont constaté que l'amélioration moyenne des performances du nouveau récipient est de 8.4 % meilleure que le récipient conventionnel [59].

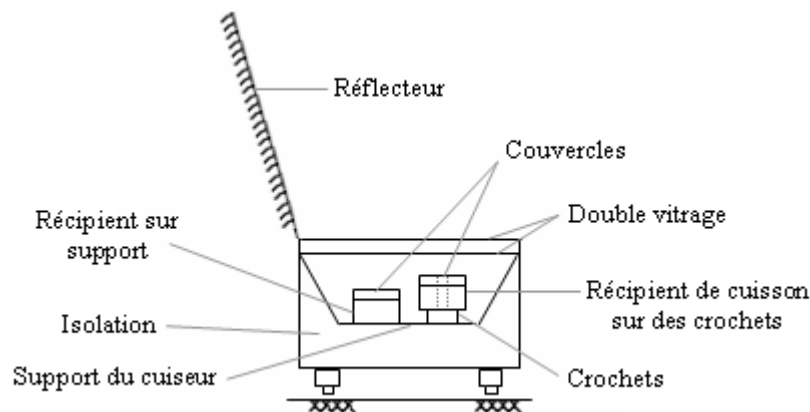


Fig 1.27: Schéma du cuiseur boîte avec un récipient mis sur support testé par Rao et al. [57].

e. Cuiseurs boîtes en Algérie

En Algérie, Un simple prototype de cuiseur solaire de type boîte (Fig 1.28), a été réalisé et testé expérimentalement par Harmim et al. En 2007, des tests ont été effectués à l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar, les températures atteintes sont très satisfaisantes pour une cuisson alimentaire saine, le rendement énergétique du cuiseur varie entre 25 % et 55 % [60].



Fig 1.28: Cuisson solaire boîte réalisée et testée à l'URER/MS par Harmim et al. [60].

Par la suite, le groupe de travail ont construit un cuiseur solaire à double exposition muni d'un réflecteur parabolique (Fig 1.29a), avec de simples moyens et des matériaux disponibles localement, le cuiseur est doté de trois réflecteurs plans sur la partie supérieure du boîtier pour augmenter l'irradiation solaire incidente sur la plaque chauffante et améliorer les performances du système [61]. Le prototype arrive à atteindre des températures favorables pour une cuisson saine de différents produits et plats alimentaires [62]. En 2008, Harmim et al. ont examiné un récipient de cuisson avec ailettes (Fig 1.29b), afin d'accroître l'efficacité des cuiseurs solaires boîtes et de réduire le temps de cuisson [11]. Récemment; en 2010, Harmim et al. ont établi un code de calcul numérique simulant le fonctionnement d'un simple cuiseur solaire boîte [63], ce code a été utilisé pour étudier l'effet de la plaque absorbante à ailettes sur les performances du cuiseur. Les résultats démontrent que la température de stagnation de l'air intérieur du cuiseur équipé d'une plaque absorbante à ailettes est supérieure à celle du cuiseur solaire équipé d'une plaque absorbante ordinaire [8]. Récemment; en 2012, Harmim et al. ont conçu et construit un nouveau type de cuiseur solaire boîte équipé d'un concentrateur parabolique composé asymétrique, utilisé comme miroir réflecteur [64, 65].

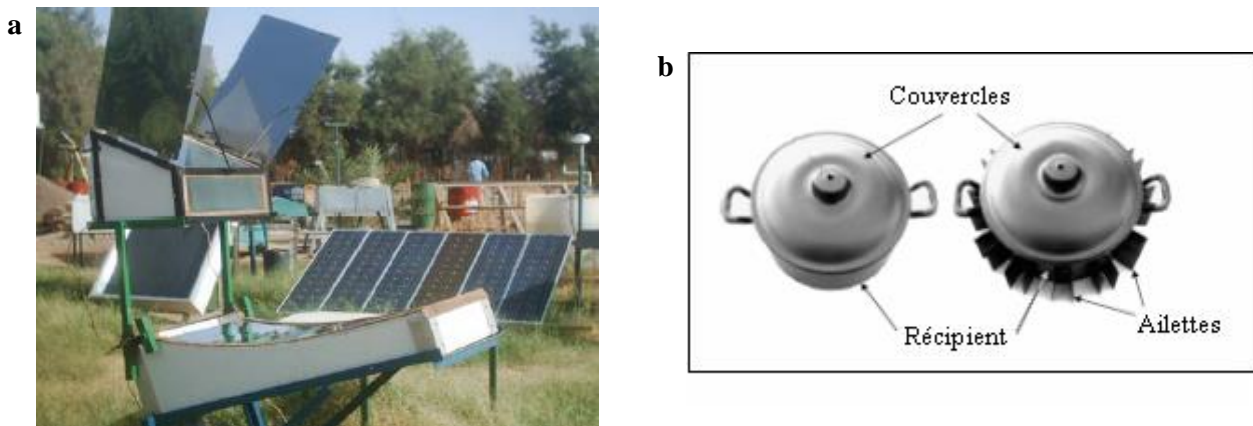


Fig 1.29: Cuiseur boîte réalisé et examiné par Harmim et al. [61, 62, 11]: (a) avec un réflecteur parabolique; (b) le récipient de cuisson avec ailettes.

1.3.5.2. Les cuiseurs solaires à concentration

a. Cuiseurs à concentration de type cylindro-parabolique

Richard Petela a présenté une analyse théorique de l'exergie d'un cuiseur solaire cylindro-parabolique (Fig 1.30a), ainsi que la distribution des pertes exégétiques dans le cuiseur et l'analyse exégétique de la surface exposée au rayonnement solaire qui absorbe le flux radiatif des différentes températures [66]. En 2004, Ozturk a appliqué les normes internationales pour tester les performances d'un cuiseur solaire et les a exploité à la détermination expérimentale des rendements de l'énergie et de l'exergie d'un cuiseur solaire cylindro-parabolique (Fig 1.30b), il a calculé les variations du temps de ces rendements sur la base d'une formule appliquée et des données de mesure [67]. Un autre modèle

des cuiseurs concentrateurs est le cuiseur à foyer conique comme celui conçu et testé par Sharaf, qui est un cuiseur économique et à haut rendement [68].

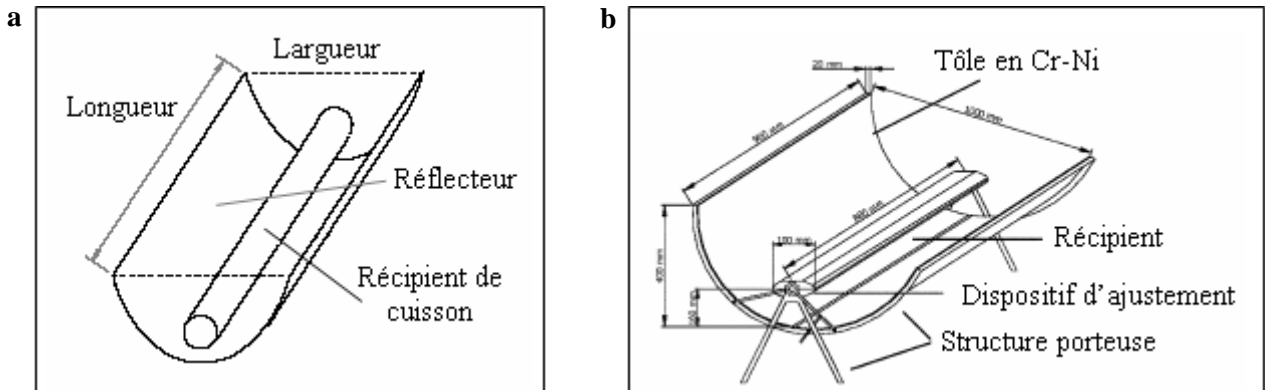


Fig 1.30: (a) Cuiseur cylindro-parabolique étudié par Richard Petela [66],
(b) schéma du cuiseur cylindro-parabolique testé par Ozturk [67].

b. Cuiseurs à concentration de type parabolique

En 2003, Sonune et Philip ont conçu et développé un cuiseur solaire domestique à concentration de type Fresnel (Fig 1.31a), qui fournit une température adéquate nécessaire pour la cuisson et la friture [69]. En 2004, Franco et al. ont apporté quelques modifications à un cuiseur solaire composé de deux unités séparées: un concentrateur parabolique d'un côté et une boîte isolée contenant le récipient d'un autre coté (Fig 1.31b), le but étant d'améliorer sa capacité de travail et ceci en utilisant trois différents types d'absorbants optimisés [70].

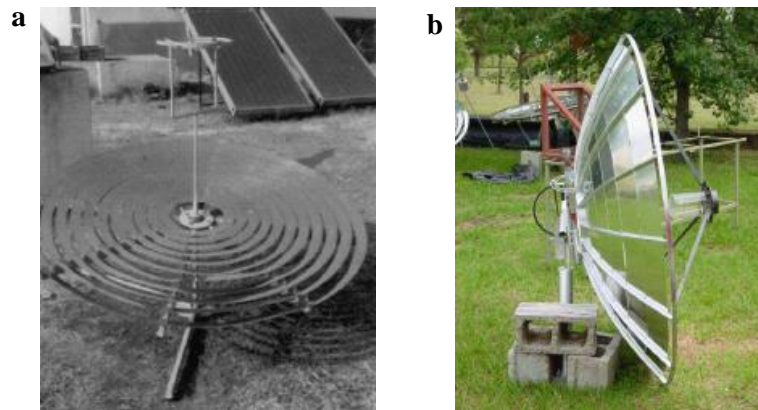


Fig 1.31: (a) Cuiseur parabolique avec des miroirs de Fresnel réalisé par Sonune et Philip [69],
(b) cuiseur parabolique composé et réalisé par Franco et al. [70].

En 2007, Arenas décrit la conception, la fabrication et le test d'un nouveau cuiseur solaire portable (Fig 1.32a), avec un grand réflecteur parabolique pliable. Les résultats obtenus avec ce prototype montrent que le cuiseur solaire atteint une puissance moyenne de 175 W, avec une efficacité énergétique de 26.6 %. Cette puissance fournit une énergie suffisante pour faire cuire un repas simple pour deux personnes en un temps de 2 heures [71]. Un cuiseur solaire parabolique (Fig 1.32b), est réalisé en 2009 par Grupp et al., le cuiseur contient un dispositif qui enregistre les données de la

température ambiante, la température de cuisson et l'irradiance solaire. L'évaluation des données mesurées donne comme résultat le nombre de cycles et le temps de cuisson et la quantité de nourriture ainsi que l'impact sur la consommation de carburant fossile et l'émission des GEF comparée à d'autres techniques de cuisson [72].



Fig 1.32: (a) Cuiseur parapluie réalisé par José M. Arenas [71],
(b) cuiseur parabolique réalisé par Grupp et al. [72].

1.3.5.3. Les cuiseurs suiveurs du soleil

En 2010, Un cuiseur solaire cylindro-parabolique avec système de poursuite solaire automatique (Fig 1.33), a été conçu, construit et testé par Al-Soud et al., un contrôleur programmable a été employé pour contrôler le mouvement du cuiseur solaire. Les résultats de l'essai ont prouvé que la température de l'eau à l'intérieur de la cuve du cuiseur a atteint 90 °C en jours typiques d'été, quand la température ambiante enregistre un maximum de 36 °C [73].

En 2011, l'effet d'un système de poursuite solaire à deux axes sur un cuiseur parabolique (Fig 1.34), a été étudié par Abu-Malouh et al. Le concentrateur parabolique a été construit pour concentrer le rayonnement solaire sur un récipient fixé au sommet du foyer, le cuiseur suit le soleil à l'aide du système de poursuite à deux axes, ce dernier est réalisé et ensuite testé. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la température à l'intérieur du récipient avait atteint les 93 °C quand la température ambiante est de 32 °C, la température obtenue convient parfaitement pour faire cuire différents plats [74].

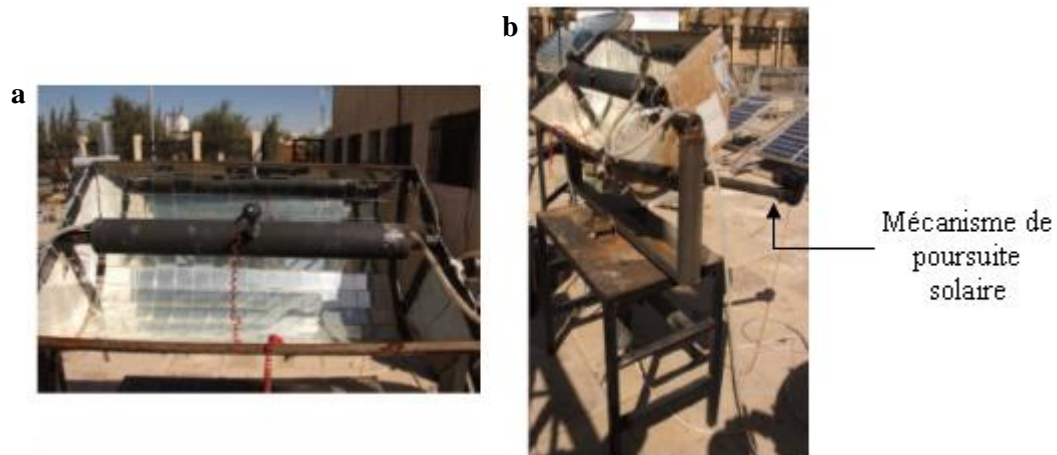


Fig 1.33: (a) Cuisson cylindro-parabolique; (b) système de poursuite solaire, réalisés par Al-Soud et al. [73].

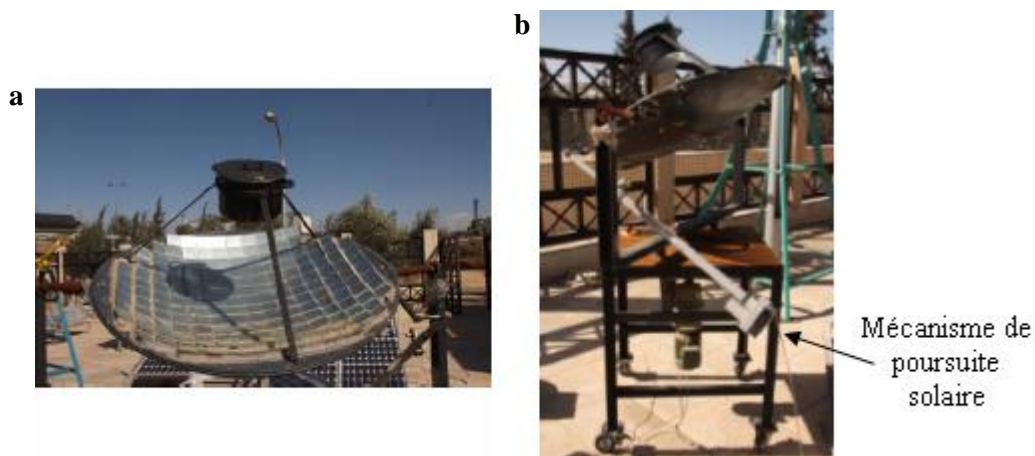


Fig 1.34: (a) Cuisson parabolique; (b) système de poursuite solaire (b), réalisés par Abu-Malouh et al. [74].

1.3.5.4. Les cuiseurs stockeurs d'énergie

a. Les cuiseurs solaires boîtes

Nahar a conçu, fabriqué et testé un cuisson solaire de type boîte avec l'utilisation d'une huile à moteur comme matériau de stockage de sorte que la cuisson peut être effectuée en fin de soirée [75]. Sharma et al. ont conçu et fabriqué une unité de stockage de chaleur latente de forme cylindrique (Fig 1.35), pour le récipient de cuisson d'un cuisson solaire pour stocker l'énergie solaire pendant la journée qui peut être utilisée pour cuire lors de la soirée [76]. En 2003, Buddhi et al. ont étudié une unité de stockage de la chaleur latente de type cylindrique pour le pot d'un cuisson solaire avec trois réflecteurs semblable à celle fabriqué par Sharma et al. à l'exception des dimensions et de la quantité du PCM utilisé, cette unité servait pour stocker l'énergie solaire durant les heures les moins ensoleillées de la journée et de cuire les aliments le soir en hiver [77].

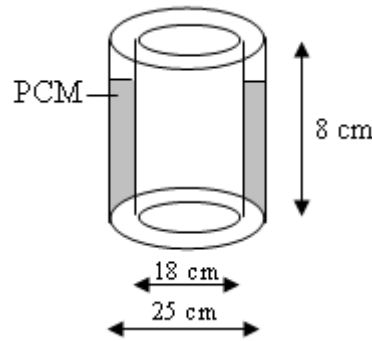


Fig 1.35: Schéma de l'unité de stockage de chaleur latente de forme cylindrique du cuiseur boîte avec PCM fabriqué par Sharma et al. [76].

b. Les cuiseurs solaires à concentration

En 2008, Mawire et al. ont étudié un cuiseur solaire fonctionnant en mode indirect utilisant un concentrateur parabolique et muni d'une cuve de stockage thermique (Fig 1.36a). Les équations du bilan énergétique sont employées pour modéliser le système de réception d'énergie solaire et le système thermique de stockage d'énergie du cuiseur considéré [78]. En 2010, le groupe de travail ont proposé un modèle pour le système thermique d'utilisation d'énergie du cuiseur parabolique. Les résultats de simulation ont été validés expérimentalement et un accord entre résultats est obtenu [79].

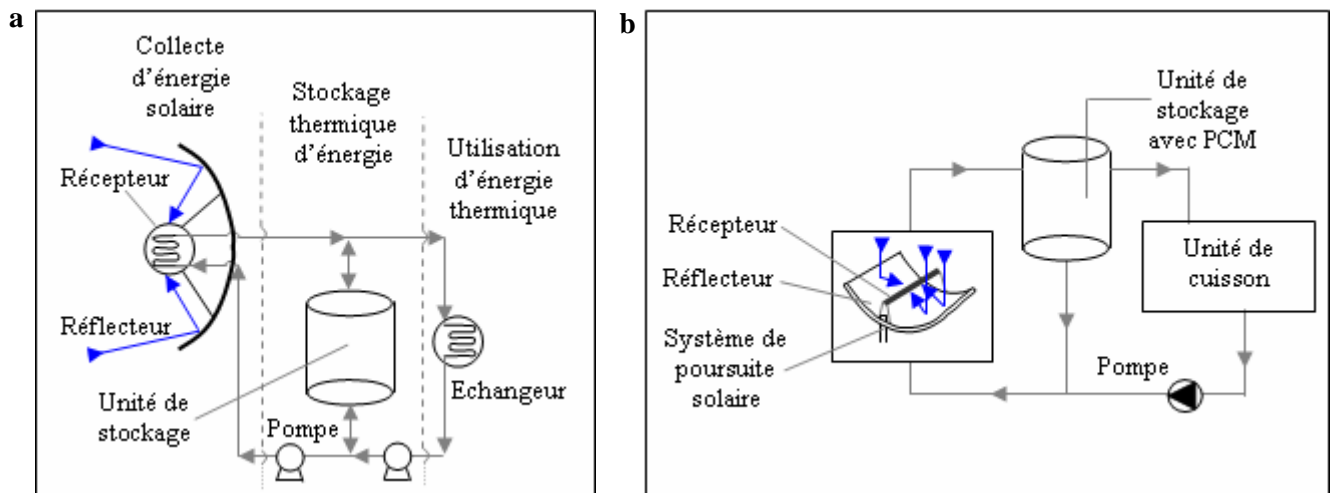


Fig 1.36: (a) Schéma du cuiseur solaire parabolique indirect étudié par Mawire et al. [78], (b) Schéma du cuiseur solaire cylindro-parabolique indirect étudié par Muthusivagami et al. [80].

En 2010, Muthusivagami et al. ont proposé d'étudier un système de cuisson solaire fonctionnant en mode indirect basé sur un capteur cylindro-parabolique à concentration d'énergie et muni d'une cuve de stockage thermique intégrée avec un PCM, et une unité de cuisson qui peut être installée à l'intérieur du local (Fig 1.36b). Un fluide caloporteur est utilisé pour transférer la chaleur du capteur à l'unité de cuisson. Le PCM est utilisé pour emmagasiner l'énergie collectée pendant la journée et la restaurer au moment du besoin. L'unité de cuisson est équipée d'une plaque chauffante au dessous de

laquelle circule de l'huile chaude pour maintenir la température dans un intervalle convenable à la cuisson [80].

c. Les cuiseurs solaires indirects

En 2004, Esen a démontré la faisabilité d'utiliser des réfrigérants dans un système de cuisson solaire (Fig 1.37a), qui se compose d'un collecteur solaire à tubes sous vide avec un long caloduc intégré conduisant directement à la plaque du cuiseur, pour faire cuire et / ou pour conserver les aliments chaud en fin de soirée [81]. En 2005, Sharma et al. ont enquêté sur les performances thermiques d'un prototype pour cuiseur solaire basé sur un capteur à tubes sous vide avec une unité de stockage muni d'un matériau à changement de phase (MCP) (Fig 1.37b) [82].

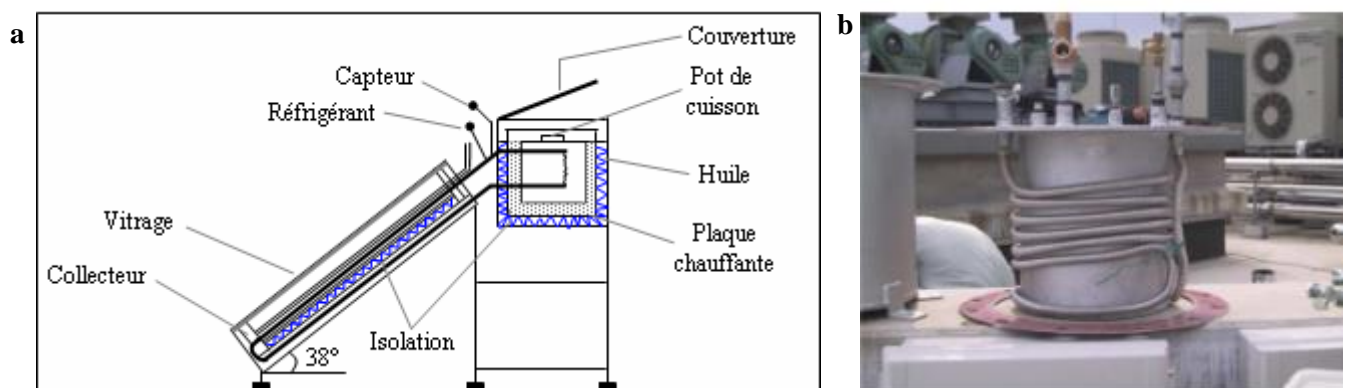


Fig 1.37: (a) Schéma du cuiseur solaire indirect contenant des réfrigérants étudié par Esen [81], (b) unité de stockage de chaleur latente avec PCM réalisé par Sharma et al. [82].

En 2008, Hussein et al. ont conçu, construit et testé un nouveau cuiseur solaire indirect avec section extérieure elliptique en plein air, caloducs minces, capteur plan solaire et un MCP intégré pour stockage thermique en plein air et une unité de cuisson sous des conditions météorologiques réelles de Gizeh, en Égypte [83].

1.3.5.5. Evaluation énergétique et exergétique des cuiseurs solaires

Plusieurs études théoriques et expérimentales ont été réalisées en matière d'évaluation des rendements énergétiques et exergétiques des cuiseurs solaires durant ces dernières années à travers le monde. Panwar et al. [84] ont évalué expérimentalement le rendement énergétique et exergétique d'un cuiseur solaire destiné à la cuisson de nourriture pour animaux. Le cuiseur est fabriqué à l'aide du ciment, des briques, des couvercles de verre et une plaque d'absorbeur en acier doux. Un schéma et une vue du cuiseur réalisé sont présentés sur la figure (1.38). L'énergie de sortie de ce cuiseur est comprise entre 1.89 et 49.4 kJ, alors que l'exergie de sortie est entre 0.11 et 2.72 kJ durant le même intervalle de temps. Le rendement énergétique de l'appareil de cuisson varie entre 1.12 et 29.78 %, tandis que le rendement exergétique varie entre 0.07 et 1.52 % durant cette période de test.

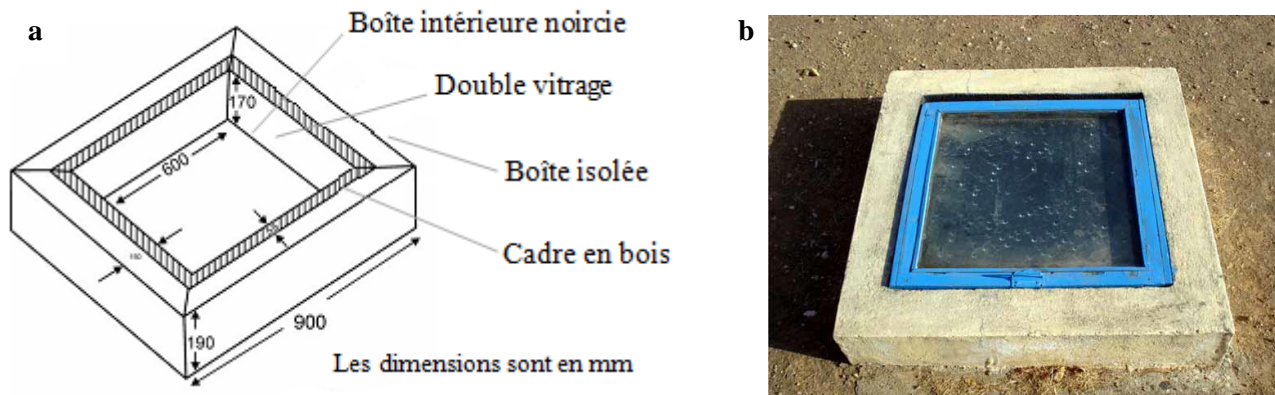


Fig 1.38: Cuiseur solaire destiné à la cuisson de nourriture pour animaux proposé et réalisé par Panwar et al. [84]: (a) dimensions; (b) vue de côté du cuiseur.

A la fin de l'année 2009, Shukla [85] a comparé les rendements énergétiques et exergétiques d'un cuiseur parabolique à usage domestique et d'un autre à usage collectif. Selon les résultats des tests, il a observé que l'énergie de sortie du cuiseur collectif varie entre 2.73 et 43.3 W et elle est comprise entre 7.77 et 33.4 W pour le cuiseur domestique. L'exergie de sortie du cuiseur collectif est de l'ordre de 1.92 à 2.58 W, alors que pour le cuiseur domestique, elle varie de 0.65 à 1.45 W. Le rendement énergétique du cuiseur parabolique collectif varie entre 8.3 et 10.5 % et pour le cuiseur parabolique domestique, il varie de 7.1 à 14.0 %.

Au début de l'année 2011, Pandey et al. [86] ont présenté une étude expérimentale comparative entre un cuiseur solaire de type boîte et un cuiseur de type parabolique basée sur l'analyse exergétique. Les expériences ont été réalisées avec les cuiseurs remplis de différentes quantités d'eau et de riz. Il a été constaté d'après les résultats que le rendement exergétique des cuiseurs est proportionnel au volume de l'eau utilisée. Ils ont également constaté que l'efficacité exergétique des cuiseurs varie avec la nature des aliments à cuire. Cependant, le rendement exergétique du cuiseur parabolique est toujours supérieur à celui du cuiseur boîte.

1.3.6. Contribution des cuiseurs solaires à la réduction du dioxyde de carbone

De nombreuses études scientifiques révèlent que le taux de CO₂ dans l'atmosphère à augmenter de 31 % au cours des 200 dernières années [87]. 20 Gt de dioxyde de carbone sont rejetés à l'environnement depuis 1800, seulement à cause de la déforestation engendrant la concentration du gaz de méthane dans l'atmosphère, responsable de l'épaississement de la couche d'ozone. Panwar et al. [88], ont indiqué dans leur article de synthèse, que; sur la période 1971-1995, les émissions de CO₂ ont augmenté à un taux moyen de 1.7 % par an. Les scénarios prévoient un taux de croissance plus rapide des émissions de CO₂ jusqu'à 2.2 % par an, pour la période allant jusqu'à 2020.

En 1996, Nandwani [89] a mené une étude sur les avantages écologiques des cuiseurs solaires au Costa Rica et dans le monde entier, en comparant les avantages et les limites de cuiseurs solaires avec les cuiseurs conventionnels en bois et les cuiseurs électriques. Il a trouvé comme résultat, que le temps de retour est d'un cuiseur de type boîte; en considérant un usage du dispositif de 6-8 mois par an, est d'environ 12-14 mois. Environ 16.8 millions de tonnes de bois peuvent être épargnés chaque année et l'émission de 38.4 millions de tonnes par an de CO₂ dans l'atmosphère peut être empêchée avec l'utilisation des cuiseurs solaires.

Par ailleurs, des études ont été menées par Nahar durant plusieurs années [90-92] sur différents modèles de cuiseurs solaires dans les conditions climatiques de l'Inde avec une évaluation du potentiel d'émission de CO₂. Il a été estimé que le temps de retour varie entre 1.28 et 4.82 ans suivant le vecteur énergétique (combustible de cuisson) à remplacer. Pour les différents cuiseurs expérimentés, l'énergie économisée est estimée à 5175 MJ par an.

Les ressources énergétiques renouvelables joueront un rôle important dans l'avenir de la planète [88], le développement de systèmes à cuisson solaire permettra de répondre aux besoins en matière d'énergie de cuisson et de résoudre certains problèmes liés aux cuissons traditionnelles, notamment dans les pays en développement.

1.3.7. Les fours solaires

1.3.7.1. L'héliodyne de Bouzaréah [27]

Le four solaire de Bouzaréah (Fig 1.39), baptisé "Héliodyne", se situe dans l'enceinte de l'Observatoire d'Alger, sur le site actuel du Centre de Développement des Energies Renouvelables. Cette réalisation prestigieuse de plus de 40 tonnes et dont la hauteur atteint près de 9 mètres, a été étudiée et construite par la Société des Anciens Etablissements Sautter-Harle (1952-1954) pour répondre à des caractéristiques remarquables qui lui ont valu le titre du plus puissant four solaire au monde. En effet, l'Héliodyne de Bouzaréah se distingue par :

- Un miroir parabolöide de 8.4 m de diamètre, monté sur charpente treillis en aluminium AG-5, avec tendeurs de précontraintes afin de réduire au maximum les déformations soit au cours des mouvements, soit sous l'effet d'un vent pouvant souffler à 200 km/h.
- Il dispose également d'une distance focale de 3.14 m, monture équatoriale. La concentration dans le plan focal dépasse les 21000 soleils, ce qui donne la plus forte concentration de rayons ultraviolets obtenue jusqu'alors dans le monde. Le facteur de réflexion d'un tel miroir est de l'ordre de 0.8, à peu près dans tout le spectre.

- Les miroirs élémentaires, au nombre de 144, sont disposés suivant leur concavité et leur dimension en forme de coupole renversée, chaque élément étant monté sur des rotules permettant un réglage fin et tout l'ensemble guidé par des cellules avec la précision d'un télescope. Ce dispositif permet d'obtenir une image solaire d'une dizaine de centimètres. Et ainsi, pour une surface de la parabole de 50 m², on arrivait à des températures de plusieurs milliers de degrés.

Mais, le plus remarquable dans ce four c'est sans doute la précision du mécanisme de poursuite du soleil: 400 millièmes, soit une erreur de 4 m pour un observateur placé à 100 km. Les réducteurs d'entraînement pouvaient être soumis à des couples énormes dus aux coups de vent (soit 10000 m/kg) sans que cette précision en souffre.

Le mouvement d'orientation de l'appareil n'était pas commandé, comme cela se fait d'habitude par cellules photoélectriques (ou photorésistances), mais par l'horloge de l'observatoire elle-même. L'Héliodyne se comportait, en somme, comme une horloge fille dont l'horloge mère était celle qui donnait l'heure astronomique: l'intérêt d'un tel dispositif était de rendre la régulation indépendante de la nébulosité.

Pour terminer, si on sait que sa puissance théorique utilisable à 3000 °k dépasse les 32 kW, on comprend pourquoi l'Héliodyne de Bouzaréah est considéré comme le premier four solaire au monde de cette importance.

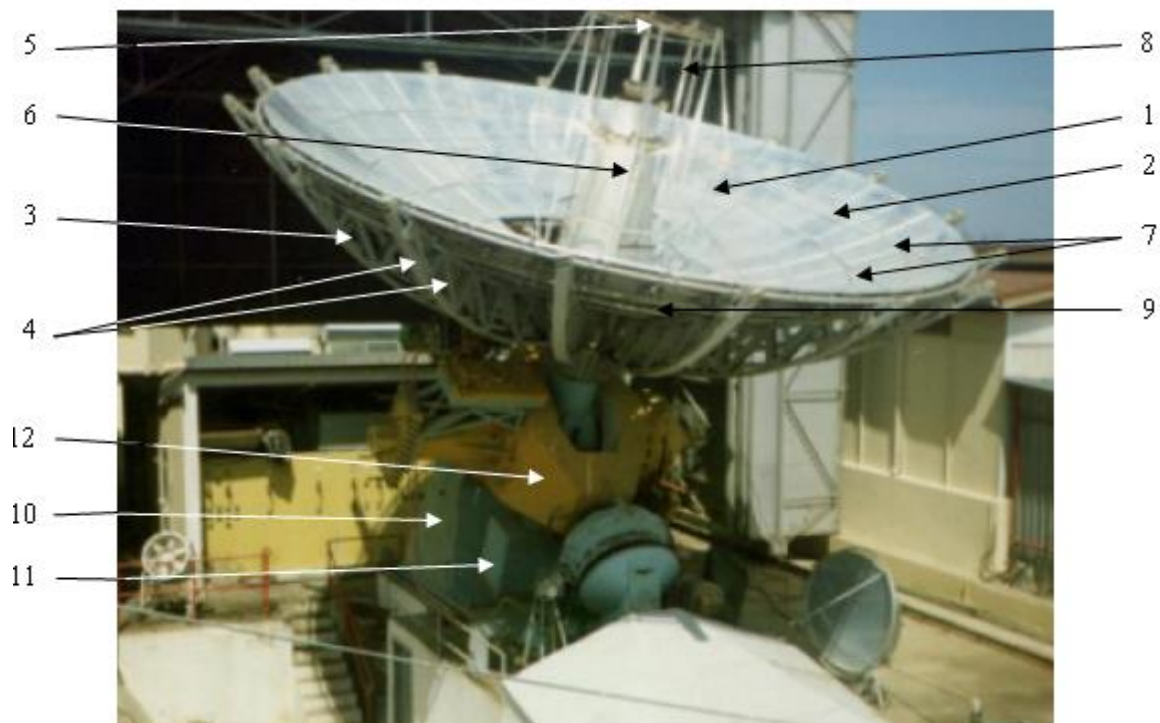


Fig 1.39: Héliodyne: premier four solaire mondial 1950 - CDER bouzaréah, Algérie [27].

- 1- La surface réfléchissante du miroir solaire
- 2- Les panneaux du miroir
- 3- La structure étoilée de la charpente du miroir solaire
- 4- Les fermes curvilignes constituant la structure étoilée de la charpente
- 5- La tache focale solaire
- 6- Le mât conique
- 7- Les haubans de précontrainte
- 8- L'occulteur
- 9- Les pannes tubulaires support des éléments du miroir solaire
- 10- Le pilier sud de l'Héliodyne
- 11- Le réducteur de poids du miroir
- 12- L'axe du monde (axe horaire).

1. 3.7.2. L'éliodyssée d'Odeillo [93]

Le chimiste français Félix Trombe et son équipe ont réalisé à l'observatoire de Meudon en 1946 une première expérience à l'aide d'un miroir de DCA pour montrer la possibilité d'atteindre de hautes températures très rapidement et dans un environnement très pur, grâce à la lumière du soleil fortement concentrée. L'objectif était de faire fondre du minerai et d'en extraire des matériaux très purs pour confectionner de nouveaux matériaux réfractaires plus performants.

Pour concrétiser cette filière et en tester les diverses possibilités, un premier four solaire fut construit à Mont-Louis en 1949 (Fig 1.40). Quelques années après, sur le modèle du four de Mont-Louis et au vu des résultats obtenus, un four solaire de taille quasi industrielle fut construit à Odeillo (Fig 1.41). Les travaux de la construction du Grand Four Solaire d'Odeillo durèrent de 1962 à 1968 pour une mise en service en 1970.

Le four solaire se trouve à Odeillo dans les Pyrénées Orientales en France (latitude: 42° 29' 48" Nord, longitude: 2° 1' 49" Est, altitude: 1500 m). Cette situation géographique permet des conditions climatiques très favorables pour ce type d'installation. Le nombre d'heures d'ensoleillement est de 3000 h/an, son hygrométrie est très basse et le flux solaire direct varie entre 800 W/m² et 1050 W/m² dans le meilleur des cas.

Le principe utilisé est celui de la concentration des rayons par des miroirs réfléchissants. Les rayons solaires sont captés par une première série de miroirs orientables situés sur la pente, puis envoyés vers une deuxième série de miroirs 'les concentrateurs', disposés en parabole. De là ils convergent vers une cible circulaire au sommet d'une tour centrale; cette cible a à peine 40 cm de diamètre. Cela revient à concentrer l'énergie de 10 000 soleils.



Fig 1.40: Four solaire de Mont-Louis 1949, France.

Le réflecteur parabolique permet d'obtenir au foyer un flux maximum de l'ordre de 1000 W/cm^2 . Les opérations sont menées dans la zone focale, à 18 m devant la parabole. La gamme de température va de 800 °C à 2500 °C (la température maximale pouvant être atteinte est de 3800 °C) pour une puissance maximale de 1000 kW thermiques. Ce four permet d'obtenir de brusques changements de température, et donc d'étudier l'effet des chocs thermiques.

Un champ de 63 héliostats plans installés sur 8 terrasses éclaire le grand miroir parabolique. Chaque héliostat est piloté de sorte que le faisceau réfléchi reste parallèle à l'axe horizontal Nord-Sud du paraboloïde de révolution.



Fig 1.41: Héliodyssée: four solaire d'Odeillo 1970, CNRS-PROMES, France [93].

1.4. PROBLEMATIQUE: Limites des cuiseurs solaires

La cuisson solaire permet de cuire les aliments grâce à l'énergie du soleil. Pour fonctionner correctement un cuiseur solaire a besoin d'être placé à l'extérieur, dans un endroit bien ensoleillé, et protégé des vents violents [2]. Cependant, le fonctionnement des cuiseurs solaires est indépendant de la température extérieure [38]. Les cuiseurs solaires complètent donc les méthodes de cuisson traditionnelles, qui doivent être utilisées la nuit ou par mauvais temps [2].

Les deux principaux modèles utilisés en pratique sont: le cuiseur boîte et le cuiseur parabolique.

- Le cuiseur boîte permet d'atteindre des températures élevées mais ne dépassant pas les 150 °C, cela est généralement suffisant pour de nombreuses cuissons. Le temps de cuisson est deux fois plus long qu'une cuisinière classique. Ainsi la cuisson en ce type de cuiseur convient pour toutes les préparations qui nécessitent une cuisson lente et longue à feu doux [38].

- Les cuiseurs paraboliques peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 250 °C), ce qui permet la cuisson de tous les plats, avec un temps plus rapide que les cuiseurs boîte (la cuisson se déroule presque aussi vite qu'avec un moyen de cuisson traditionnel). Mais à ces températures élevées, la nourriture peut brûler, c'est pourquoi il faut régulièrement vérifier et remuer le contenu du récipient [35]. La température de ce type de cuiseur est donc peu contrôlable, ce qui ne facilite pas la cuisson.

Pour obtenir un rendement optimum, les paraboles doivent être régulièrement réorientées en fonction du soleil (environ tous les quarts d'heure). Leur maniement peut provoquer des brûlures cutanées ou des affections de la rétine des yeux [35]. Autrement dit, les cuiseurs paraboliques nécessitent un ajustement plus fréquent et donc des précautions plus nombreuses concernant la sécurité.

Les cuiseurs paraboliques à réglage automatique sont typiquement appliqués pour des collectivités (écoles et hôpitaux) à cause de leurs prix élevés liés au mécanisme sophistiqué de poursuite solaire qu'ils utilisent [37].

Ce travail consiste à la conception et la réalisation d'un système de cuisson solaire basé sur l'utilisation des réflecteurs à concentration d'énergie, permettant de résoudre quelques problèmes liés à la cuisson solaire cités précédemment. Le cuiseur sera expérimenté et divers tests seront réalisés à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa. Une évaluation des performances thermiques du cuiseur sera analysée et comparée à celles d'un cuiseur ordinaire (à surface réceptrice horizontale), également réalisé. La faisabilité de cuisson solaire sur l'ensemble du territoire national, sera traitée par des cartes représentatives et fera aussi l'objet de cette thèse.

1.5. CONCLUSION

Dans ce premier 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.

Cependant, les cuiseurs boîtes ne permettent pas d'exercer toute sorte de cuisson voulue et le temps de cuisson est beaucoup plus long que les systèmes classiques. Les cuiseurs paraboliques permettent la cuisson de tous les plats désirés, avec un temps plus rapide que les cuiseurs boîtes, mais pour obtenir un rendement optimum, les paraboles nécessitent un ajustement plus fréquent (dispositifs de poursuite solaire), ce qui n'est pas évident pour des raisons techniques et économiques. Ce travail vient donc résoudre quelques problèmes liés à la cuisson solaire par la conception et la réalisation d'un système de cuisson adapté à cet effet.

L'éclairement solaire est l'élément de base dans la conversion d'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 pyranomètre et pyrhéliomètre que nous avons présenté dans ce chapitre, une étude détaillée sur la modélisation de l'éclairement solaire sera présentée dans second chapitre. Le deuxième chapitre fera également l'objet de la présentation et de la conception du système de cuisson proposé (cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée). Une simulation optique de la répartition des rayons solaires concentrés au niveau de l'absorbeur d'un cuiseur boîte ordinaire et du cuiseur à surface inclinée sera réalisée, des réflecteurs additionnels sont ajoutés aux cuiseurs pour connaître leur effet sur le comportement optique de l'éclairement solaire reçu. En tenant compte des résultats obtenus de la simulation optique, un premier prototype de cuiseur boîte sera développé et réalisé dans la région du Sud de l'Algérie à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa.

CHAPITRE 2

ETUDE THEORIQUE ET REALISATION EXPERIMENTALE D'UN CUISEUR SOLAIRE BOITE

2.1. INTRODUCTION

L'évaluation à long terme des performances thermiques des systèmes énergétiques solaires nécessite la connaissance d'une part des paramètres météorologiques et d'autre part les différentes composantes de l'éclairement solaire. Sur le réseau de mesures national, caractérisé par une faible densité de stations radiométriques, la collecte des différentes données météorologiques et radiométriques est rare [94]. A cet effet nous avons jugé nécessaire d'appliquer un modèle théorique pour l'estimation des deux composantes directes et diffuses de l'éclairement solaire. Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature par des scientifiques et relatifs à de nombreux sites dans le monde [95]. Ainsi, pour notre travail, nous avons retenu le modèle r.sun [15] applicable par jour clair. Dans ce modèle, basé sur la détermination du facteur de trouble de Linke, ont été proposées des relations empiriques permettant d'estimer les différents coefficients de transmission de l'éclairement solaire, ainsi que les relations menant au calcul des différentes composantes de l'éclairement solaire.

En se basant sur l'étude bibliographique et la problématique détaillée présentée dans le chapitre précédent, nous nous intéresserons essentiellement dans ce deuxième chapitre à la partie pratique du travail. Nous commencerons par une conception mécanique du cuiseur à réaliser à l'aide du logiciel SolidWorks [13] puis, une simulation optique de l'énergie solaire incidente sur l'absorbeur du cuiseur boîte en utilisant le logiciel TracePro7.0 [14]. Les diverses configurations de l'ajout des réflecteurs associés au cuiseur seront également étudiées à travers des simulations optiques interprétées afin de définir un design de conception optimisé. Ensuite nous avons procédé à la partie expérimentation, où nous décrirons la réalisation du cuiseur solaire avec ses réflecteurs additionnels ainsi que les différents matériaux utilisés. Nous aborderons aussi la réalisation d'un second cuiseur boîte ordinaire (à surface réceptrice horizontale), qui nous servira pour comparaison entre les deux cuiseurs du point de vue optique et thermique.

2.2. MODELISATION DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE INCIDENT SUR UN PLAN PAR CIEL CLAIR

2.2.1. Modélisation du facteur de trouble de Linke par ciel clair

L'éclairement solaire est atténué en traversant l'atmosphère terrestre par la diffusion des aérosols, les nuages et l'absorption par les différents composants atmosphériques, tel que: l'ozone, la vapeur d'eau, l'oxygène...etc., il est connu qu'en jour clair les aérosols sont la principale cause de l'extinction de l'irradiation solaire. A la fin du XX^{ème} siècle, la plupart des scientifiques et chercheurs ont prouvé que les activités humaines jouent un rôle très important dans l'augmentation des aérosols [96, 97]. La quantité des aérosols dans l'atmosphère peut être représentée par les coefficients de troubles, la détermination des troubles atmosphérique à une grande importance dans la modélisation de l'éclairement solaire utilisé dans le dimensionnement et l'évaluation des performances des systèmes énergétiques solaires. En effet la plupart des modèles de calcul de l'éclairement solaire font appel à la détermination de ces facteurs tels que le facteur de Linke T_L [98].

Une détermination du facteur de trouble de Linke à partir de l'éclairement direct est possible en utilisant le modèle de Kasten (1996) [99] par exemple (voir Equation 2.1), par contre la détermination de l'éclairement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant de l'éclairement [100], le plus couramment utilisé est le modèle de Dogniaux décrit par l'équation 2.2 ci-après. La plus part des modèles existants nécessitent la connaissance d'un grand nombre de données relatives au site (température ambiante, humidité relative, coefficient d'Angstrom, quantité de la vapeur d'eau, quantité d'ozone...etc.). Malheureusement; dans la plus part des cas, ces données ne sont pas toutes disponibles. L'équation 2.3 ci-après peut être utilisée pour déduire le facteur da Linke à partir du coefficient d'Angstrom B_A dans le cas du site de Ghardaïa. A titre indicatif, on représente sur la figure (2.1a) les résultats obtenus pour le calcul du facteur de Linke par trois différentes méthodes sur le site de Ghardaïa.

$$T_L = \frac{1}{(m_A \cdot \delta_R)} \cdot \ln\left(\frac{I_0 \cdot \varepsilon}{IN}\right) \quad (2.1)$$

$$T_L = \left[\frac{\gamma_s + 85}{39.5 \cdot \exp(-W_v) + 47.4} + 0.1 \right] + (16 + 0.22 \cdot W_v) \cdot B_A \quad (2.2)$$

$$B_A = -0.112 + (0.063 \cdot T_L) \quad (2.3)$$

Beaucoup de travaux ont été effectués ces dernières décennies pour déterminer expérimentalement le facteur de trouble de Linke notamment en Amérique du Nord [101, 102] et en Europe [103-105]. Par contre peu de travaux ont été enregistrés pour l'Afrique (Maroc [106], Tunisie

[107, 108] et Egypte [109, 110]), et plus particulièrement pour l'Algérie, aucune vraie étude n'a été faite dans ce domaine exceptée la table publiée en 2003 pour le site de Tamanrasset [111, 112], ceci est dû probablement à la non disponibilité des données de l'éclairement solaire sur la majorité du territoire national, et même si sur certains sites ces données existent et on peut les collecter, l'erreur reste inévitable à cause du vieillissement des appareils de mesures. La figure (2.2b) est une représentation des résultats obtenus pour le calcul du facteur de Linke à partir des données expérimentales durant une année pour le site de Ghardaïa [113, 114].

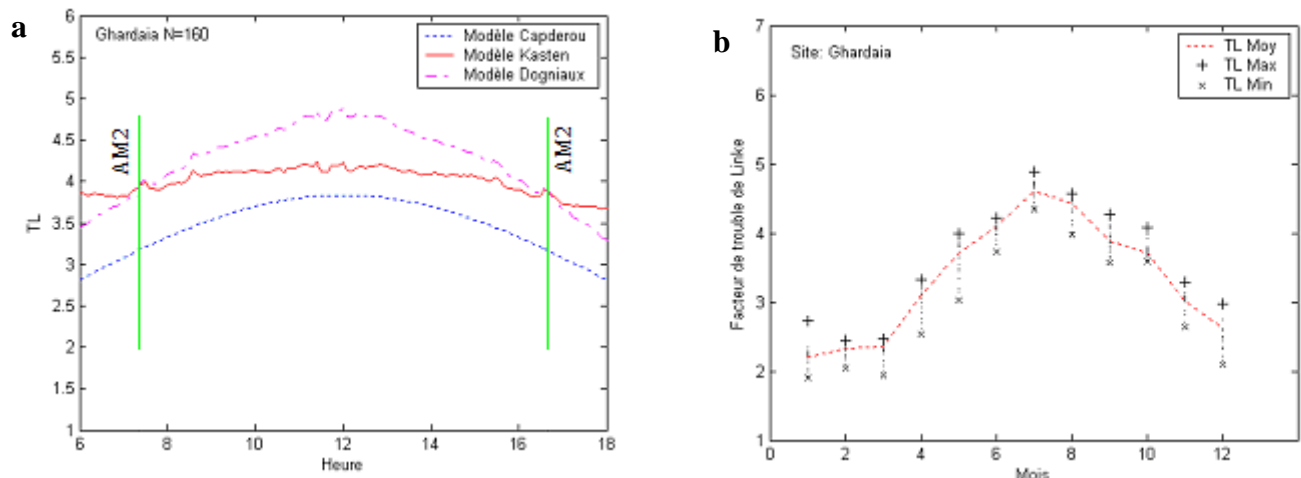


Fig 2.1: Résultats obtenus pour le calcul du facteur de Linke: **(a)** par trois différentes méthodes; **(b)** à partir des données expérimentales sur le site de Ghardaïa.

Après une recherche bibliographique, nous avons constaté que des tables relatives au facteur de Linke T_L sont très abondantes sur le Web. Après une analyse approfondie de ces tables, nous avons choisi d'utiliser les données du projet SoDa [17] mis à disposition sur le site Web: <http://www.soda-is.com>. La méthode adoptée par ce projet fait appel à des données satellitaires d'une part et des données de mesures au sol d'autre part pour calculer le facteur de Linke. Ce site a été utilisé par le modèle de l'Atlas Solaire de l'Europe (ESRA) dans sa nouvelle édition (2nd édition) [115], les données de ce site ont été également adoptées par MeteoNorm dans sa dernière version (Version 6.0) [116]. Pour notre cas nous avons décidé d'établir; à partir de ce site, une base de donnée du facteur de trouble de Linke T_L pour chaque combinaison (Latitude, Longitude et Altitude) de l'Algérie.

2.2.2. Modélisation des paramètres géométriques et atmosphériques

2.2.2.1. Paramètres horaires

a. Angle horaire

L'angle horaire ω étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV [117], l'angle horaire s'exprime parfois en heures. Au midi solaire on a $\omega = 0$, ensuite chaque heure correspond à une variation de 15° ,

car la terre effectue un tour complet sur elle-même en 24 h. ω sera compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'Est et positivement le soir [118]. L'angle horaire est donné par l'équation suivante :

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (2.4)$$

b. Déclinaison solaire

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre [119], la déclinaison varie de $-23^{\circ}27'$ au Solstice d'hiver à $+23^{\circ}27'$ au Solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes [118]. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante :

$$\sin(\delta) = 0.3978 \cdot \sin\left[N_p - 1.4 + 0.0355 \cdot \sin(N_p - 0.0489)\right] \quad (2.5)$$

Avec : $N_p = 2\pi \cdot N / 365.25$ (2.6)

N est le jour Julian variant de 1 du 1 Janvier à 365 (366) du 31 Décembre. La variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année est décrite sur la figure (2.2) :

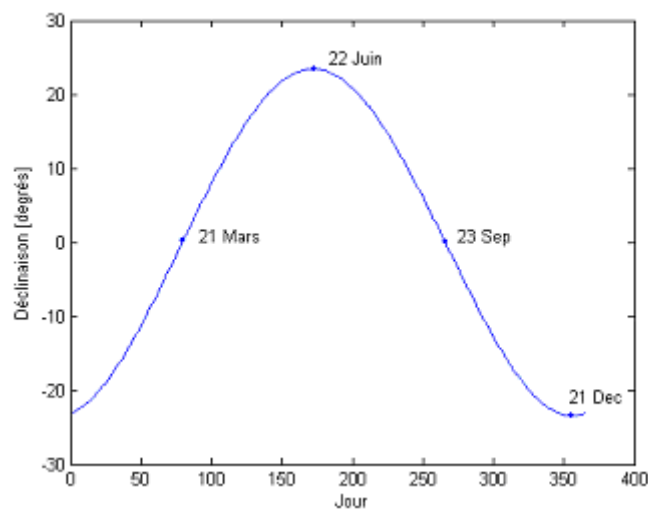


Fig 2.2: Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.

2.2.2.2. Paramètres de position

Dans les applications à énergies solaires, la connaissance des paramètres géométriques de la trajectoire du soleil est importante; vu à partir d'un point fixe de la terre (Figure 2.3), la position du soleil est déterminée en fonction de deux angles donnés en radian: l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu (hauteur angulaire γ_s) et l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil (azimut θ_{az}) [120]. Le complément de γ_s ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelée angle zénithal θ_z .

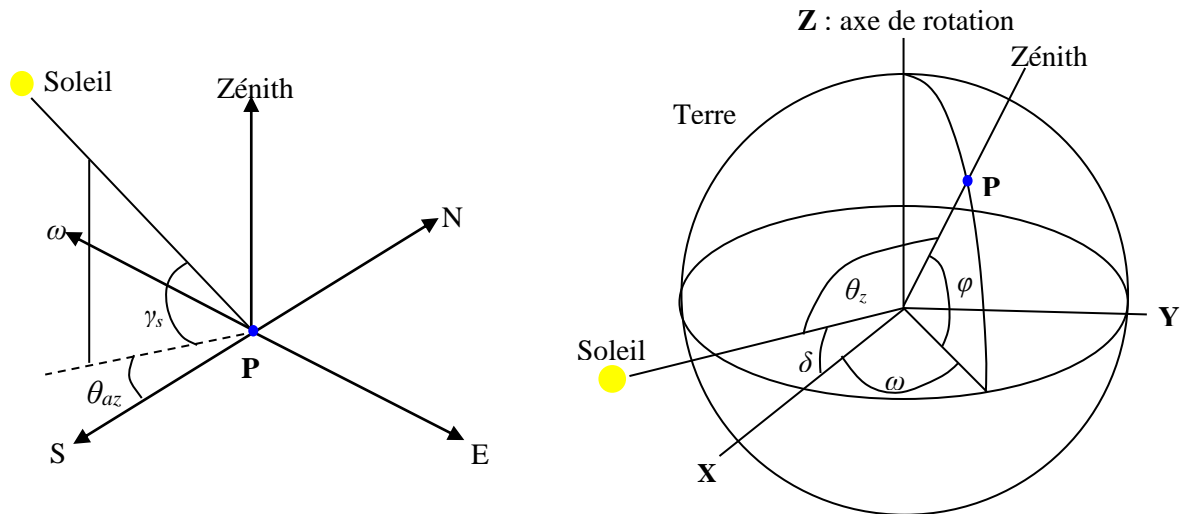


Fig 2.3: Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil).

a. Hauteur du soleil

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, quand $\gamma_s < 0$ c'est la nuit et quand $\gamma_s > 0$ c'est le jour sur terre, la hauteur du soleil varie entre $+90^\circ$ (zénith) et -90° (nadir). La hauteur du soleil est bien représentée par une formule bien connue :

$$\sin(\gamma_s) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \tag{2.7}$$

La figure (2.4) représente la variation de la hauteur γ_s à midi sur le site de Ghardaïa durant une année.

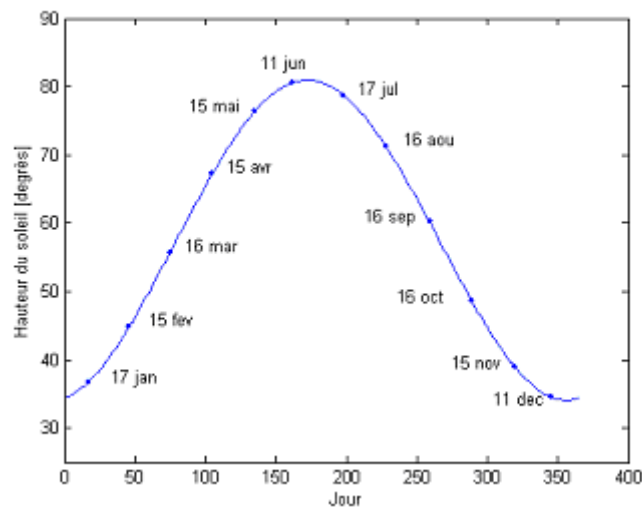


Fig 2.4: Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.

b. Azimut du soleil

L'azimut du soleil θ_{az} est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. L'azimut est compté positivement vers l'Ouest $\theta_{az} > 0$ et négativement

vers l'Est $\theta_{az} < 0$, à midi $\theta_{az} = 0$. L'azimut est compris entre $-180 \leq \theta_{az} \leq 180^\circ$ [118]. L'azimut du soleil est représenté en fonction de la déclinaison solaire δ , latitude du lieu φ , et de l'angle horaire ω de la manière suivante :

$$\text{Cos}(\theta_{az}) = \frac{\text{Sin}(\varphi) \cdot \text{Cos}(\delta) \cdot \text{Cos}(\omega) - \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Sin}(\delta)}{\left\{ [\text{Cos}(\delta) \cdot \text{Sin}(\omega)]^2 + [\text{Sin}(\varphi) \cdot \text{Cos}(\delta) \cdot \text{Cos}(\omega) - \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Sin}(\delta)]^2 \right\}^{0.5}} \quad (2.8)$$

La variation de l'azimut du soleil en fonction du temps pour les mois d'Avril, de Juillet et de Décembre sur le site de Ghardaïa est représentée sur la figure (2.5). Sur la figure (2.6) on représente la variation de la hauteur du soleil en fonction de l'azimut solaire :

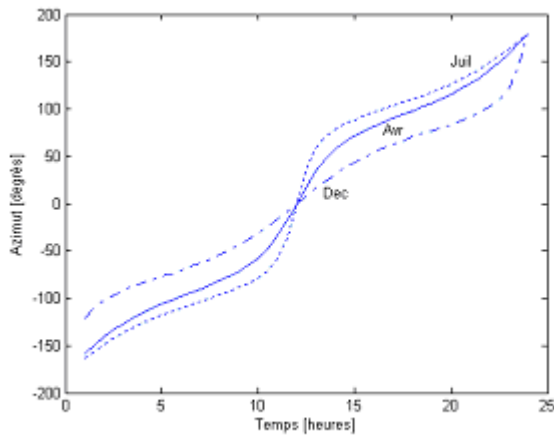


Fig 2.5: Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.

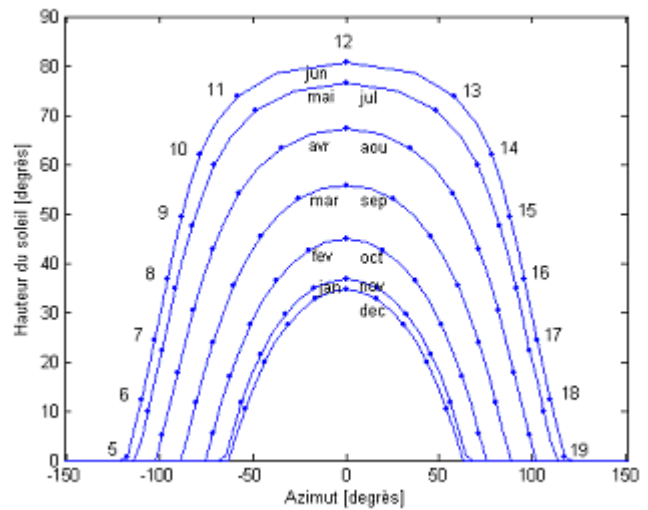


Fig 2.6: Variation de la hauteur du soleil en fonction de l'azimut solaire.

2.2.2.3. Paramètres de l'atmosphère

a. Masse atmosphérique (masse d'air optique)

On appelle masse d'air m_A la masse d'atmosphère traversée par l'éclairement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer [120]. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. La masse atmosphérique relative est donnée par la relation, très simple :

$$m_A = \frac{1}{\text{Sin}(\gamma_s)} \quad (2.9)$$

En 1989 Kasten et Young [121] donnent une expression pour m_A qui est devenue largement utilisée (équation 2.10). Le modèle r.sun utilise cette formule avec une légère correction de la hauteur du soleil.

$$m_A = \frac{p/p_0}{\text{Sin}(\gamma_s^{\text{cor}}) + 0.50572 \cdot (\gamma_s^{\text{cor}} + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (2.10)$$

$$\text{Avec : } p/p_0 = \exp(-z/8434.5) \quad (2.11)$$

$$\gamma_s^{\text{cor}} = \gamma_s + \Delta\gamma_s^{\text{cor}} \quad (2.12)$$

$$\Delta\gamma_s^{\text{cor}} = 0.061359 \cdot \frac{0.1594 + (1.1230 \cdot \gamma_s) + (0.065656 \cdot \gamma_s^2)}{1 + (28.9344 \cdot \gamma_s) + (277.3971 \cdot \gamma_s^2)} \quad (2.13)$$

La figure (2.7) représente la variation de la masse d'air atmosphérique en fonction de la hauteur du soleil, une comparaison de diverses formules calculant la masse d'air montre que ces formules ne diffèrent que pour les petites valeurs de la masse d'air.

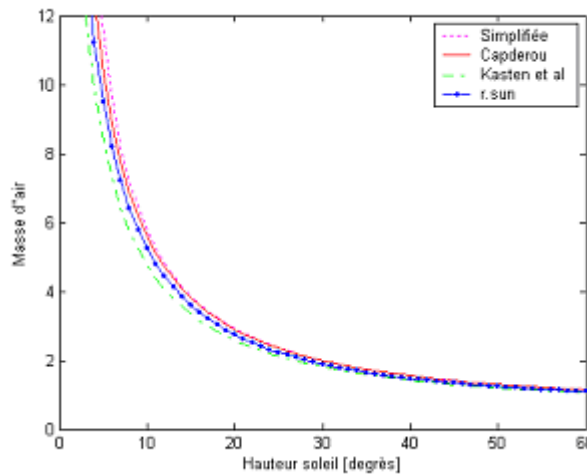


Fig 2.7: Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil.

b. Epaisseur optique de l'atmosphère (Epaisseur de Rayleigh)

En 1922, Linke [98] définit l'épaisseur optique de Rayleigh δ_R comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols. Kasten, en 1980 [122] utilisa les données spectrales publiées par Feussner et Dubois en 1930 [123] et proposa la formule (2.14) pour δ_R , connue sous le nom de formule pyrhéliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte.

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \cdot m_A) \quad (2.14)$$

Dans cette formule utilisée depuis fort longtemps, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que: CO_2 , O_2 , NO_2 et le CO n'est pas prise en compte. En 1986, Louche [124] ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4^{ème} ordre pour la masse d'air.

$$(\delta_R)^{-1} = 6.5567 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (2.15)$$

Louche démontra que la formule (2.15) conduit à des valeurs grandes par rapport à celles données par la formule d'origine de Kasten et plus particulièrement pour les petites valeurs de la masse d'air. Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour δ_R .

Le modèle r.sun a exploité la formule ajustée de Kasten pour une masse d'air inférieure à 20 et calcule δ_R avec l'expression ajustée de Page (1996) pour une masse d'air supérieure à 20, car une divergence de l'expression de δ_R ajustée par Kasten au-delà de $m_A > 20$ est remarquée.

- Si $m_A \leq 20$ $(\delta_R)^{-1} = 6.6296 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4)$ (2.16)

- Si $m_A > 20$ $(\delta_R)^{-1} = 10.4 + (0.718 \cdot m_A)$ (2.17)

La figure (2.8) représente la variation de l'épaisseur optique de Rayleigh δ_R en fonction de la masse d'air donnée par les formules: Kasten originale (2.14), Louche ajustée par Kasten (2.16) et r.sun (2.16) et (2.17) sur un même graphique. On peut noter que ces courbes, très voisines entre elles, diffèrent également pour les valeurs de m_A faibles ($m_A < 3$).

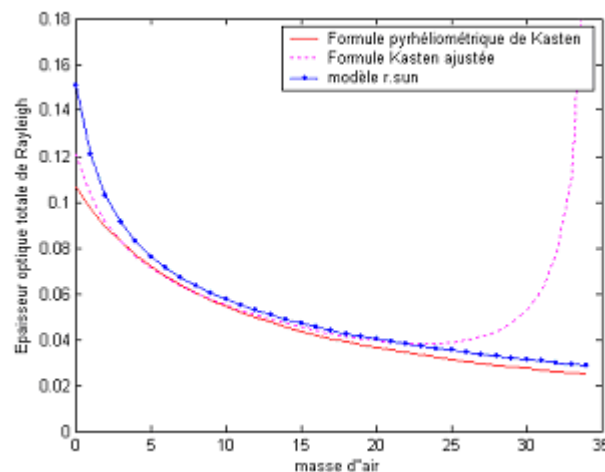


Fig 2.8: Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.

2.2.3. Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal

2.2.3.1. Eclairement hors atmosphère

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

l'éclairement incident. Dans le cas d'un plan horizontal situé en dehors de l'atmosphère, l'éclairement est décrit comme: éclairement solaire extraterrestre horizontal. (Fig 2.9).

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 (2.18) [15] et sa variation en fonction du jour de l'année est illustrée sur la figure (2.10).

$$G_0 = I_0 \cdot \varepsilon \quad (2.18)$$

ε : est la correction de distance terre soleil, elle est donnée par :

$$\varepsilon = 1 + 0.03344 \cdot \cos(N_p - 0.048869) \quad (2.19)$$

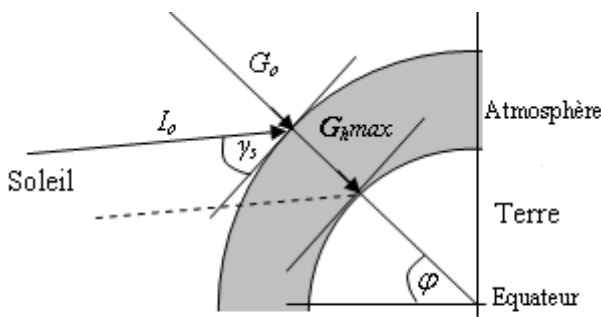


Fig 2.9: Eclairement solaire extraterrestre.

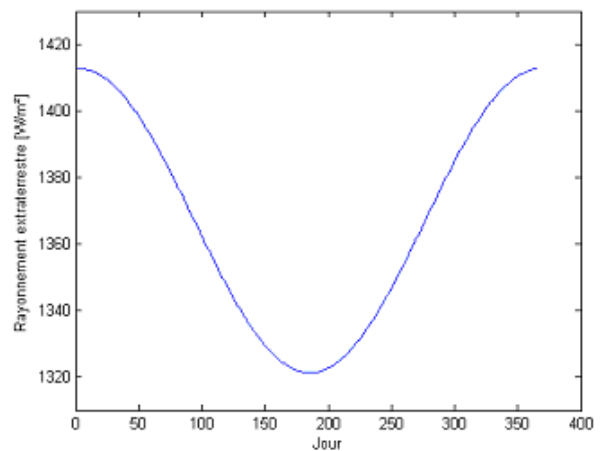


Fig 2.10: Variation de l'éclairement solaire extraterrestre en fonction du jour.

Utilisant le modèle r.sun [15], l'éclairement global incident sur un plan horizontal $IG^h(\gamma_s, T_L)$ par ciel clair; calculé en W/m^2 , est divisé en deux parties: l'éclairement direct $IB^h(\gamma_s, T_L)$ et l'éclairement diffus $ID^h(\gamma_s, T_L)$, chacun étant calculé séparément.

2.2.3.2. Eclairement direct incident sur un plan horizontal

L'éclairement direct est le flux solaire incident directement sur le plan considéré sous un angle représentant la hauteur solaire. Tel que modélisé par Hofierka et al. (2002), l'éclairement direct incident sur un plan horizontal $IB^h(\gamma_s, T_L)$ par ciel clair, est donné par [15, 125] :

$$IB^h(\gamma_s, T_L) = G_0 \cdot \sin(\gamma_s) \cdot \exp(-0.8662 \cdot T_L \cdot m_A \cdot \delta_R) \quad (2.20)$$

La quantité $\exp(-0.8662 \cdot T_L \cdot m_A \cdot \delta_R)$ représente la transmittance de l'éclairement direct par ciel clair $T_{rb}(\gamma_s, T_L)$, elle est fonction de la hauteur du soleil γ_s et du facteur de trouble T_L à masse d'air 2, la figure (2.11) illustre la variation de la transmittance directe $T_{rb}(\gamma_s, T_L)$. Par conséquent l'éclairement direct normal incident sur un plan horizontal $IN(\gamma_s, T_L)$ par ciel clair est donné par :

$$IN(\gamma_s, T_L) = G_0 \cdot T_{rb}(\gamma_s, T_L) \quad (2.21)$$

Les variations au niveau de la mer de l'éclairement direct en fonction de la hauteur du soleil γ_s et pour différentes valeurs du facteur de Linke sont représentées sur la figure (2.12) :

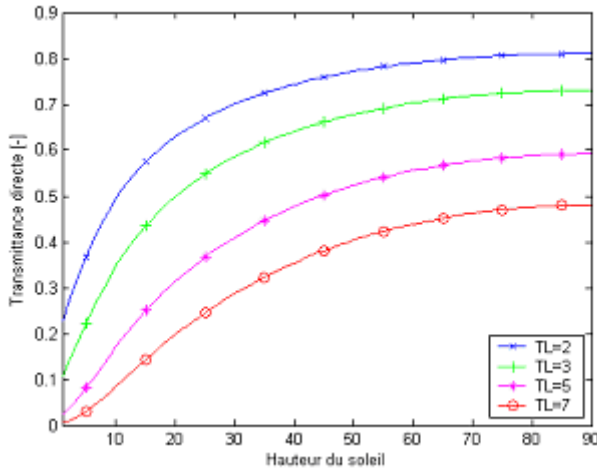


Fig 2.11: Variations de la transmittance directe.

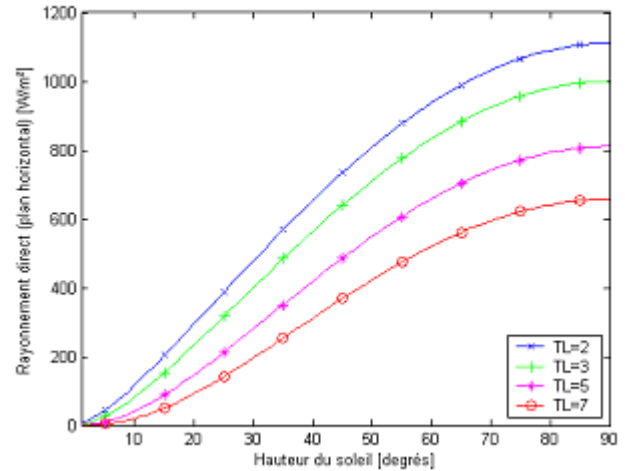


Fig 2.12: Variations de l'éclairement direct horizontal.

2.2.3.3. Eclairement diffus incident sur un plan horizontal

L'éclairement diffus est le flux solaire reçu par un plan considéré qui traverse les nuages, provenant de la voûte céleste dans toutes les directions. Pour l'expression de l'éclairement diffus, nous allons prendre la formule publiée par Hofierka et al. (2002) avec une légère correction du le facteur T_L , cette correction a été adoptée en 2004 par la nouvelle Atlas Solaire de L'Europe (ESRA) [126] et également pris en considération dans la version 2007 de MeteoNorm V6.0 [116]. Cette modification eu lieu du faite que les modèles de calcul de l'irradiation solaire ne prenaient pas en compte la pression atmosphérique du site considéré dans le calcul de l'éclairement diffus.

Posons $T_{Lc} = (p/p_o) \cdot T_L$, l'expression de l'éclairement diffus est donnée par :

$$ID^h(\gamma_s, T_L) = G_0 \cdot T_{rd}(T_L) \cdot F_d(\gamma_s, T_L) \quad (2.22)$$

$T_{rd}(T_L)$ est la fonction de la transmittance diffuse. Elle est fonction uniquement du facteur T_L corrigé, elle varie entre 0 et 0.3 (a.s.l). L'expression de $T_{rd}(T_L)$ est réécrite de la manière suivante :

$$T_{rd}(T_L) = -1.5843 \cdot 10^{-2} + (3.0543 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Lc}) + (3.797 \cdot 10^{-4} \cdot T_{Lc}^2) \quad (2.23)$$

$F_d(\gamma_s, T_L)$ est la fonction diffuse angulaire, elle est fonction de la hauteur du soleil γ_s et du facteur de trouble T_L corrigé, $F_d(\gamma_s, T_L)$ est donnée par l'équation (2.24).

$$F_d(\gamma_s, T_L) = A_0 + A_1 \cdot \sin(\gamma_s) + A_2 \cdot [\sin(\gamma_s)]^2 \quad (2.24)$$

$$\text{Avec : } A_0 = 2.6463 \cdot 10^{-1} - 6.1581 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Lc} + 3.1408 \cdot 10^{-3} \cdot T_{Lc}^2 \quad (2.25)$$

$$A_1 = 2.0402 + 1.8945 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Lc} - 1.1161 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Lc}^2 \quad (2.26)$$

$$A_2 = -1.3025 + 3.9231 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Lc} + 8.5079 \cdot 10^{-3} \cdot T_{Lc}^2 \quad (2.27)$$

$$\text{Avec la condition suivante : } A_0 \cdot T_{rd}(T_L) < 2 \cdot 10^{-3} \Rightarrow A_0 = 2 \cdot 10^{-3} / T_{rd}(T_L) \quad (2.28)$$

Cette condition est obligatoire dans le cas où le facteur T_L est supérieur à 6 car le coefficient A_0 prend des valeurs négatives. La fonction diffuse angulaire $F_d(\gamma_s, T_L)$ est représentée sur la figure (2.13).

Les variations au niveau de la mer de l'éclairement diffus en fonction de la hauteur du soleil γ_s et pour différentes valeurs du facteur de Linke sont représentées sur la figure (2.14) :

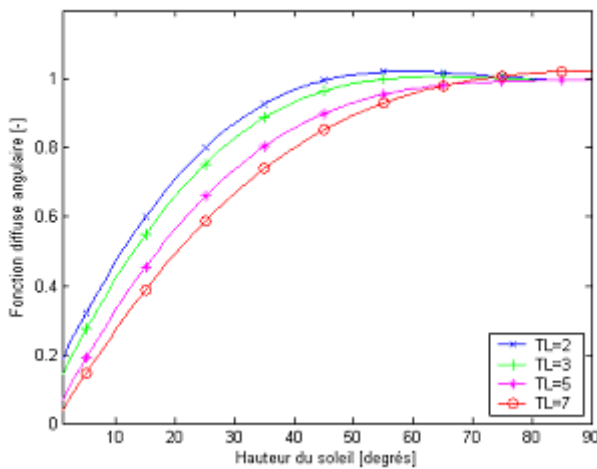


Fig 2.13: Fonction diffuse angulaire.

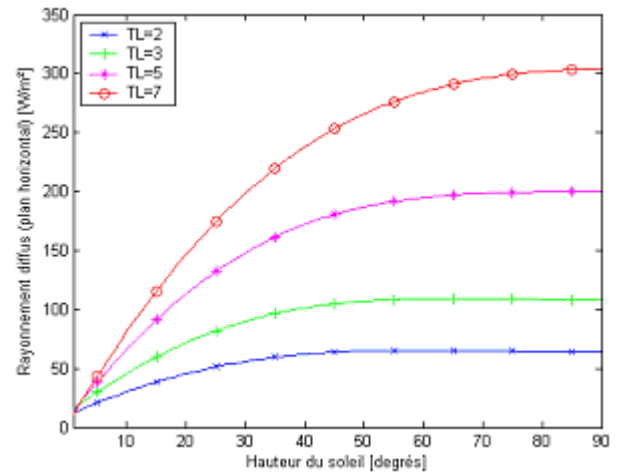


Fig 2.14: Variations de l'éclairement diffus horizontal.

2.2.3.4. Eclairement solaire global incident sur un plan horizontal

L'éclairement global est composé de flux direct et de flux diffus :

$$IG^h(\gamma_s, T_L) = IB^h(\gamma_s, T_L) + ID^h(\gamma_s, T_L) \quad (2.29)$$

Les variations au niveau de la mer de l'éclairement global en fonction de la hauteur du soleil γ_s et pour différentes valeurs du facteur de Linke ($T_L = 2, 3, 5, 7$) sont représentées sur la figure (2.15) :

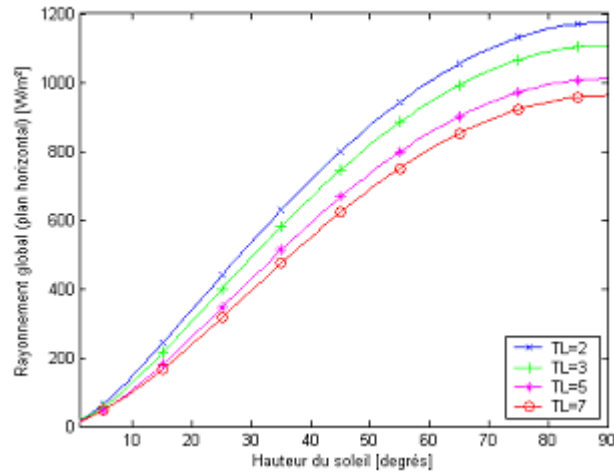


Fig 2.15: Variations de l'éclairement global horizontal en fonction de la hauteur du soleil et du facteur de Linke.

2.2.4. Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque

2.2.4.1. Angle d'incidence

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

$$\sin(\theta_i) = \cos(\varphi') \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega - \lambda') + \sin(\varphi') \cdot \sin(\delta) \tag{2.30}$$

Avec :
$$\sin(\varphi') = -\cos(\varphi) \cdot \sin(\gamma_p) \cdot \cos(\theta_p) + \sin(\varphi) \cdot \cos(\gamma_p) \tag{2.31}$$

$$\text{tg}(\lambda') = \frac{-\sin(\gamma_p) \cdot \sin(\theta_p)}{\sin(\varphi) \cdot \sin(\gamma_p) \cdot \cos(\theta_p) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\gamma_p)} \tag{2.32}$$

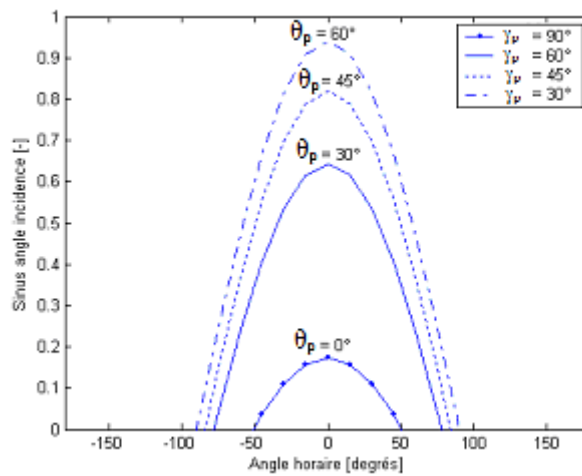


Fig 2.16: Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.

Les variations de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire pour une déclinaison de 20° à un lieu de latitude 30° , pour différentes valeurs de l'inclinaison γ_p sont représentées sur la figure (2.16) :

2.2.4.2. Eclairage solaire global incident sur un plan quelconque

Pour un plan quelconque (γ_p , θ_p), l'éclairage global est estimé par la détermination de l'éclairage direct et diffus de la manière suivante [15, 127] :

$$IG^i(\gamma_s, T_L) = IB^i(\gamma_s, T_L) + ID^i(\gamma_s, T_L) \quad (2.33)$$

2.2.4.3. Eclairage direct incident sur un plan quelconque

L'éclairage direct étant simple à calculer, il est donné en fonction de l'angle d'incidence par la formule suivante :

$$IB^i(\gamma_s, T_L) = IN(\gamma_s, T_L) \cdot \sin(\theta_i) \quad (2.34)$$

Les variations de l'éclairage direct incident sur un plan d'orientation θ_p et d'inclinaison γ_p variables pour un lieu de latitude 30° en fonction de l'angle d'incidence et pour différentes valeurs du facteur de Linke sont représentées sur la figure (2.17) :

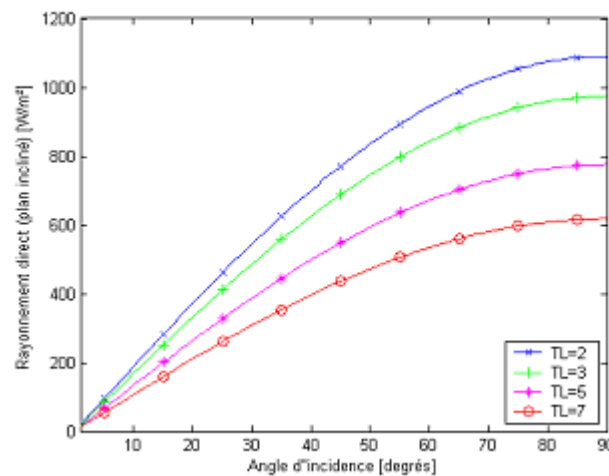


Fig 2.17: Variations de l'éclairage direct incident sur un plan incliné.

2.2.4.4. Eclairage diffus incident sur un plan quelconque

Pour l'estimation de l'éclairage diffus, le modèle r.sun distingue entre les surfaces exposées à l'air libre et recevant directement le flux solaire incident (milieu éclairé) et entre les surfaces placées dans des endroits contenant un ou plusieurs obstacles empêchant l'incidence du flux solaire d'une manière directe (milieu ombré) [128].

Pour un plan dont l'incidence du flux solaire est reçue d'une manière directe (sans obstacle), l'éclairage diffus incident sur le plan considéré est donné par les équations (2.35) et (2.36) :

$$\text{Si } \gamma_s \geq 0.1 \text{ (5.7}^\circ\text{)} \quad \text{ID}^i(\gamma_s, T_L) = \text{ID}^h(\gamma_s, T_L) \cdot \left[F(\gamma_p) \cdot (1 - k_b) + k_b \cdot \frac{\text{Sin}(\theta_i)}{\text{Sin}(\gamma_s)} \right] \quad (2.35)$$

$$\text{Si } \gamma_s < 0.1 \text{ (5.7}^\circ\text{)} \quad \text{ID}^i(\gamma_s, T_L) = \text{ID}^h(\gamma_s, T_L) \cdot \left[F(\gamma_p) \cdot (1 - k_b) + k_b \cdot \frac{\text{Sin}(\gamma_p) \cdot \text{Cos}(\theta_{vp})}{0.1 - 0.008 \cdot \gamma_s} \right] \quad (2.36)$$

La valeur de θ_{vp} est déterminée comme suit :

$$\text{Si } -\pi \leq \theta'_{vp} \leq \pi \quad \theta_{vp} = \theta'_{vp} = \theta_{az} - \theta_p \quad (2.37)$$

$$\text{Si } \theta'_{vp} > \pi \quad \theta_{vp} = \theta'_{vp} - 2\pi \quad (2.38)$$

$$\text{Si } \theta'_{vp} < -\pi \quad \theta_{vp} = \theta'_{vp} + 2\pi \quad (2.39)$$

$F(\gamma_p)$ est la fonction de l'éclairement diffus du ciel, elle est donnée par l'équation (2.40), fonction de r_i la fraction du ciel pour l'éclairement diffus vu par un plan incliné :

$$F(\gamma_p) = r_i(\gamma_p) + \left[\text{Sin}(\gamma_p) - \gamma_p \cdot \text{Cos}(\gamma_p) - \pi \cdot \text{Sin}(\gamma_p / 2)^2 \right] \cdot k_N \quad (2.40)$$

$$\text{Avec : } r_i(\gamma_p) = \left[1 + \text{Cos}(\gamma_p) \right] / 2 \quad (2.41)$$

La valeur du coefficient k_N pour un plan incliné ensoleillé est calculée par la formule suivante :

$$k_N = 0.00263 - 0.712 \cdot k_b - 0.6883 \cdot k_b^2 \quad (2.42)$$

k_b est un coefficient qui détermine la quantité de l'éclairement direct disponible (c'est le rapport entre l'éclairement direct et l'éclairement extraterrestre horizontal), il est donné par :

$$k_b = \text{IB}^h(\gamma_s, T_L) / G_0^h \quad (2.43)$$

$$\text{Avec : } G_0^h = G_0 \cdot \text{Sin}(\gamma_s) \quad (2.44)$$

Les variations de l'éclairement diffus incident sur un plan d'inclinaison γ_p (30 et 60°) pour un lieu de latitude 30° en fonction de la hauteur du soleil et pour différentes valeurs du facteur de Linke sont représentées sur la figure (2.18) :

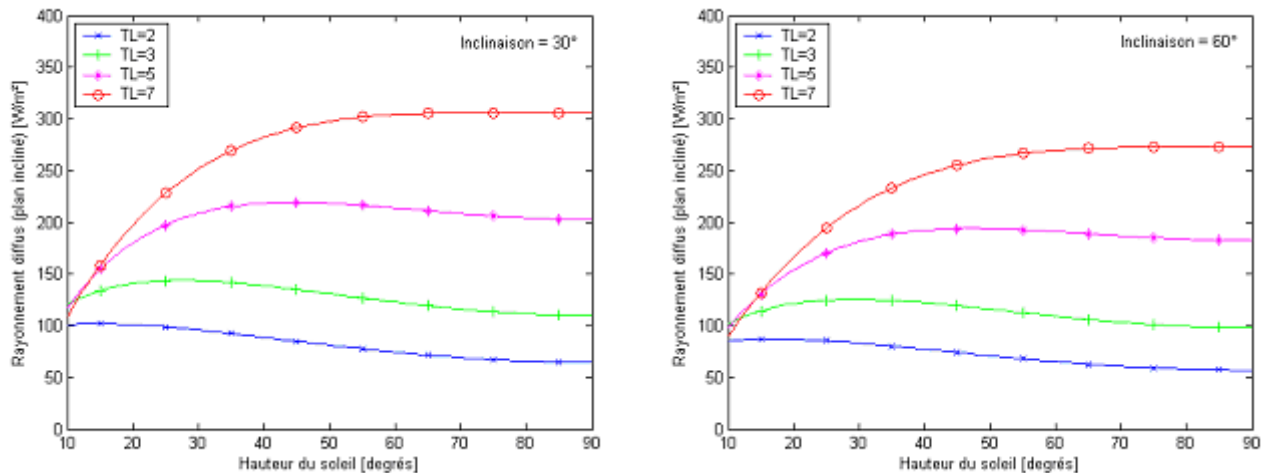


Fig 2.18: Variations de l'éclairement diffus incident sur un plan incliné et ensoleillé.

2.3. CONCEPTION MECANIQUE DU CUISEUR

2.3.1. Description du cuiseur boîte

Avant de faire la conception des cuiseurs, nous avons besoin de choisir des formes de cuiseurs bien définies avec des dimensions précises. Notre choix s'est porté sur deux types de cuiseurs (Fig 2.19): le premier est un cuiseur boîte ordinaire (conventionnel) à surface d'ouverture horizontale et le second est un cuiseur boîte également sur lequel on a apporté une modification de design: le cuiseur adopté sera tronqué de forme trapézoïdale de manière à avoir une surface d'ouverture inclinée dans le but d'éliminer l'ombrage exercé sur une partie importante de l'absorbeur, notamment en période hivernale où la hauteur du soleil est faible, ce qui permet d'augmenter considérablement la surface réceptrice par rapport au cuiseurs conventionnels.

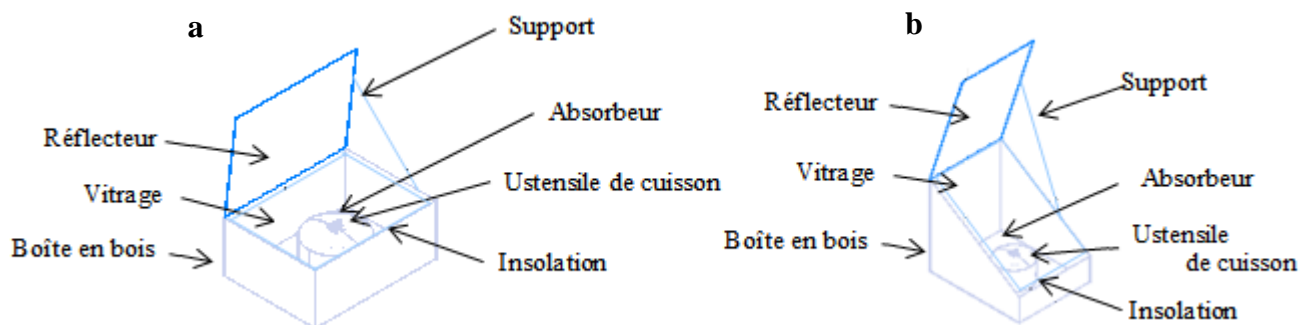


Fig 2.19: Schéma d'un cuiseur solaire de type boîte muni d'un réflecteur: (a) à surface horizontale; (b) à surface réceptrice inclinée.

Les deux cuiseurs solaires sont constitués d'une boîte extérieure en bois, une boîte interne de cuisson en verre, un couvercle à simple vitrage, un isolant thermique, des miroirs (réflecteurs) et un récipient de cuisson. L'espace entre le boîtier externe et le bac interne, y compris le fond du plateau; est rempli d'un matériau isolant pour réduire les pertes en chaleur vers l'extérieur. Un couvercle en verre

couvre la boîte extérieure. L'absorbeur, en tôle d'Aluminium et peint en noir mat; absorbe le rayonnement solaire et transfère sa chaleur vers l'ustensile du cuisson. Le récipient de cuisson en Aluminium (18 cm de diamètre et 10 cm de haut) sera rempli d'une quantité d'eau ou de nourriture et muni d'un couvercle noir, il sera placé à l'intérieur du cuiseur.

2.3.2. Dimensionnement et conception du cuiseur boîte sous logiciel SolidWorks

Avant de procéder à la simulation optique, nous avons besoin de réaliser une conception des cuiseurs à simuler, pour cela nous avons utilisé le logiciel SolidWorks [13]. Un détail de la conception contenant les divers plans est illustré sur la figure (2.20). Suivant l'étude bibliographique, nous avons fini par déterminer les dimensions adéquates des cuiseurs à simuler. Les dimensions du cuiseur à surface horizontale choisi sont les suivantes: 500 mm × 400 mm × 280 mm. Les dimensions globales du cuiseur à surface réceptrice inclinée sont de 550 mm x 450 mm x 495 mm x 175 mm. Les dimensions internes du boîtier, construit à base de vitres; sont de 500 mm x 400 mm x 445 mm x 125 mm, comme le montre la figure (2.21) ci-après [129]:

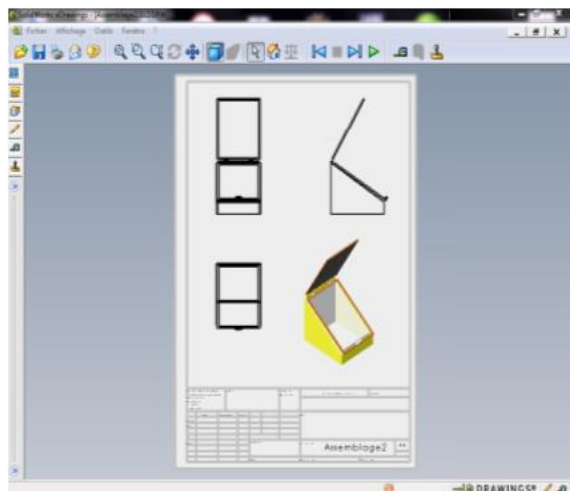


Fig 2.20: Conception du cuiseur solaire boîte avec logiciel SolidWorks et projection des plans pour la réalisation.

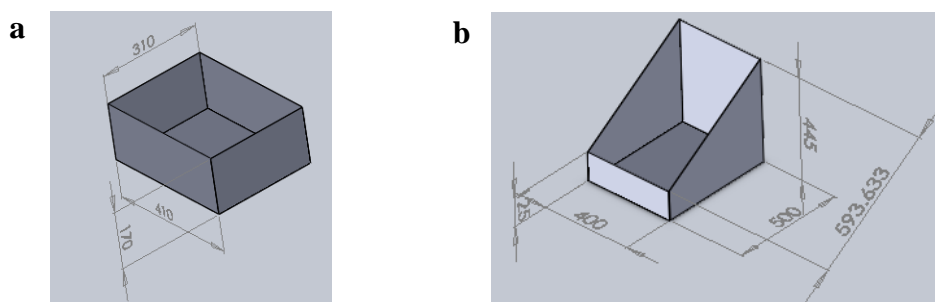


Fig 2.21: Dimensionnement des deux cuiseurs solaires boîtes sous logiciel SolidWorks, (a) cuiseur conventionnel, (b) cuiseur proposé.

Dans le but d'obtenir les densités énergétiques voulues, le cuiseur doit être composé de deux parties: un module de concentration de l'énergie (réflecteurs), constitué de deux miroirs de 594 mm x 400 mm; à inclinaisons variables et un second module d'utilisation de cette énergie; qui est la boîte de cuisson. Le prototype final du cuiseur à surface réceptrice inclinée ainsi que les dimensions adoptées pour la réalisation sont illustrés sur la figure (2.22a) pour un seul réflecteur ajouté et sur la figure (2.22b) pour deux réflecteurs ajoutés. L'angle d'inclinaison de la surface inclinée du cuiseur est égal à la latitude du site de Ghardaïa.

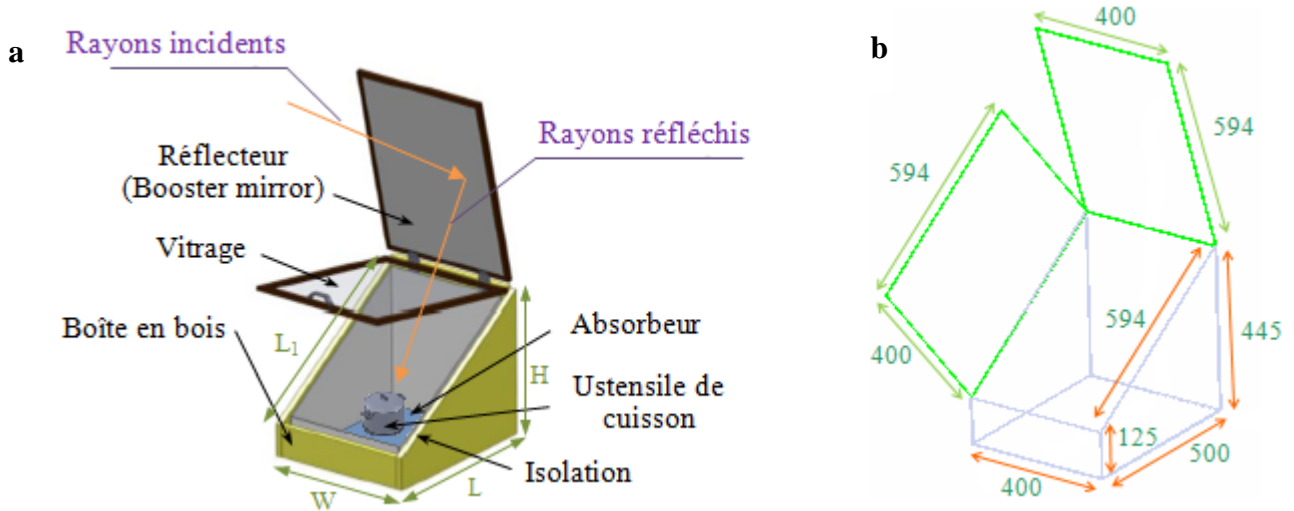


Fig 2.22: Conception du design final du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée: (a) avec un réflecteur additionnel principal; (b) avec deux réflecteurs additionnels.

2.3.3. Angles d'inclinaison du réflecteur

Afin de collecter un maximum d'énergie, un cuiseur doit être muni des réflecteurs additionnels (un ou deux dans notre cas), les angles d'inclinaison de ces réflecteurs doivent être optimums au maximum. Pour calculer ces angles, on considère; dans ce qui suit, un cuiseur orienté en plein Sud à midi (angle horaire $\omega = 0$). La figure (2.23a) montre le schéma d'un cuiseur solaire ordinaire, l'angle θ que fait les rayons solaires avec la plan vertical à midi, est donné par :

$$\theta = \varphi \pm \delta \quad (2.45)$$

L'angle d'inclinaison α du réflecteur est calculé à partir de [130] :

$$\alpha_H = \frac{1}{3} \cdot \left(2\theta - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.46)$$

Dans le cas où la surface réceptrice est inclinée d'un angle β avec l'horizontal (Fig 2.23b), le calcul de l'angle α est donné par:

$$\alpha_1 = \frac{1}{3} \cdot \left(2\theta + \beta - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.47)$$

Si on ajoute encore un second réflecteur à la face avant du cuiseur (Fig 2.23c), le calcul de l'angle γ est donné par:

$$\gamma = \frac{1}{3} \cdot (\pi - 2\theta - \beta) \quad (2.48)$$

Pour calculer l'angle λ du réflecteur monté sur le côté du cuiseur, différents paramètres doivent être pris en considérations, dans la littérature on donne les angles suivants [130] :

$$\lambda = \begin{cases} 0^\circ & \text{de 6:00 am à 9:00 am} \\ 45^\circ & \text{de 9:00 am à 12:00 am} \end{cases} \quad (2.49)$$

La figure (Fig 2.23d) montre le schéma complet d'un cuiseur solaire à surface d'ouverture inclinée muni de deux réflecteurs additionnels. Si on suppose que la hauteur du soleil γ_s est égale à 35° et la déclinaison δ égale à -23 avec un azimut θ_{az} nul (cas d'un jour d'hiver), l'angle θ est donc d'environ $\approx 55^\circ$, l'angle α du réflecteur principal d'un cuiseur ordinaire serait de $\approx 7^\circ$, l'angle γ du réflecteur secondaire est de 23° . Concernant le cuiseur à surface d'ouverture inclinée, ces angles seraient de $\alpha \approx 17^\circ$ et $\gamma \approx 13^\circ$ respectivement.

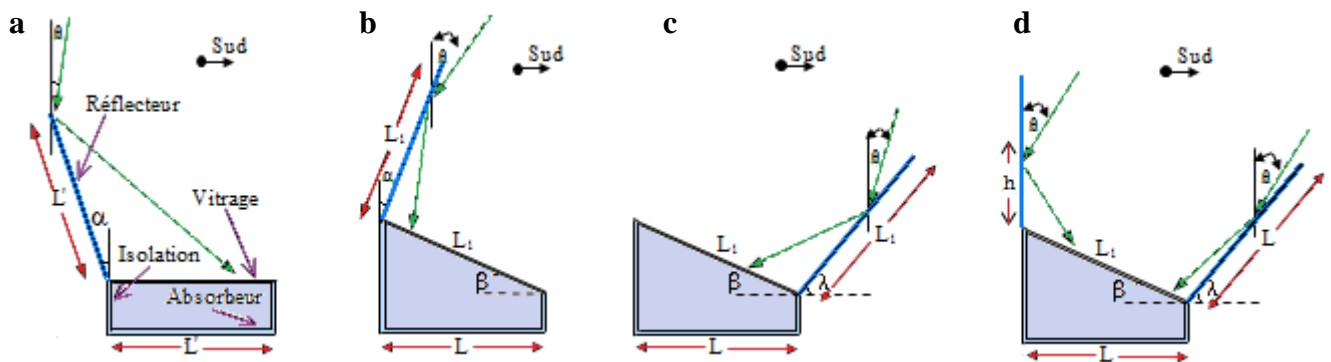


Fig 2.23: Schéma de cuiseurs solaires boîtes muni de réflecteurs additionnels: (a) cuiseur ordinaire; (b) avec réflecteur principal; (c) avec un second réflecteur; (d) cuiseur à surface inclinée avec deux réflecteurs additionnels.

2.4. SIMULATION OPTIQUE DU CUISEUR

2.4.1. Simulation optique avec le logiciel TracePro

Avant d'entamer la phase de réalisation, nous avons procédé à la simulation optique de la répartition des rayons solaires concentrés au niveau de l'absorbeur des deux types de cuiseurs boîtes (à surface d'ouverture horizontale et à surface inclinée), des réflecteurs additionnels sont ajoutés aux cuiseurs afin de connaître leurs effets sur le comportement optique de l'éclairement solaire reçu pour en arriver à une conception du design final optimisé [131].

Le choix du logiciel de simulation s'est porté sur le logiciel de simulation optique professionnel le TracePro 7.0 [14]. Pour cela, nous avons commencé par le calcul des paramètres de position du soleil (hauteur et azimut) pour le site de Ghardaïa. Avec des relations trigonométriques, nous avons converti les coordonnées du soleil en coordonnées de source de lumière qu'on introduit au logiciel.

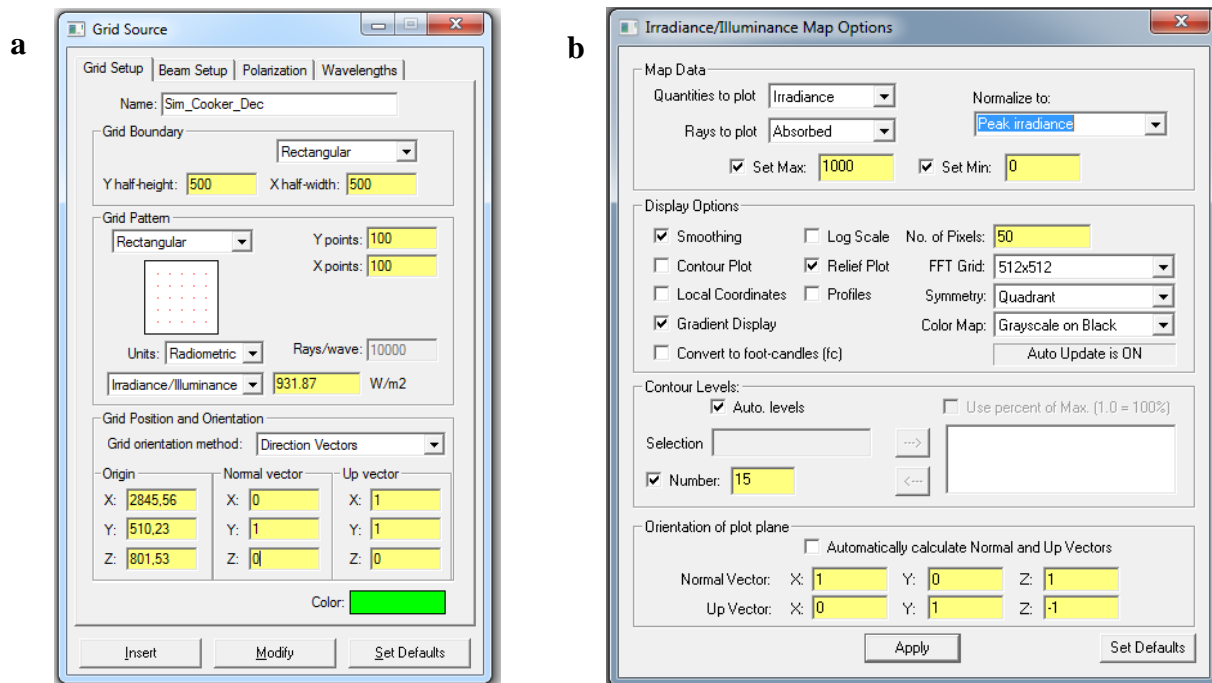


Fig 2.24: Utilisation du logiciel TracePro pour la simulation des cuiseurs solaires: **(a)** configuration de la source lumineuse; **(b)** Choix des options du mapping de l'éclairage concentré.

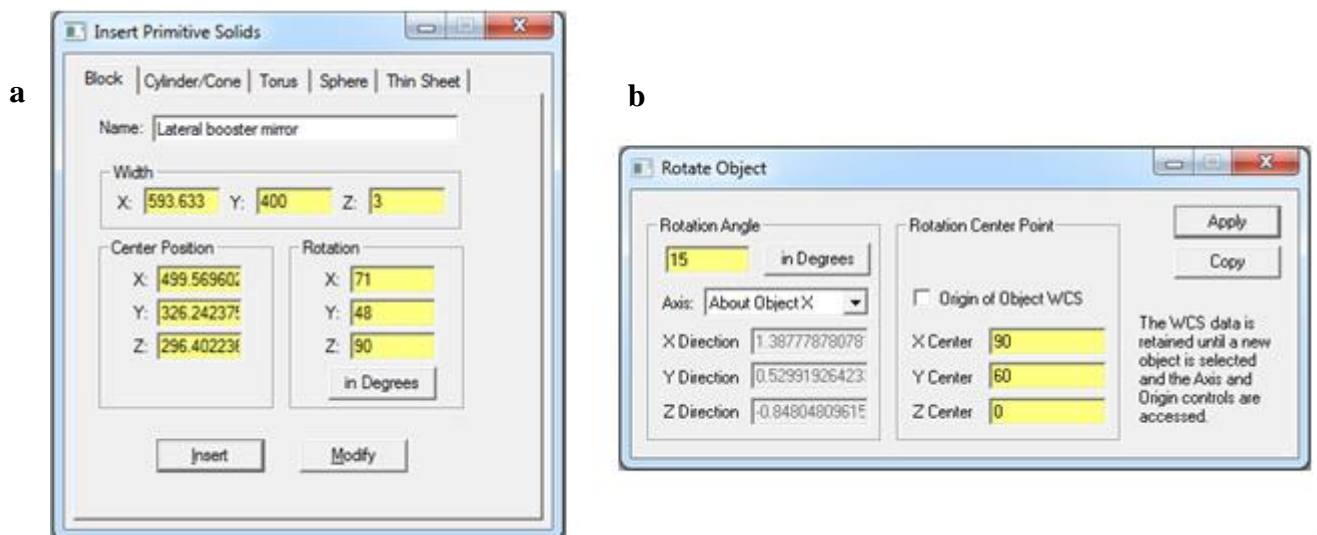


Fig 2.25: Utilisation du logiciel TracePro pour la simulation des cuiseurs solaires: **(a)** insertion des réflecteurs; **(b)** Choix des angles d'inclinaison des réflecteurs.

Pour procéder à la simulation de plusieurs jours types de l'année, on insère les valeurs de l'éclairage solaire calculées précédemment; par le logiciel Matlab 7.10 [16], pour chaque cas (Fig 2.24). Après conception des cuiseurs utilisant le logiciel SolidWorks [13], on importe les formes des

cuiseurs au logiciel TracePro 7.0 [14], on ajoute des réflecteurs selon le cas considéré, les angles α , γ , et λ d'inclinaison des réflecteurs devront ensuite être ajustés suivant les équations 2.46, 2.47, 2.48 et 2.49 précédentes (Fig 2.25).

2.4.2. Simulation optique des cuiseurs solaires pour des conditions climatiques extrêmes

2.4.2.1. Cuiseurs sans réflecteurs additionnels

En premier lieu, on procède à la simulation des deux types de cuiseurs sans réflecteurs additionnels, la simulation est réalisée pour un jour type du mois le plus défavorable de l'année à Ghardaïa (11 Décembre). La figure (2.26) illustre la réception et la réflexion des rayons solaires par les deux types de cuiseurs. Pour des raisons de clarté, nous avons minimisé le nombre de rayons émis par la source.

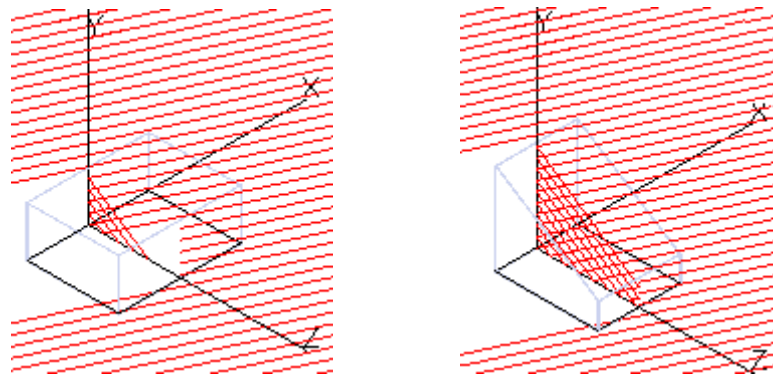


Fig 2.26: Simulation optique des deux cuiseurs au mois de Décembre sans réflecteurs additionnels.

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de rayonnement concentré au niveau de la plaque absorbante des cuiseurs. Les figure (2.27a) et figure (2.27b) représentent clairement le comportement optique des rayons solaires reçus et réfléchis par les parois des cuiseurs.

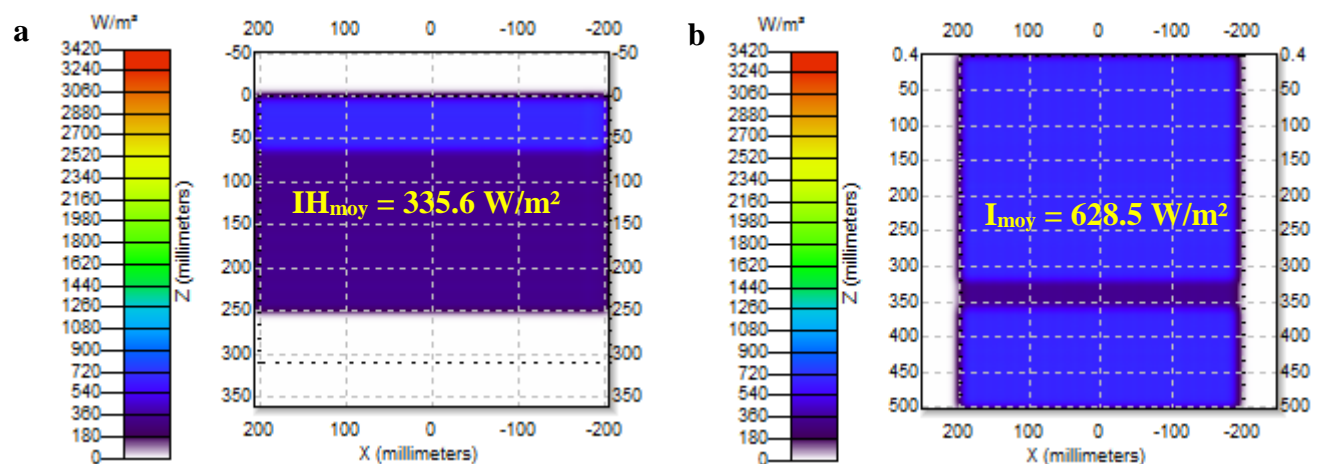


Fig 2.27: Résultats de la simulation optique des cuiseurs sans réflecteurs additionnels au mois de Décembre: (a) à surface d'ouverture horizontale; (b) à surface d'ouverture inclinée.

On peut remarquer facilement que la surface couverte par les rayons concentrés est plus grande dans le cas du cuiseur à surface d'ouverture inclinée, ceci est dû principalement à la géométrie de ce dernier (sa paroi d'avant est tronquée et la paroi de la face arrière est plus haute), ce qui permet de collecter une plus grande quantité de rayonnement solaire dans ce type de cuiseur, ce qui est intéressant en hiver, où le soleil est bas dans l'horizon, l'analyse de ce phénomène est bien illustrée sur la figure (2.28) :

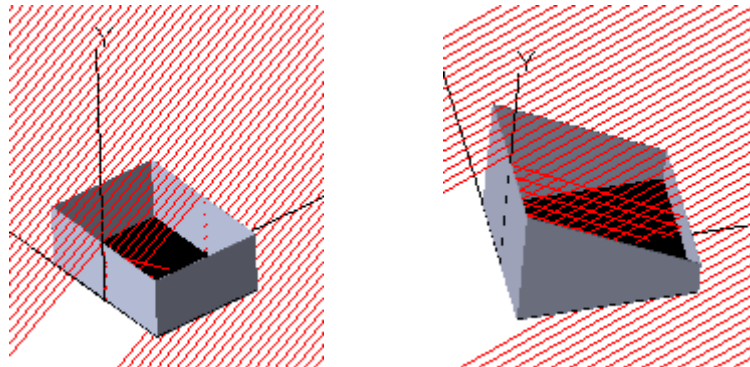


Fig 2.28: Surface effective couverte par la réception et la réflexion des rayons solaires dans le cas de chaque cuiseur boîte.

2.4.2.2. Cuiseurs avec un réflecteur principal

Cette fois on ajoute un réflecteur additionnel aux deux cuiseurs et on réalise la même simulation qu'au premier cas. L'angle d'inclinaison du réflecteur principal dans le cas du cuiseur à surface inclinée est $\alpha_1 = 17^\circ$ pour le mois de décembre à midi sur le site de Ghardaïa, elle est de l'ordre de $\alpha_H = 7^\circ$ dans le cas du cuiseur horizontal. La figure (2.29) illustre la concentration des rayons solaires sur l'absorbeur des deux cuiseurs munies d'un réflecteur additionnel principal :

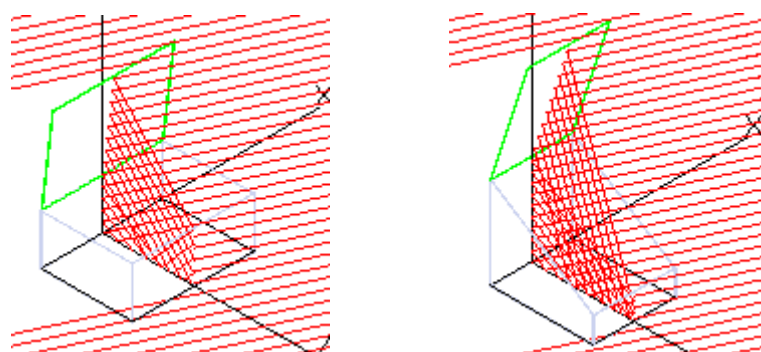


Fig 2.29: Simulation optique des deux cuiseurs au mois de Décembre avec un réflecteur additionnel principal.

Les résultats de la simulation réalisée pour un jour type du mois de Décembre à Ghardaïa (Fig 2.30a et Fig 2.30b) montrent que l'ajout du réflecteur permet d'augmenter l'énergie captée dans les deux cas par rapport au cas précédent, le rayonnement concentré moyen dans le cas du cuiseur à surface inclinée I_{moy} est de $\approx 1048 \text{ W/m}^2$ par rapport au cuiseur horizontal $I_{H_{moy}}$ est de $\approx 768 \text{ W/m}^2$. La

quantité d'énergie gagnée est plus importante sur l'absorbeur du cuiseur inclinée (facteur de concentration $C = 1.8$ contre 1.3 pour le cuiseur horizontal), ce qui permet d'améliorer ses performances optiques.

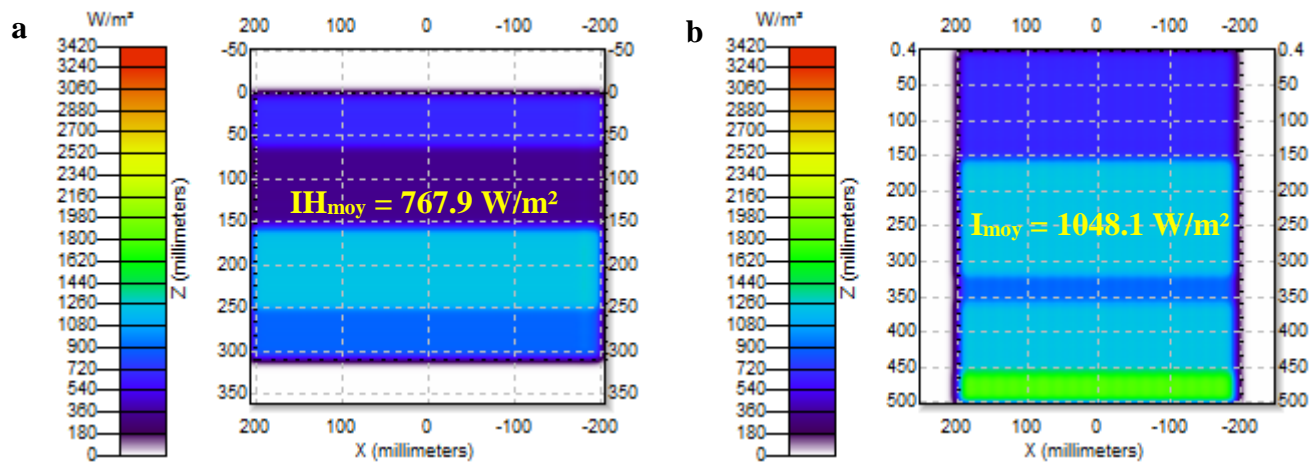


Fig 2.30: Résultats de la simulation optique des cuiseurs avec un réflecteur additionnel principal au mois de Décembre: **(a)** à surface d'ouverture horizontale; **(b)** à surface d'ouverture inclinée.

2.4.2.3. Cuiseurs avec un réflecteur secondaire

On se propose maintenant d'ajouter un réflecteur secondaire sur la face avant des deux cuiseurs et on réalise la simulation. L'angle d'inclinaison du réflecteur secondaire dans le cas du cuiseur à surface inclinée est $\gamma = 13^\circ$ pour le mois de décembre à midi sur le site de Ghardaïa, elle est de l'ordre de 23° dans le cas du cuiseur horizontal. La figure (2.31) illustre la concentration des rayons solaires sur l'absorbeur des deux cuiseurs muni d'un réflecteur additionnel secondaire :

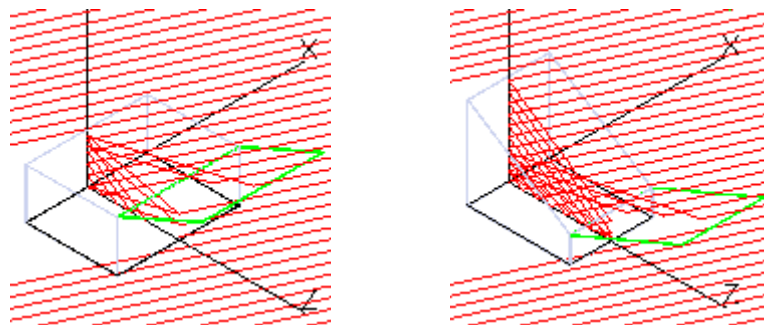


Fig 2.31: Simulation optique des deux cuiseurs au mois de Décembre avec un réflecteur additionnel secondaire.

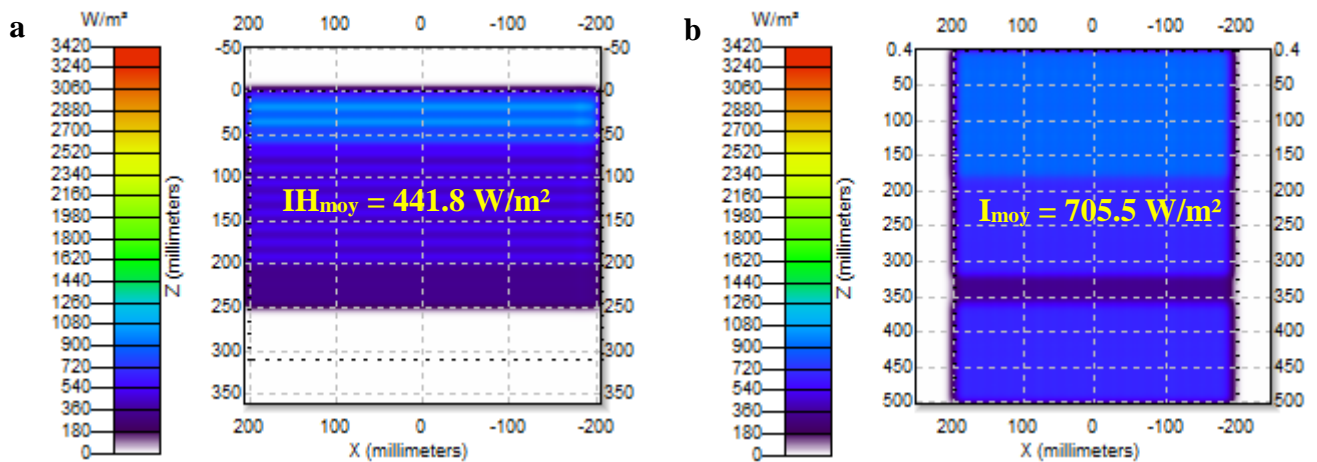


Fig 2.32: Résultats de la simulation optique des cuiseurs avec un réflecteur additionnel secondaire au mois de Décembre: **(a)** à surface d'ouverture horizontale; **(b)** à surface d'ouverture inclinée.

Les résultats de la simulation (Fig 2.32a et Fig 2.32b) avec l'ajout d'un réflecteur secondaire montrent qu'il existe bien une quantité d'énergie gagnée par rapport au 1^{er} cas (sans réflecteur), mais elle est moins importante que le 2^{ème} cas (avec réflecteur principal). Généralement dans les zones situées à l'hémisphère Nord du globe, l'angle d'incidence des rayons solaires sur le réflecteur principal est plus intéressant par rapport au réflecteur secondaire, notamment en hiver où la hauteur du soleil est faible et la réception des rayons sur le réflecteur secondaire devient de plus en plus minime. Par contre, nous avons remarqué que la quantité d'énergie captée; avec ce type de réflecteur, devient importante en été (voir Fig 2.33a et Fig 2.33b), on peut conclure que ce type de réflecteur est mieux adapté pour un usage en été. Cependant, la quantité d'énergie reçue en été; par la plupart des cuiseurs boîtes, est largement suffisante pour de nombreuses cuissons.

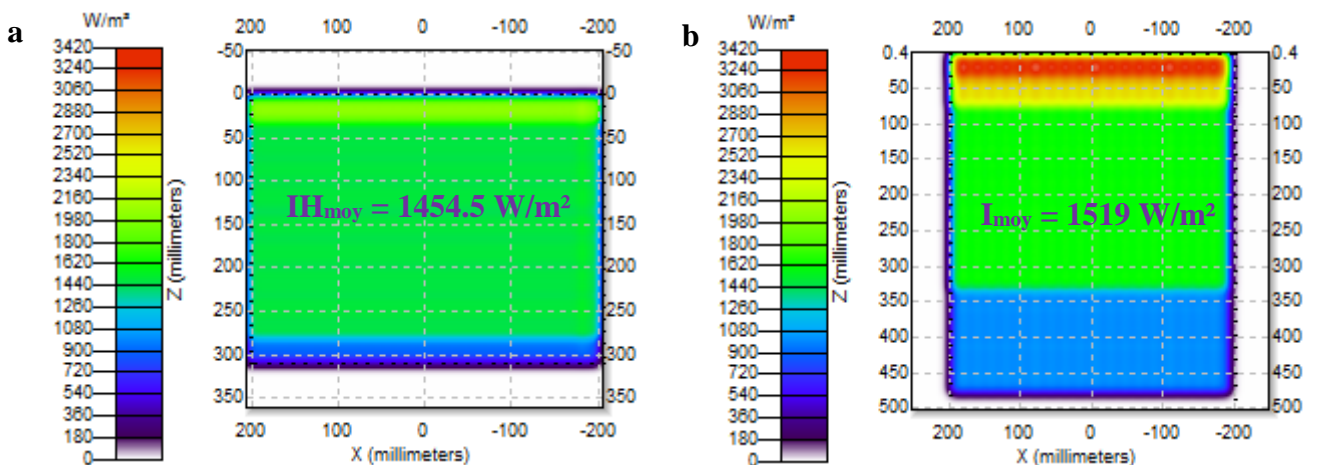


Fig 2.33: Résultats de la simulation optique des cuiseurs avec un réflecteur additionnel secondaire au mois de Juin: **(a)** à surface d'ouverture horizontale; **(b)** à surface d'ouverture inclinée.

2.4.2.4. Cuiseurs avec deux réflecteurs additionnels (principal et secondaire)

On réalise la simulation maintenant en regroupant les deux réflecteurs additionnels en un seul cuiseur. La figure (2.34) illustre la réception et la réflexion des rayons solaires par les deux réflecteurs ajoutés :

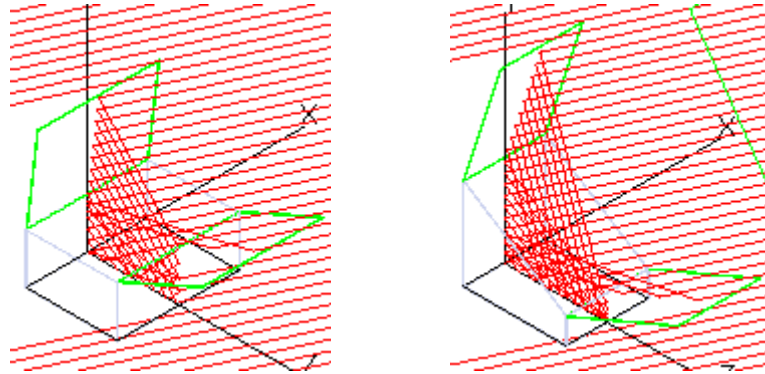


Fig 2.34: Simulation optique des deux cuiseurs au mois de Décembre avec deux réflecteurs additionnels.

On remarque bien un chevauchement des rayons solaires à l'intérieur du cuiseur (Fig 2.35), ce qui permet d'augmenter l'énergie captée. En effet, on passe d'un éclairage global de $\approx 596 \text{ W/m}^2$ à des valeurs supérieures à 1125 W/m^2 pour les rayons concentrés, la valeur moyenne de l'éclairage concentré I_{moy} est nettement supérieure dans le cas du cuiseur à surface d'ouverture inclinée. Cependant, si on compare ces résultats avec ceux du cas avec réflecteur principal (Fig 2.30b), on remarque facilement que la quantité d'énergie collectée est presque identique dans les deux cas. A cet effet, nous avons déduit que l'utilisation du réflecteur secondaire ne sera pas d'une rentabilité considérable pour notre cuiseur destiné au site de Ghardaïa, et de ce fait, ce réflecteur ne sera pas pris en compte lors de la conception du design final du cuiseur.

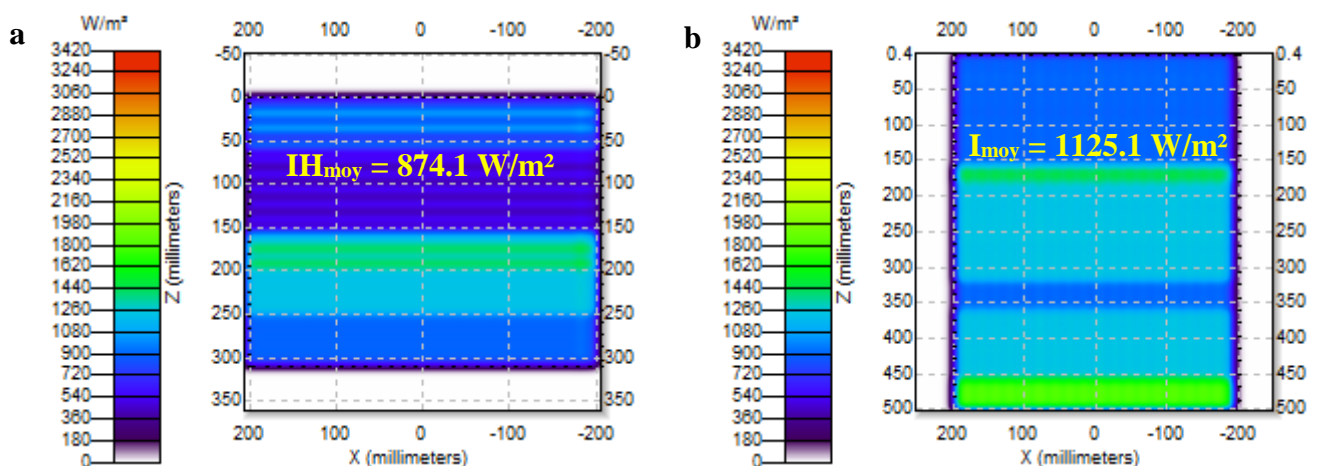


Fig 2.35: Résultats de la simulation optique des cuiseurs avec deux réflecteurs additionnels au mois de Décembre: (a) à surface d'ouverture horizontale; (b) à surface d'ouverture inclinée.

2.4.2.5. Cuiseur avec deux réflecteurs additionnels latéraux

Dans le but de poursuivre les variations journalières du soleil dans la direction Est-Ouest, on se propose d'ajouter deux réflecteurs latéraux sur les deux côtés du cuiseur : le premier est orienté vers l'Est et le second est orienté vers l'Ouest et on réalise la simulation. L'angle d'inclinaison des réflecteurs latéraux λ (Fig 2.36) par rapport à l'horizontal est de 75° pour le site de Ghardaïa durant le mois de Décembre à midi. La figure (2.37) est un exemple d'illustration de la concentration des rayons solaires sur l'absorbeur du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée muni des deux réflecteurs latéraux :

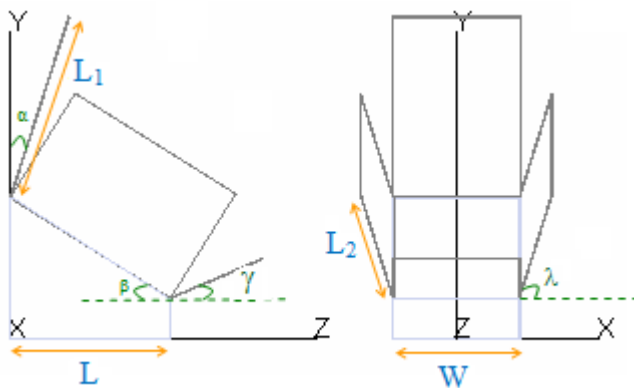


Fig 2.36: Angles d'inclinaison des réflecteurs additionnels latéraux pour le cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée.

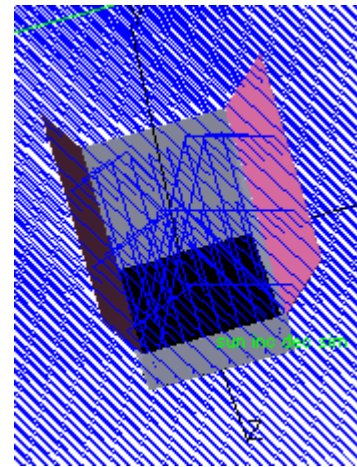


Fig 2.37: Simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs latéraux au mois de Décembre.

Les résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs latéraux figure (2.38) montre que la distribution des rayons concentrés n'est pas uniforme; contrairement au cas précédents, elle est concentrée sur les côtés de l'absorbeur, du fait que la valeur de l'angle d'incidence des rayons sur les réflecteurs est grande. On peut constater également que ce cas de figure est valable uniquement pour un état stationnaire du cuiseur orienté vers un soleil fixe (cuiseur orienté vers le Sud et $\omega = 0$ au site de Ghardaïa par exemple), or le soleil n'est pas fixe et se déplace dans la direction Est-Ouest par rapport au cuiseur. En admettant ce principe, on remarquera physiquement que; durant la période entre deux ajustements successives, le réflecteur latéral orienté vers l'Est sera hors service et aura même une influence négative sur le processus de cuisson puisque il exerce un ombrage non négligeable sur une partie importante de l'absorbeur. On constatera donc que, uniquement le réflecteur latéral orienté vers l'Ouest est en fonctionnement. A cet effet, le réflecteur latéral orienté vers l'Est sera omis dans notre conception finale du cuiseur et seul le réflecteur latéral orienté vers l'Ouest est retenu. Notre conception finale constituera donc un design optimisé avec un réflecteur principal et un réflecteur latéral orienté vers l'Ouest.

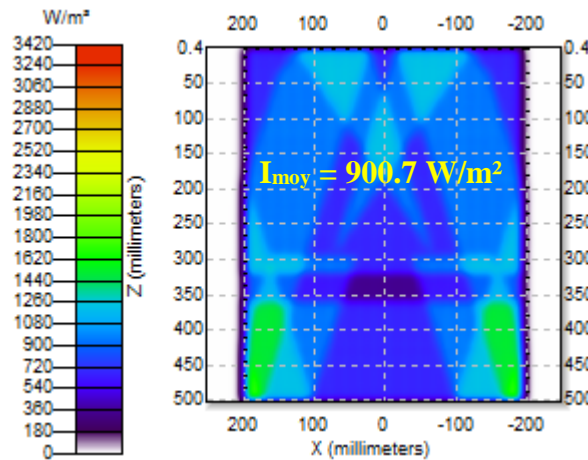


Fig 2.38: Résultats de la simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs latéraux au mois de Décembre.

2.4.2.6. Cuiseur avec design combiné et design optimisé

Afin de déterminer l'énergie solaire concentrée maximale reçue par l'absorbeur d'un cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée, on réalise la simulation optique en ajoutant plusieurs réflecteurs additionnels (quatre). La simulation est réalisée en une journée claire au mois de Décembre à midi. Les angles d'inclinaison des réflecteurs additionnels sont comme suit: $\alpha = 17^\circ$, $\gamma = 13^\circ$ et $\lambda = 75^\circ$. La figure (2.39) est une illustration des angles d'inclinaison de chaque réflecteur. La figure (2.40) illustre la réception et la réflexion des rayons solaires par le cuiseur à surface réceptrice inclinée [132].

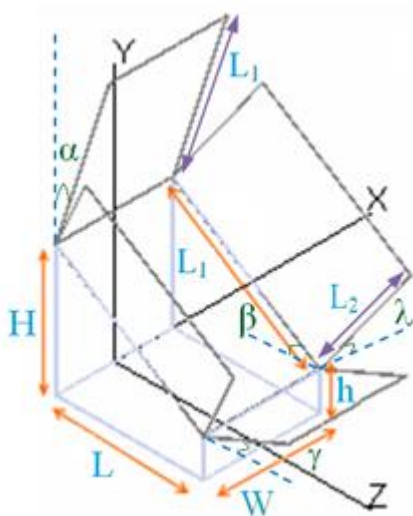


Fig 2.39: Angles d'inclinaison des réflecteurs additionnels.

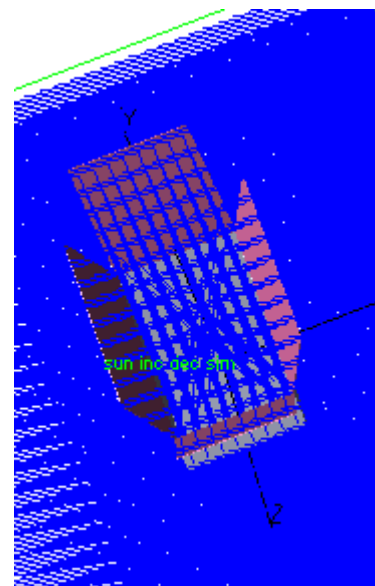


Fig 2.40: Simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec plusieurs réflecteurs additionnels au mois de Décembre.

Les résultats de la simulation optique sont présentés sous forme de rayonnement concentré au niveau de la plaque absorbante du cuiseur sur la figure (2.41a) :

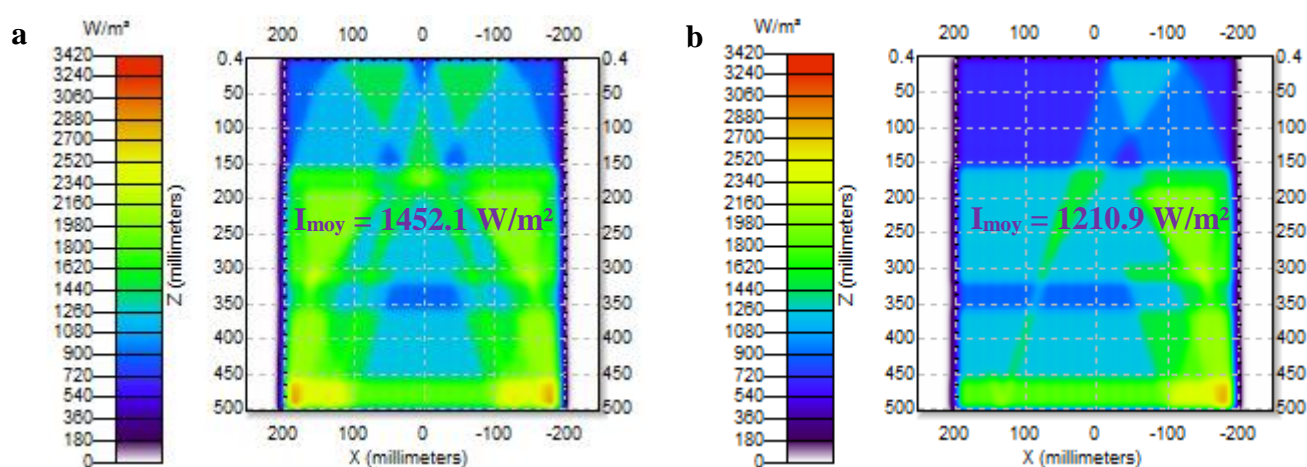


Fig 2.41: Résultats de la simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée au mois de Décembre: **(a)** avec plusieurs réflecteurs additionnels; **(b)** avec deux réflecteurs additionnels (design optimisé).

Les résultats de la figure (2.41a) montrent bien qu'on peut atteindre des valeurs importantes de rayonnement concentré au niveau de l'absorbeur au mois le plus défavorable de l'année. En effet, on passe d'un rayonnement direct de $\approx 596 W/m^2$ à des valeurs supérieures à $1350 W/m^2$ sur la quasi-totalité de la surface absorbante, le facteur de concentration moyen est de 2.4, et c'est un maximum qu'on peut obtenir avec ce design de cuiseur à surface inclinée avec 4 réflecteurs additionnels (design complet). En comparant ces résultats avec le design final (avec un réflecteur principal et un réflecteur latéral orienté vers l'Ouest) (Fig 2.41b), on remarque que notre design proposé est un design optimisé du design complet, du fait que les résultats sont très proches (facteur de concentration égal à 2), avec une possibilité de réalisation technique plus facile (fixation de deux réflecteurs uniquement) et un coût de fabrication plus réduit (suppression de deux réflecteurs).

2.4.3. Résultats de la simulation optique pour diverses conditions climatiques

2.4.3.1. Cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteurs additionnels

Afin de connaître le comportement du cuiseur solaire sous différentes conditions climatiques locales, on réalise diverses simulations pour plusieurs jours de l'année. On procède à la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteurs additionnels, la simulation est réalisée pour des conditions diverses, pour le mois le plus défavorable (Décembre) et le mois le plus ensoleillé (Juin) à Ghardaïa. La figure (2.42) illustre la réception et la réflexion des rayons solaires par les parois du cuiseur pour les deux cas :

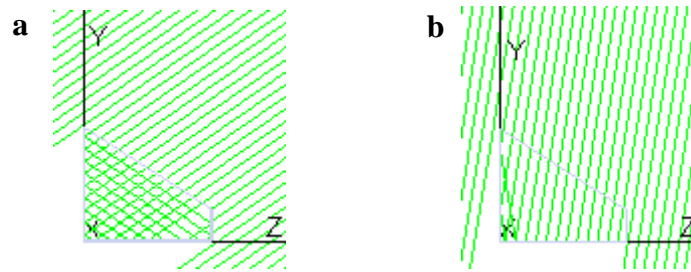


Fig 2.42: Tracé des rayons solaires pour la simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteurs: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de rayonnement concentré au niveau de la plaque absorbante du cuiseur. La figure (2.43) représente clairement le comportement optique des rayons solaires reçus et réfléchis par les parois du cuiseur boîte pour les mois de Décembre et Juin, respectivement. On peut remarquer que la plaque absorbante du cuiseur boîte sans réflecteur est assimilée à une surface horizontale recevant une quantité de rayonnement solaire directement sans réflexion. On retrouve les quantités de ≈ 596 et 1025 W/m^2 pratiquement sur la quasi-totalité de l'absorbeur au mois de Décembre (Fig 2.43a) et de Juin (Fig 2.43b), respectivement.

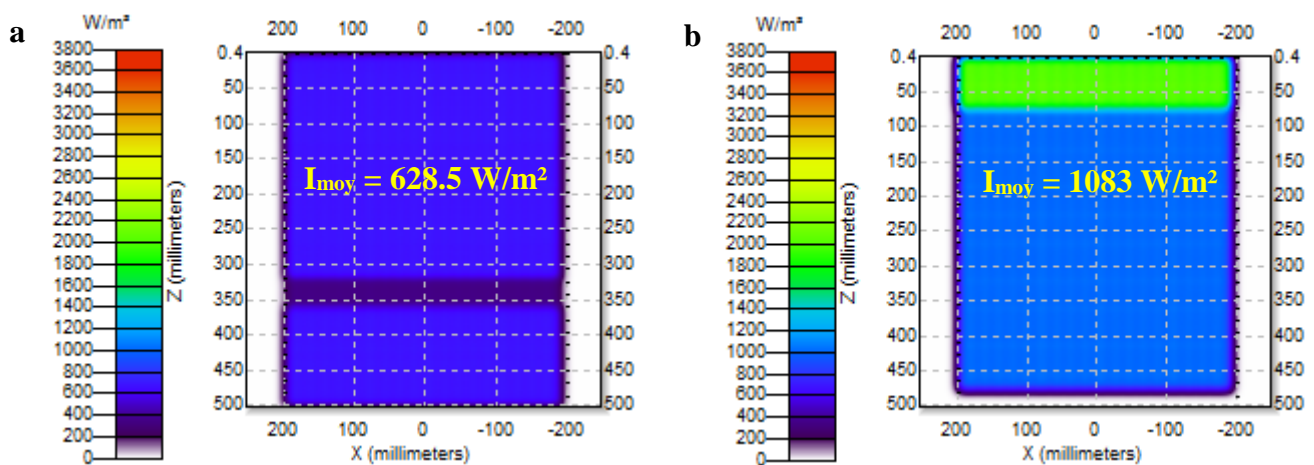


Fig 2.43: Résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteurs additionnels: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.

2.4.3.2. Cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec poursuite à une dimension (Plan Nord-Sud)

Maintenant, on procède à la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec un réflecteur additionnel afin d'effectuer une poursuite dans la direction Nord-Sud, la simulation est réalisée pour le mois le plus défavorable (Décembre) et le mois le plus ensoleillé (Juin) à Ghardaïa.

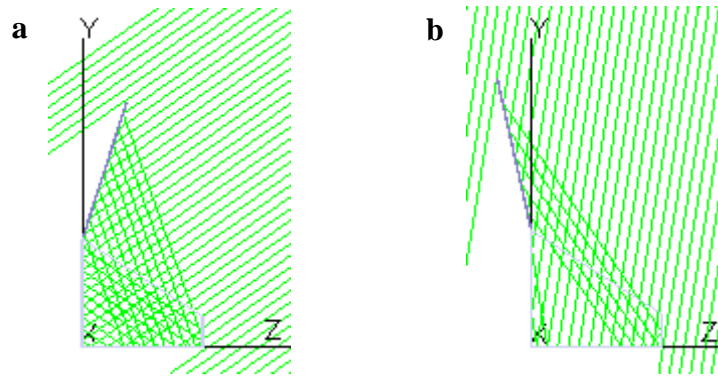


Fig 2.44: Tracé des rayons solaires pour la simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec un réflecteur additionnel: **(a)** au mois de Décembre; **(b)** au mois de Juin.

La figure (2.44) illustre la réception et la réflexion des rayons solaires par les parois du cuiseur pour les deux cas. Les figures (2.45a) et (2.45b) représentent le comportement optique des rayons solaires reçus et réfléchis par le réflecteur et les parois du cuiseur pour les mois de Décembre et Juin, respectivement. On peut dire que le choix adéquat des angles d'inclinaison du réflecteur $\approx 17^\circ$ pour le mois de Décembre (le soleil est bas dans l'horizon) et $\approx -14^\circ$ pour le mois de Juin, permet de récupérer une quantité importante d'énergie dans les deux cas: $I_{\text{moy}} = 1048 \text{ W/m}^2$ (Décembre), $I_{\text{moy}} = 1525 \text{ W/m}^2$ (Juin), le facteur de concentration est augmenté à cet effet.

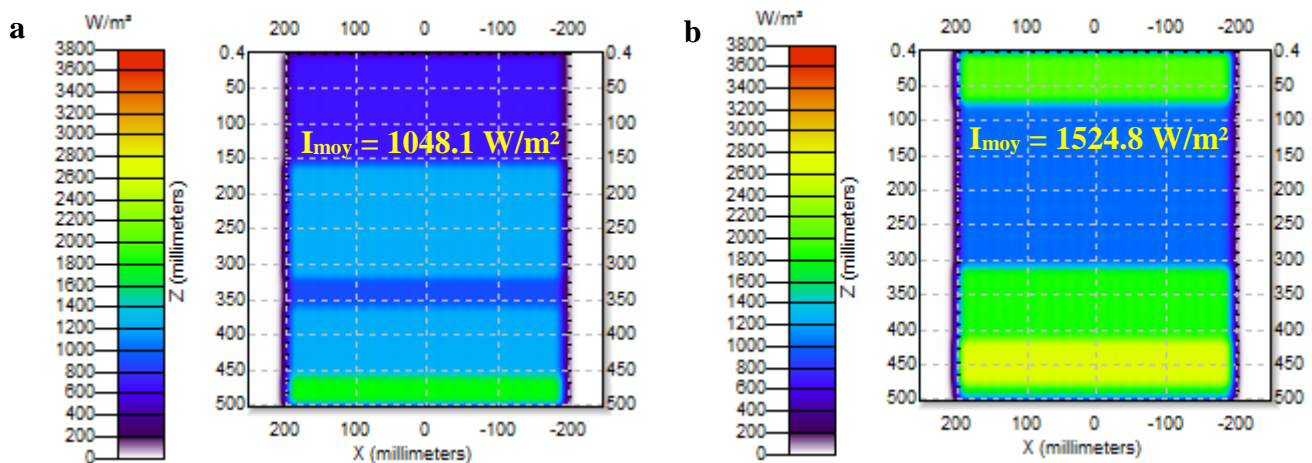


Fig 2.45: Résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec un réflecteur additionnel: **(a)** au mois de Décembre; **(b)** au mois de Juin.

Maintenant on réalise la simulation du cuiseur boîte avec un réflecteur additionnel pour une saison de printemps, au mois d'Avril. Les résultats de la simulation sont présentés sur la figure (2.46a). Contrairement au point de vue thermique, les résultats du mois d'Avril ne constituent pas un cas intermédiaire entre le mois le plus et le moins ensoleillé de l'année. En effet, du point de vue optique, on gagnerait au mois d'Avril une quantité non négligeable d'énergie ($I_{\text{moy}} = 1640 \text{ W/m}^2$) due à la réflexion des rayons solaires par la paroi réfléchissante arrière du cuiseur qui se comportent comme un réflecteur, ceci à une relation directe avec l'angle θ formée par les rayons solaires et le plan vertical. Le

facteur de concentration moyen dépasse 1.6 (Fig 2.46b) sur la partie arrière de l'absorbeur, contre 1.8 au mois de Décembre et 1.5 au mois de Juin.

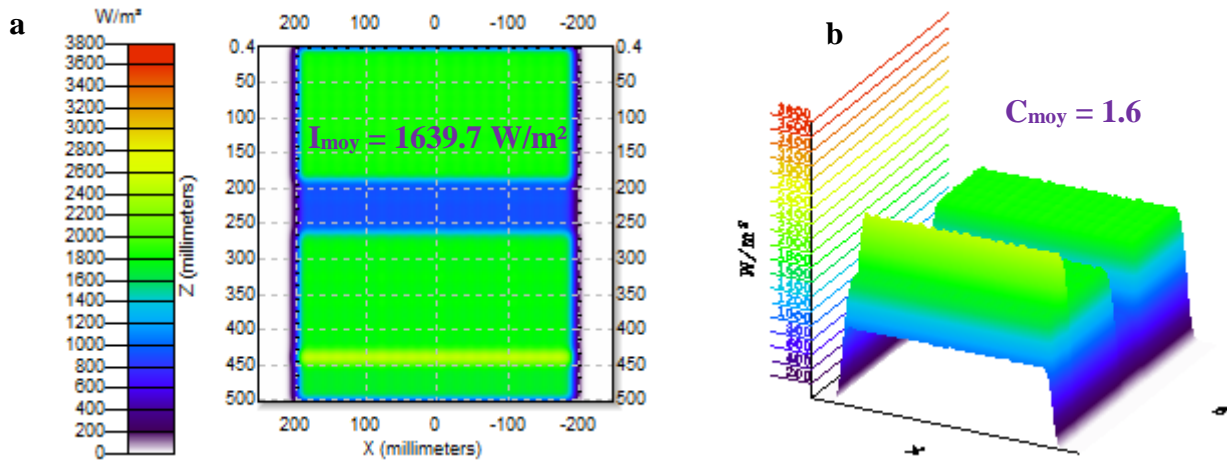


Fig 2.46: Résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec un réflecteur additionnel au mois de d'Avril: (a) distribution du rayonnement concentré; (b) relief représentatif du facteur de concentration.

2.4.3.3. Cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec poursuite 2D dans la direction N-S et E-O

Maintenant, on procède à la simulation du design final du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée proposé afin d'effectuer une poursuite à deux dimensions dans le plan Nord-Sud à l'aide du réflecteur principal et dans le plan Est-Ouest avec le réflecteur latéral, la simulation est réalisée pour le mois de Décembre et le mois de Juin à Ghardaïa. La figure (2.47) illustre la réception et la réflexion des rayons solaires par les parois et les réflecteurs du cuiseur pour les deux cas :

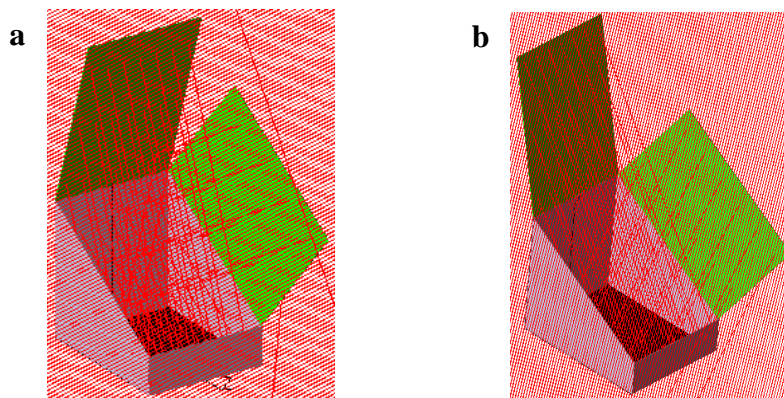


Fig 2.47: Tracé des rayons solaires pour la simulation optique du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs additionnels: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.

Les figures (2.48a) et (2.48b) représentent le comportement optique des rayons solaires reçus et réfléchis par les réflecteurs et les parois du cuiseur pour les mois de Décembre et Juin, respectivement. On remarque clairement que les résultats du design final sont satisfaisants pour les deux mois de

simulation, on retrouve un rayonnement moyen concentré de $I_{\text{moy}} = 1211 \text{ W/m}^2$ contre 1048 W/m^2 pour le cas avec un seul réflecteur, le facteur de concentration moyen est aussi intéressant ($C_{\text{moy}} = 2$).

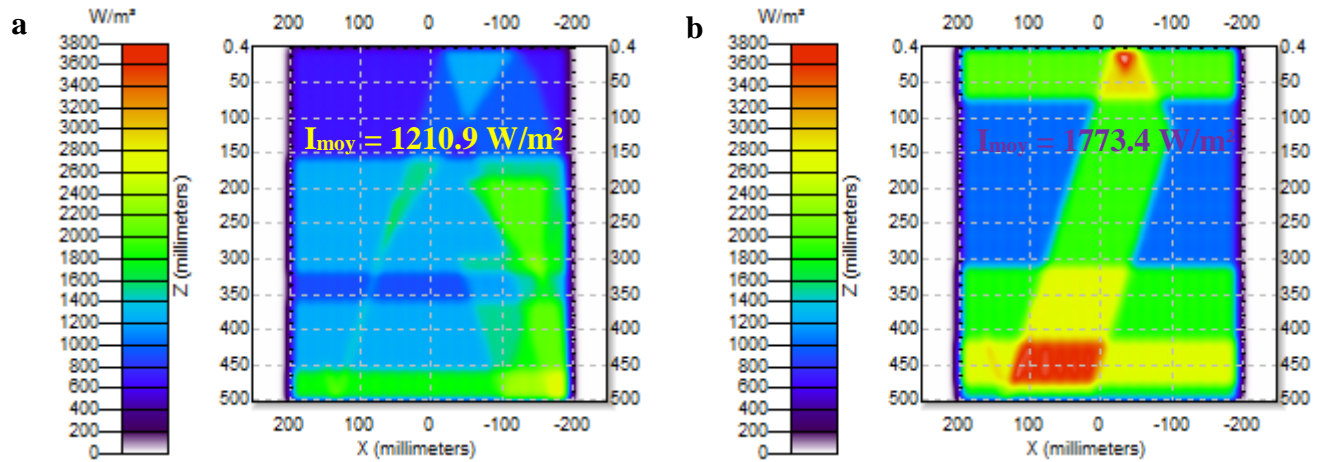


Fig 2.48: Résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs additionnels: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.

On réalise également la simulation du cuiseur boîte avec deux réflecteurs additionnels durant le mois de Mars (printemps). Les résultats de la simulation sont présentés sur la figure (2.49a). On peut facilement remarquer que la quasi-totalité de l'absorbeur est couverte par la réception et la réflexion des rayons solaires, ceci permet de récupérer une plus grande quantité d'énergie par rapport aux cas précédents. L'angle d'inclinaison du réflecteur principal est égal à $\approx 3^\circ$ pour le mois de Mars à midi, correspondant à une hauteur du soleil de 56° et un angle θ des rayons de $\approx 34^\circ$. Le facteur de concentration atteint 1.9 sur la quasi-totalité de l'absorbeur comme le montre la figure (2.49b) :

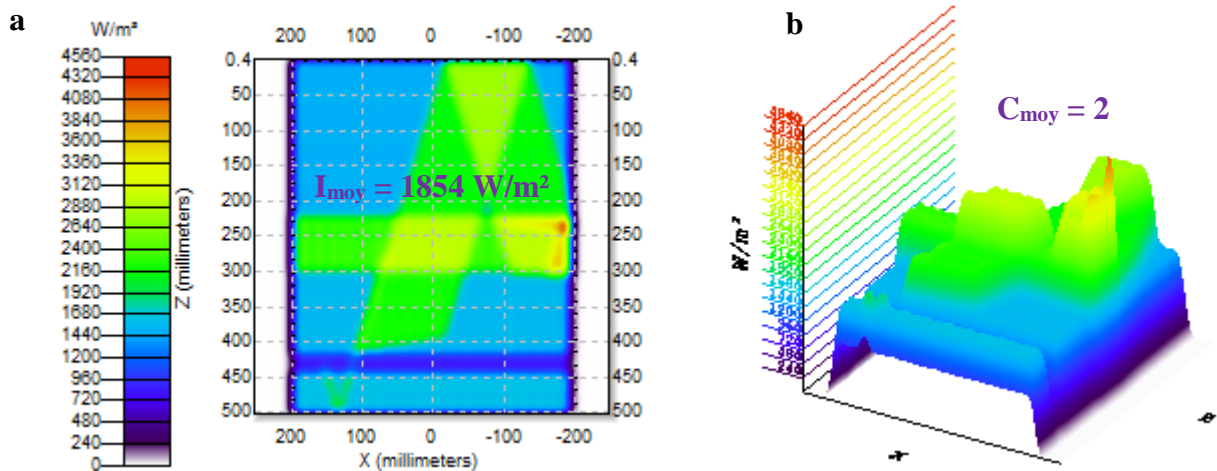


Fig 2.49: Résultats de la simulation du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs additionnels au mois de Mars: (a) distribution du rayonnement concentré; (b) relief représentatif du facteur de concentration.

2.5. REALISATION EXPERIMENTALE DU CUISEUR

2.5.1. Etapes de réalisation et caractéristiques du cuiseur boîte proposé

Les cuiseurs solaires boîtes sont relativement pas trop compliqués à construire avec des matériaux disponibles localement et pas trop chers et, leurs tailles ne sont pas très encombrantes. En se basant sur la conception mécanique et la simulation optique des cuiseurs, nous avons réalisé un premier cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée au niveau de l'URAER Ghardaïa. Un second cuiseur boîte à surface réceptrice horizontale est également réalisé, ce dernier permettra la comparaison des caractéristiques entre les deux cuiseurs [133].

La figure (2.50) est une illustration de quelques photos prises lors de la réalisation du cuiseur.

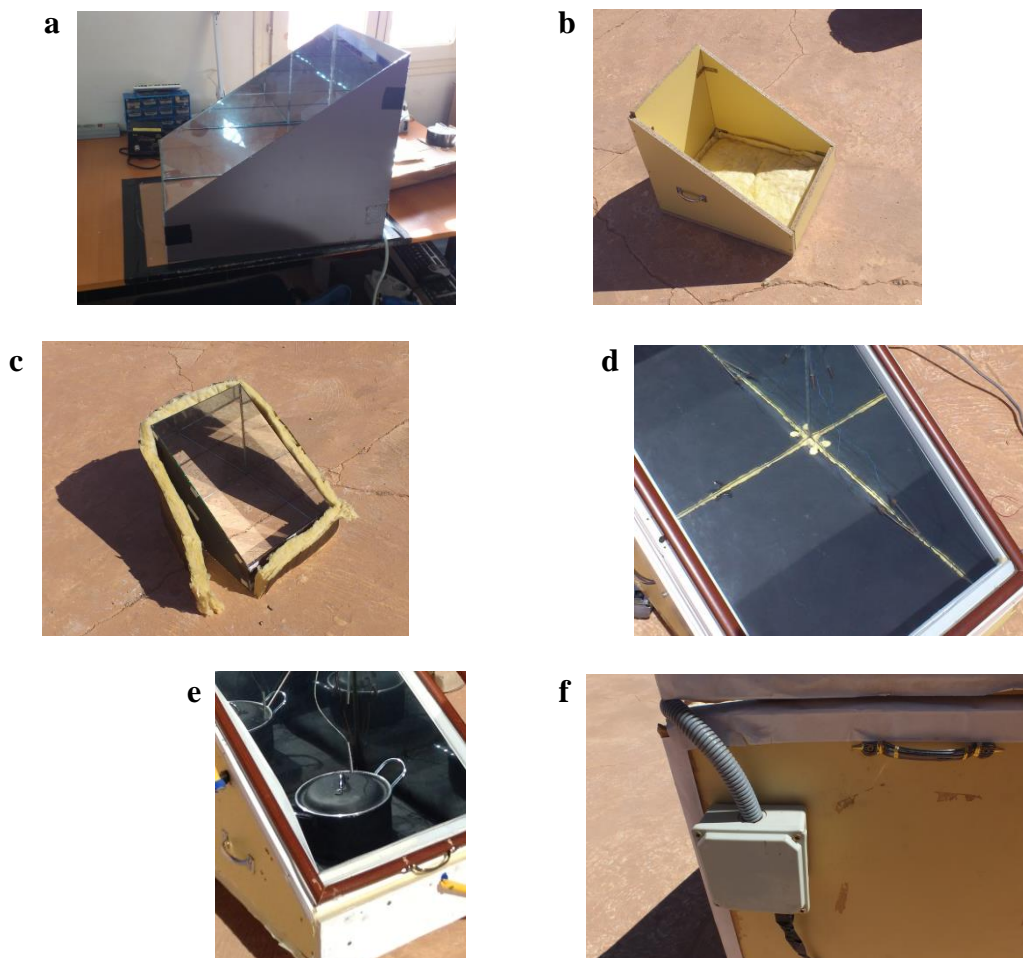


Fig 2.50: Etapes de réalisation du cuiseur solaire boîte: **(a)** Boîtier interne en verre; **(b)** dépôts de l'isolant sous la plaque absorbante; **(c)** Isolation du boîtier interne; **(d)** fixation de l'absorbeur en Aluminium; **(e)** Ajout de l'ustensile de cuisson peint en noir; **(f)** boîtier de dérivation.

Les étapes de réalisation ainsi que les caractéristiques du cuiseur sont les suivantes :

- Un boîtier en bois ;
- Surfaces intérieures réfléchissantes (miroirs) ;
- Isolation entre les miroirs et le boîtier avec la laine de verre ;
- Une plaque absorbante en Aluminium teintée en noir ;
- Surface réceptrice vitrée (simple vitrage), inclinée à 32°N ;
- Un ustensile de cuisson (pot) peint en noir mat ;
- Trois poignés rigides ;
- Un boîtier de dérivation facilitant l'acquisition de données.

2.5.2. Intégration des réflecteurs au cuiseur réalisé (booster mirrors)

Un réflecteur (booster mirror) augmentera le taux de captation des rayons solaires et conduira, de ce fait, à un rendement optique et thermique meilleur du cuiseur. Sur la base de la simulation optique déjà réalisée, nous avons décidé d'équiper notre cuiseur de deux réflecteurs additionnels: un réflecteur principal placé en haut du cuiseur et orienté vers le Sud et un réflecteur secondaire monté sur le côté du cuiseur et orienté vers l'Est. Après montage des réflecteurs, un dispositif mécanique assurant un réajustement flexible de l'angle d'inclinaison et une bonne fixation durant le fonctionnement s'avère nécessaire. Plusieurs solutions sont proposées et testées afin de trouver une solution optimale répondant le mieux à cette exigence. La technique adoptée consiste à l'utilisation d'un compas; de dimensions étudiés, pour chaque réflecteur (les compas sont ceux utilisés dans la géométrie mathématique), assurant l'articulation entre le corps du cuiseur et le réflecteur. Cette solution est très pratique pour une manipulation facile et fiable des réflecteurs, elle offre également la possibilité de donner un aspect pliable aux réflecteurs, ce qui permet d'avoir un cuiseur le moins encombrant possible avec un déplacement plus maniable.

La figure (2.51) montre quelques photos des cuiseurs après ajout des réflecteurs et le dispositif de réglage manuel (réalisation finale).

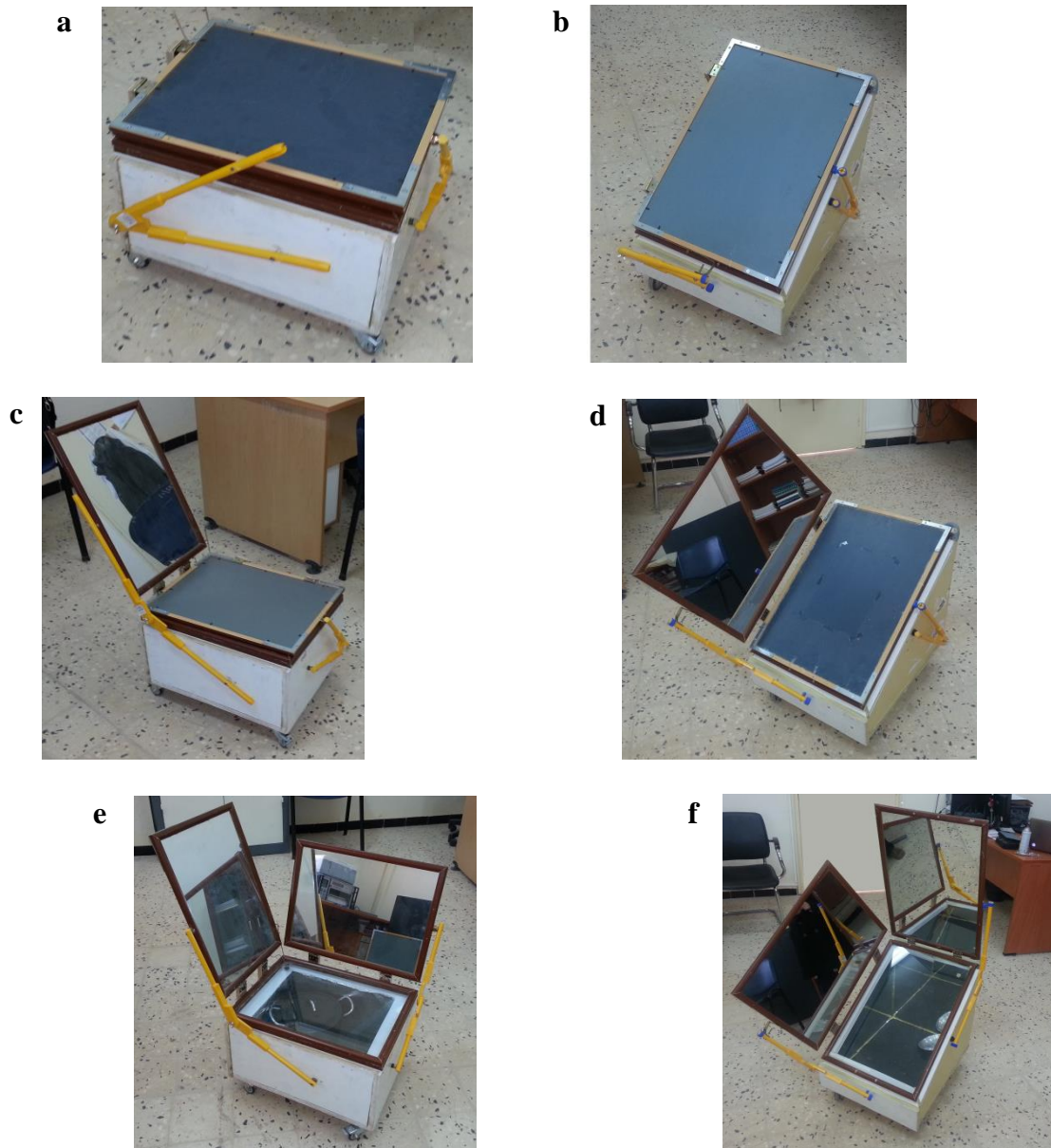


Fig 2.51: Vues des deux designs de cuiseurs solaires boîtes réalisés à URAER, Ghardaïa: **(a)** cuiseur boîte à surface réceptrice horizontale avec deux réflecteurs additionnels pliables; **(b)** cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec deux réflecteurs additionnels pliables; **(c)** cuiseur boîte à surface réceptrice horizontale avec réflecteur principal plié; **(d)** cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec réflecteur principal plié; **(e)** cuiseur boîte conventionnel avec deux réflecteurs en état fonctionnel; **(f)** cuiseur boîte proposé avec deux réflecteurs en état fonctionnel.

Les spécifications techniques du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée réalisé à Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa sont représentées sur le tableau 2.1.

<u>Dimensions du cuiseur</u>	
Boîte de cuisson	500 mm × 400 mm × 445 mm × 125 mm
Dimensions globales de la boîte	550 mm × 450 mm × 495 mm × 175 mm
Surface du cuiseur	0.20 m ² (A _{sc})
<u>Dimensions des réflecteurs</u>	
Miroir réflecteur	594 mm × 400 mm
Dimensions globales d'un réflecteur	640 mm × 450 mm
Surface réflecteur	0.21 m ² (A _r)
<u>Plaque absorbante</u>	
Matériau de l'absorbeur	Aluminium
Emissivité de l'absorbeur	0.9 (ε _p)
Absorptivité de l'absorbeur	0.93 (α _p)
Surface de l'absorbeur	0.20 m ² (A _p)
<u>Vitrage</u>	
Epaisseur du vitrage	3 mm
Emissivité du vitrage	0.85 (ε _v)
Surface de la vitre	0.21 m ² (A _v)
<u>Isolation</u>	
Matériau de l'isolant	Laine de verre (Glass wool)
Epaisseur de l'isolant	30 mm
Conductivité thermique	0.04 W/m ² /K (κ _{gw})
<u>Ustensile de cuisson</u>	
Matériau de l'ustensile	Aluminium
Dimensions de l'ustensile	180 mm × 100 mm
Surface de l'ustensile	0.025 m ² (A _u)
<u>Matériau utilisé pour la boîte extérieur</u>	Bois (Wood)
<u>Caractéristique de l'eau à chauffer</u>	4185 J kg ⁻¹ °C ⁻¹

Tab 2.1: Caractéristiques techniques du cuiseur boîte réalisé à l'URAER, Ghardaïa.

2.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté la partie pratique du travail en se basant sur la problématique discutée dans le précédent chapitre. En premier lieu, nous avons commencé par la conception mécanique des deux cuiseurs solaires boîtes en utilisant le logiciel SolidWorks. Après la conception, nous avons entamé la phase de simulation optique de l'énergie solaire incidente sur l'absorbeur des cuiseurs boîtes en utilisant le logiciel TracePro 7.0. Du point de vue optique; on peut

dire que le cuiseur solaire boîte à surface d'ouverture inclinée présente de meilleures caractéristiques comparé au cuiseur ordinaire, la surface tronquée permet de minimiser l'ombrage exercé sur une partie importante de la surface réceptrice de l'absorbeur, ce qui permet d'augmenter considérablement l'énergie reçue. Des réflecteurs additionnels sont ajoutés aux cuiseurs pour connaître leurs effets sur le comportement optique de l'éclairement solaire reçu. Diverses configurations techniques des réflecteurs ont été testées afin d'arriver au design final permettant une meilleure poursuite solaire du cuiseur dans les deux directions Nord-Sud et Est-Ouest. L'ajout des réflecteurs permet d'améliorer les performances optiques du cuiseur, avec deux réflecteurs ajoutés, la quasi-totalité de la surface de l'absorbeur est couverte par la réception et la réflexion de l'éclairement solaire, le facteur de concentration est multiplié par 2 au mois le plus défavorable de l'année en hiver. Au printemps comme en automne, la concentration est aussi importante, ce qui permet la cuisson durant toute l'année.

Suite aux résultats de la simulation, nous avons procédé à la phase réalisation des deux cuiseurs boîtes, des réflecteurs additionnels et du dispositif d'articulation permettant l'ajustement des réflecteurs à des angles adéquats. A la fin de la réalisation, nous avons obtenu deux cuiseurs solaires boîtes : le cuiseur solaire boîte avec nouveau design (surface inclinée et deux réflecteurs additionnels) et le cuiseur boîte classique, sur lequel nous allons établir une base de comparaison. Dans le prochain chapitre nous allons procéder à la caractérisation et l'évaluation des performances thermiques du cuiseur réalisé sur la base de divers tests expérimentaux réalisés à cet effet.

CHAPITRE 3

EVALUATION DES PERFORMANCES DU SYSTEME DE CUISSON SOLAIRE

3.1. INTRODUCTION

Dans le troisième chapitre, une évaluation des performances du cuiseur boîte réalisé est effectuée selon les Normes et les Standards Internationaux. Un schéma synoptique de la chaîne d'acquisition de données sera dressé et expliqué. Eventuellement, les instruments de mesure utilisés pour collecter les diverses paramètres seront présentés. Les températures mesurées au niveau du cuiseur à travers l'unité d'acquisition de donnée AGILENT 34972A [18]; à savoir : température de l'absorbeur, température du vitrage, température de l'air interne ...etc, seront visualisées numériquement et graphiquement sur l'écran d'un micro-ordinateur. Par ailleurs, des tests sont réalisés pour diverses configurations du cuiseur et durant plusieurs jours de l'année avec différentes conditions climatiques, le temps d'ajustement du cuiseur est effectué d'une manière bien étudiée. Les résultats issus des tests réalisés seront discutés et interprétés pour vérifier aussi bien le bon fonctionnement de l'ensemble et sa faisabilité/rentabilité. Les paramètres caractérisant le cuiseur suivant les Normes et les Standards Internationaux; à savoir : les figures of merits, la puissance de cuisson, temps d'ébullition.....etc, seront bien déterminés et la courbe caractéristique de notre cuiseur sera dressée selon les conditions climatiques locales (caractérisation du cuiseur), ajustée. Le rendement énergétique et exergétique du cuiseur sont également calculés et les paramètres indicateurs des performances du cuiseur seront ensuite déduits. Le chapitre se terminera par une validation des résultats obtenus à partir du système de cuisson réalisé par comparaison avec diverses réalisations à travers le monde est aussi envisagée.

3.2. TEMPS NECESSAIRE D'AJUSTEMENT DU CUISEUR

La quantité d'énergie produite par les cuiseurs solaires boîtes dépend de la quantité de lumière à laquelle ils sont exposés. Comme la position du soleil change durant journée et afin de collecter un maximum d'éclairement concentré, les cuiseurs doivent être réorientés constamment (à plusieurs reprises) vers le soleil en poursuivant sa course durant la période de cuisson, afin de minimiser l'ombrage causé par les parois du cuiseur sur l'absorbeur (Fig 3.1). Si on considère les deux principaux types de cuiseurs : les boîtes et les paraboles, le suivi continu reste encore difficile, notamment quand

le cuiseur est chargé (cas des cuiseurs boîtes) et lorsque un dispositif manuel est utilisé (cas des cuiseurs paraboliques). Un système de poursuite automatique à l'aide de vérins ou moteurs électriques n'est pas intéressant pour des raisons de rentabilité dans le cas des cuiseurs boîtes et pour des raisons de coût et de complexité dans le cas des cuiseurs paraboliques. Dans la plupart des cas une poursuite manuelle est exercée à différents intervalles pendant la durée de cuisson. Les performances des cuiseurs solaires peuvent être optimisées si les cuiseurs sont orientés de manière efficace de telle sorte que les rayons solaires incidents tombent sur les récepteurs avec un angle d'incidence nul, par conséquent, les pertes optiques seront minimisées.

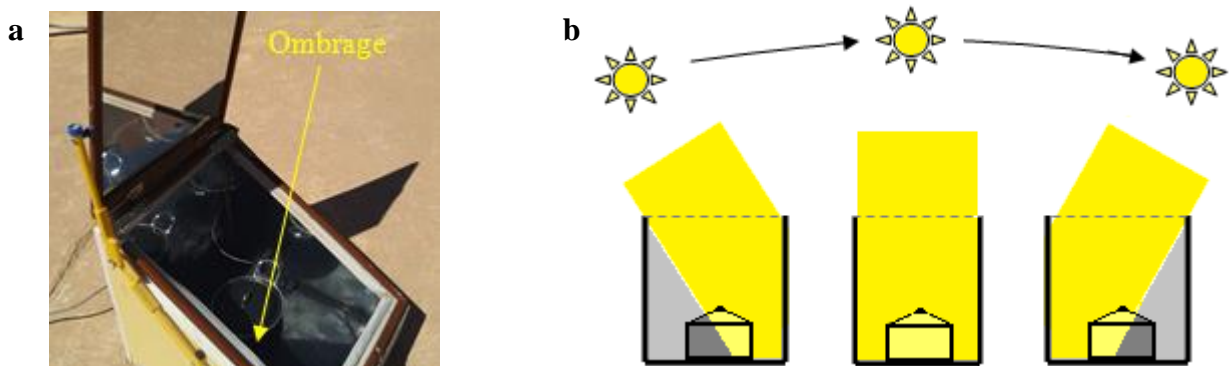


Fig 3.1: Illustration de l'effet du non-ajustement des cuiseurs boîtes: (a) ombrage exercé sur l'absorbeur; (b) différentes positions par rapport au soleil.

3.2.1. Principe du suivi continu du soleil

Des systèmes permettent de suivre la course du soleil au cours de la journée, afin de minimiser l'angle d'incidence. Il s'agit de l'angle d'incidence des rayons du soleil sur un plan lié au système, ce plan étant le récepteur lui-même ou le support du récepteur (systèmes à concentration). Ces systèmes sont classés selon le nombre d'axes (un ou deux) et le mode de suivi (continu ou quotidien) [23]. Le principe du suivi par mouvement autour d'un axe, est d'orienter à chaque instant le plan récepteur par rotation autour de l'axe de telle sorte que la normale du plan soit constamment dans le plan formé par l'axe et la direction du soleil. Avec un système à deux degrés de liberté, on peut suivre la direction du soleil pour obtenir une incidence constamment normale. Dans les applications utilisant des systèmes à concentration qu'ils soient de type parabolique ou cylindro-parabolique, on s'intéresse généralement à un suivi du soleil continu à un seul ou deux axes en considérant les cas suivants:

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

$$\cos(\delta_i) = \left[1 - \{\cos(\delta)\sin(\omega)\}^2 \right]^{0.5} \quad (3.1)$$

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

$$\text{Cos}(\delta_i) = \left[1 - \{ \text{Cos}(\delta) \text{Sin}(\varphi) \text{Cos}(\omega) - \text{Sin}(\delta) \text{Cos}(\varphi) \}^2 \right]^{0.5} \quad (3.2)$$

Suivi continu à deux axes (poursuite intégrale) :

$$\text{Cos}(\delta_i) = 1 \quad (3.3)$$

3.2.2. Méthode proposée

Dans le but de l'évaluation des performances du cuiseur boîte réalisé, on se propose dans cette partie du travail, de déterminer le temps d'ajustement adéquat d'un cuiseur boîte afin de minimiser les pertes optiques et de remédier; de ce fait, au problème de rester sous le soleil durant la cuisson pour la réorientation du cuiseur, ce qui constitue un des problèmes majeurs de la cuisson solaire. A titre comparatif, on calculera le temps d'ajustement pour un cuiseur boîte (CSB) par rapport à un cuiseur parabolique (CSP), la méthode proposée pour cela consiste à la détermination des temps d'ajustements par l'estimation des pertes optiques des récepteurs à partir de la simulation optique des rayons solaires au niveau de ces derniers, les récepteurs constituent l'absorbeur et le point focal dans le cas du cuiseur boîte et du cuiseur parabolique, respectivement [134].

3.2.2.1. Équations mathématiques

Dans le cas du cuiseur boîte on utilisera les équations citées précédemment pour recalculer la position du booster mirror pour chaque ajustement du cuiseur (Fig 3.2a).

Selon Duffie et Beckman [135], la position optimal d'un concentrateur à réflecteur parabolique peut être défini par deux angles: α' (inclinaison du plan) et β' (orientation du plan). Pour un suivi continu à deux axes, la position du cuiseur est déterminée; en fonction de l'angle zénithale θ_z et l'angle azimutale θ_{az} , de la manière suivante:

$$\alpha' = \theta_z \quad \text{et} \quad \beta' = \theta_{az} \quad (3.4)$$

Dans le cas des cuiseurs paraboliques, il est très délicat de maintenir l'image du spot lumineux pointée sur le point focal, ceci nécessite un ajustement plus fréquent (instantané) du réflecteur. Cependant, on pourrait adopter comme solution le déplacement du récipient de cuisson d'une distance f du point focal F (Fig 3.2b), ceci permettra d'augmenter la surface de la zone du point focal et minimiser les interventions humaines en matière d'ajustement, par conséquent le facteur de concentration se trouve amélioré considérablement.

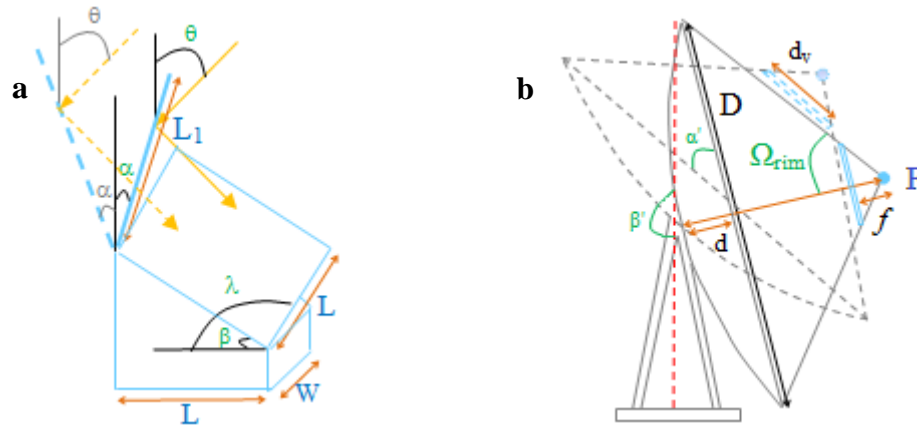


Fig 3.2: (a) Position du miroir réflecteur d'un cuiseur solaire boîte, (b) position du récipient de cuisson par rapport au point focal du cuiseur solaire parabolique.

Les équations mathématiques calculant la distance f du point focal F sont données ci-après :

$$\tan \Omega_{rim} = \frac{d_v / 2}{f} = \frac{D / 2}{F - d} \quad (3.5)$$

L'équation paramétrique de la parabole est calculée de la manière suivante :

$$d = \frac{1}{4F} \cdot \frac{D^2}{2} \quad (3.6)$$

En utilisant l'équation (3.6) et en résolvant l'équation (3.5), on obtient la distance du point focal f du vertex de la parabole comme suit :

$$f = \frac{(F - d) \cdot d_v}{D} \quad (3.7)$$

3.2.2.2. Simulation de la réflexion des rayons solaires

Après export des modèles de cuiseurs boîte et parabolique conçu sur logiciel SolidWorks [13] sous format .igs au logiciel TracePro [14], nous avons procédé à la simulation du trajet optique des rayons solaires incidents sur les deux cuiseurs en insérant les coordonnées de la source de lumière; qui est le disque solaire, et l'intensité de l'éclairement solaire. En employant la méthode ray-trace, le faisceau de lumière est défini par 500 x 500 lignes, le cuiseur boîte considéré est de dimensions définies par notre étude au chapitre précédent, le cuiseur parabolique est d'une ouverture D d'1 m et d'une longueur focale F de 500 mm. L'absorbeur du cuiseur boîte et la surface focale du cuiseur parabolique sont considérés comme des absorbeurs parfaits et le booster miroir ainsi que le collecteur parabolique ont une réflectivité de 100 %.

Pour réaliser les simulations, il est important de bien choisir et calculer les angles d'inclinaisons (α , α' et β') pour les deux cuiseurs, une minuscule erreur va conduire à la réduction du nombre de rayons concentrés. La figure (3.3) est un exemple de représentation de ce cas de figure pour le cuiseur boîte, la figure (3.4) représente la simulation des rayons concentrés au niveau du foyer d'un cuiseur parabolique avec une déviation des rayons concentrés due à la non-normale incidence.

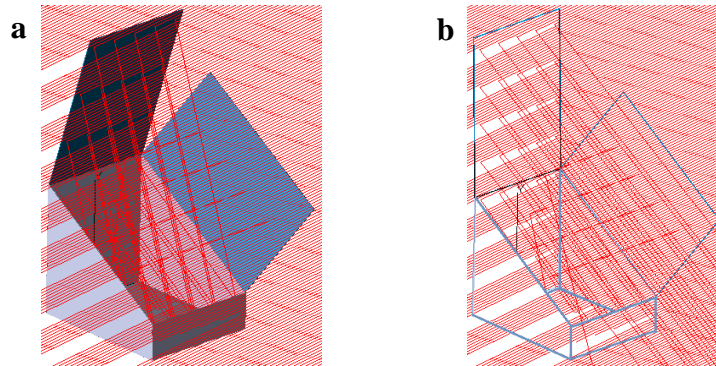


Fig 3.3: Exemple de schéma des rayons concentrés dans le cas du cuiseur solaire boîte: **(a)** direction correcte; **(b)** direction incorrect des rayons.

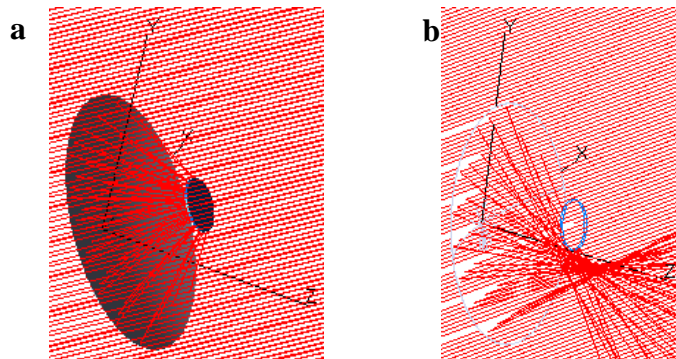


Fig 3.4: Exemple de schéma des rayons concentrés dans le cas du cuiseur solaire parabolique: **(a)** le collecteur est orienté directement vers le soleil, **(b)** la collecteur est mal orienté.

3.2.3. Distribution du flux solaire sur les récepteurs

Pour cela, nous avons réalisé la simulation des deux cuiseurs pour un jour d'hiver type à partir de 12 h jusqu'à 12:45 h, et nous relevons les résultats chaque 5 minutes. La distribution de l'éclairement solaire au niveau de l'absorbeur du cuiseur boîte et du foyer du cuiseur parabolique est illustrée sous forme d'éclairement concentré sur la figure (3.5) avec simulation réalisée le 23 Décembre.

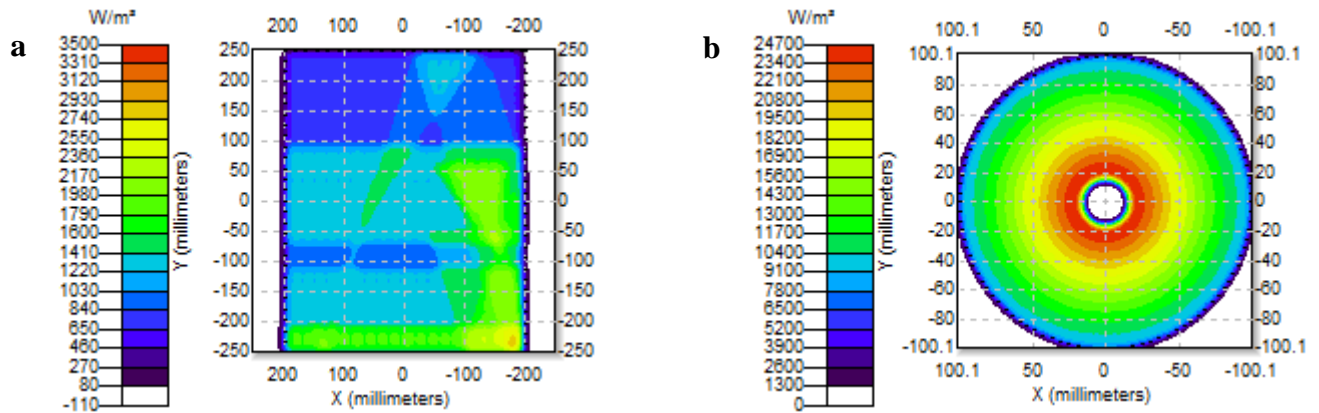


Fig 3.5: Le profil de l'éclairement concentré au niveau: **(a)** de l'absorbeur du cuiseur solaire boîte; **(b)** du foyer du cuiseur solaire parabolique, le 23 décembre à 12 h.

Nous avons bien constaté que l'énergie concentrée dépend des pertes au niveau des récepteurs, ces pertes optiques augmentent progressivement dépendant de la position du soleil. Dans leur position plein Sud à midi (TSV), les cuiseurs offrent de bonnes performances, ces performances diminuent considérablement après 30 minutes; par exemple, sans ajustement. Pour cela les deux cuiseurs ont besoin d'être ajustés de leurs positions initiales à de nouvelles positions, les angles (α , α' et β') sont égales à $\approx (17^\circ, 13^\circ$ et $34^\circ)$ le 23 Décembre à midi, respectivement. La figure (3.6) illustre les résultats de simulation de la distribution des rayons solaires au niveau des deux cuiseurs le 23 Décembre à 12:30 h.

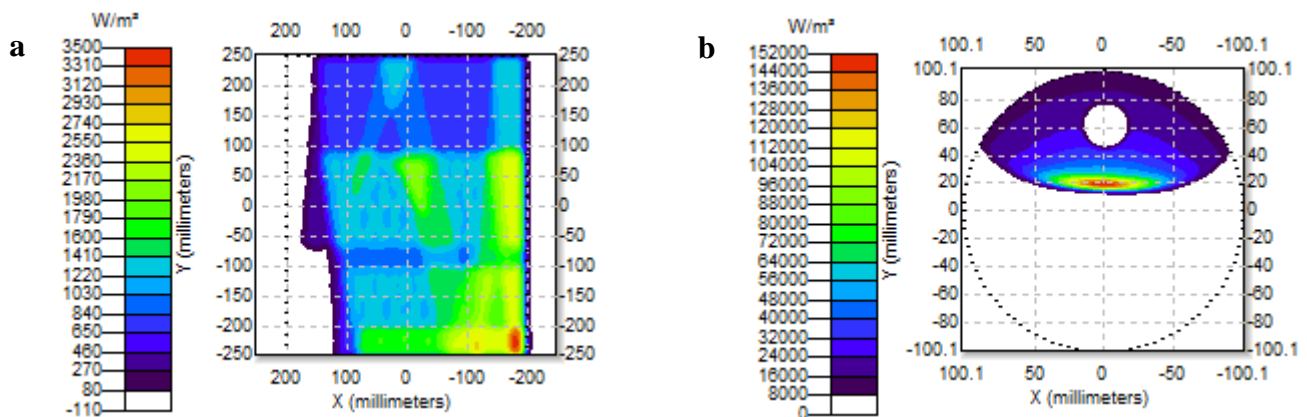


Fig 3.6: Résultats de simulation de la distribution du flux des rayons solaires: **(a)** sur l'absorbeur du cuiseur solaire boîte; **(b)** sur le foyer du cuiseur solaire parabolique, le 23 décembre à 12:30 h.

3.2.4. Détermination du temps pour l'ajustement du cuiseur

Pour calculer le temps optimum d'ajustement, nous avons fait l'estimation de ces pertes optiques au niveau des récepteurs des cuiseurs chaque 5 minutes comme le montre les résultats du tableau 3.1, où Inc_p , Inc_b représentent les rayons incidents sur le cuiseur parabolique et le cuiseur boîte (réflecteurs inclus), Inc_f , Inc_a représentent les rayons incidents sur le foyer de la parabole et l'absorbeur de la boîte,

los_f , los_a sont les pertes optiques au niveau du foyer et de l'absorbeur, qui se calculent par l'équation (3.8) ci-après. Les pertes optiques au niveau de l'absorbeur du cuiseur boîte sont estimées entre 3.3 et 229.4 W, par contre elle variant entre 23.4 et 51.2 W au niveau du foyer du cuiseur parabolique pendant la même durée de temps (entre 12 h à 12:30 h).

$$los_{(f,a)} = \text{abs}[\text{Inc}_{(f,a)} - \text{Inc}_{(p,b)}] \quad (3.8)$$

Temps	Cuiseur solaire parabolique			Cuiseur solaire boîte		
	Inc_p	Inc_f	los_f	Inc_b	Inc_a	los_a
12:00	702.5	699.2	3.3	458.1	434.7	23.4
12:05	702.4	658.1	44.3	460.0	433.2	26.7
12:07	702.3	641.2	61.2	461.3	433.1	28.2
12:08	702.2	633.0	69.1	462.1	433.1	29.0
12:10	702.1	617.3	84.8	463.5	432.9	30.6
12:15	701.5	578.8	122.7	466.7	431.8	34.9
12:20	700.1	541.2	158.9	470.4	430.3	40.1
12:25	698.6	504.5	194.1	473.5	428.2	45.3
12:30	696.8	467.4	229.4	477.1	425.9	51.2
12:45	690.6	348.5	342.1	486.3	415.3	71.0

Tab 3.1: Energie solaire concentrée au niveau du cuiseur boîte et du cuiseur parabolique, pertes optiques au niveau de l'absorbeur et du foyer des cuiseurs, respectivement. Tous les paramètres sont en W.

La figure (3.7) compare la variation des pertes optiques au niveau de l'absorbeur du cuiseur boîte et du foyer du cuiseur parabolique en fonction du temps pour le 23 Décembre entre 12 h et 12:45 h (voir Tab 3.1). Si on assume (à partir des observations expérimentales) que les pertes los_f et los_a au niveau des récepteurs des deux cuiseurs augmentent considérablement en un intervalle de temps d'une demi-heure et sachons que au-delà de 10% des pertes optiques totales (calculées à partir de l'équation (3.9) ci-après), l'énergie concentrée au niveau des récepteurs diminue de manière à affecter négativement le rendement thermique des cuiseurs, on déduit alors à partir de la figure (3.7) que le cuiseur boîte a besoin d'être réajusté chaque 20 minutes au max, par contre le cuiseur parabolique nécessite un ajustement et doit être réorienter chaque un intervalle de 8 min max.

$$\text{los}_{\text{rate}} (\%) = \frac{\text{los}_{(f,a)}}{\text{Inc}_{(f,a)}} \cdot 100 \quad (3.9)$$

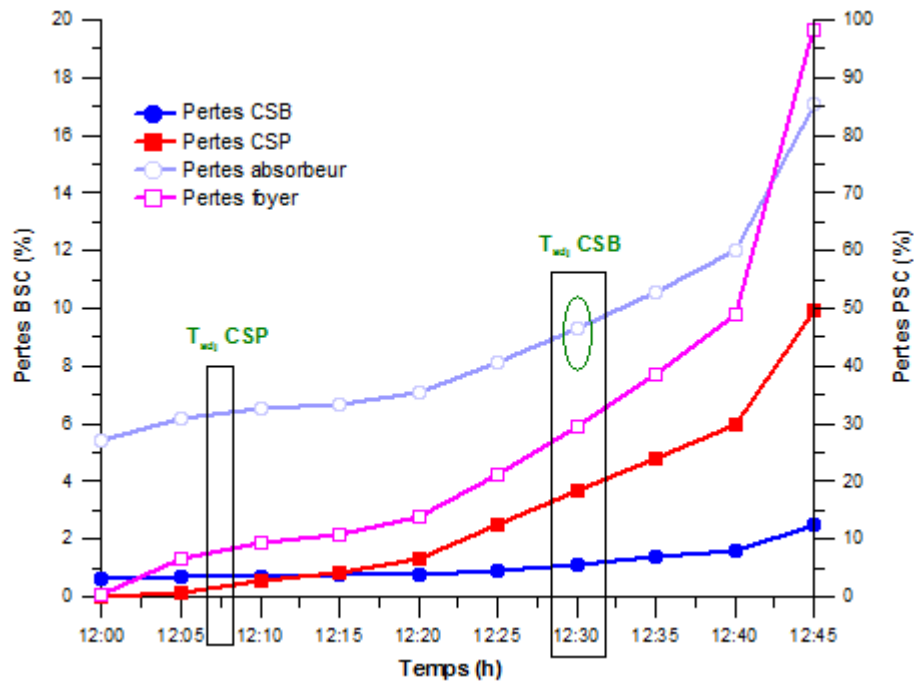


Fig 3.7: Variation des pertes optiques au niveau de l'absorbeur du cuiseur boîte et du foyer du cuiseur parabolique en fonction du temps de la journée, durant le solstice d'hiver.

Selon les résultats, on peut dire qu'un temps d'ajustement du cuiseur boîte adéquat (chaque 20 min) associé à un choix d'angle correct d'inclinaison du miroir réflecteur; qui a pour but l'acheminement des rayons solaires vers l'absorbeur, assurant une poursuite parfaite des variations journalières de la position du soleil (poursuite latitudinale et azimutale), de sorte que le cuiseur soit exposé en plein soleil à tout moment, permet d'améliorer la quantité de l'éclairement concentré reçu sur l'absorbeur et d'augmenter le facteur de concentration, elle permet également de minimiser les pertes optiques du cuiseur pour un rendement thermique meilleur. Sur la figure (3.8) on donne un exemple de tracé graphique illustrant les pertes thermiques importantes dans le cas de l'utilisation du cuiseur sans ajustement (voir l'après-midi).

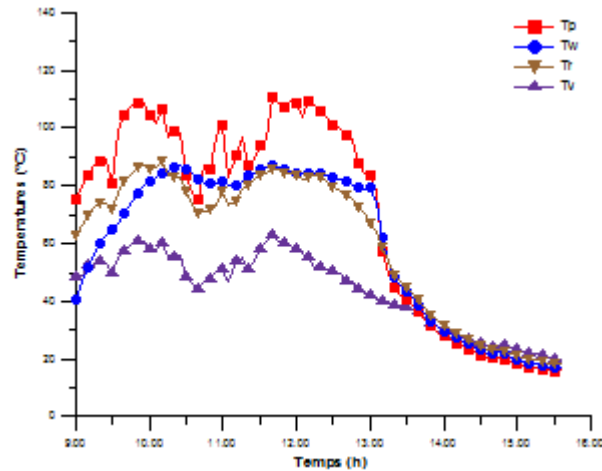


Fig 3.8: Evolution du profil des températures dans le cas d'un test du cuiseur boîte sans ajustement.

Afin de procéder à l'évaluation des performances thermiques du cuiseur réalisé on donne sur le tableau 3.2 les angles d'inclinaison du miroir réflecteur calculés pour le site de Ghardaïa (Lat = 32°):

Mois/ N° jour	Heure	δ	γ_s	θ_{az}	θ	α_H	α_I
Mars (75)	10:00	-1.78	45.52	-45.51	44.48	-0.35	9.65
	12:00	-1.78	55.74	0.00	34.26	-7.16	2.84
Juin (162)	10:00	23.08	61.96	-78.07	28.04	-11.30	-1.30
	12:00	23.08	80.60	0.00	9.40	-23.73	-13.73
Septembre (259)	10:00	2.69	49.02	-49.60	40.98	-2.68	7.32
	12:00	2.69	60.21	0.00	29.79	-10.14	-0.14
Décembre (345)	10:00	-22.99	27.57	-31.28	62.43	11.62	21.62
	12:00	-22.99	34.53	0.00	55.47	6.98	16.98

Tab 3.2: Calcul de l'angle d'inclinaison du miroir réflecteur du cuiseur solaire boîte à surface d'ouverture horizontale (α_H) et du cuiseur solaire boîte à surface d'ouverture inclinée (α_I), pour quelques jours type de l'année en fonction des paramètres de position du soleil.

3.3. ACQUISITION DE DONNEES

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

Le contrôle du comportement thermique du cuiseur solaire nécessite un suivi régulier des températures à plusieurs points du cuiseur durant son fonctionnement (Fig 3.9a). Pour cela, divers capteurs sont utilisés pour la mesure des températures, liés à une unité d'acquisition de données. D'autres dispositifs sont nécessaires tel qu'un pyranomètre pour la mesure de l'éclairement solaire

global, direct et diffus, une station météorologique professionnelle pour la mesure de la vitesse, la direction du vent et l'humidité. Les données collectées; en temps réel, sont affichées sous forme numérique et graphique (Fig 3.9b) et sauvegardées sur un fichier qu'on peut importer sur Excel.

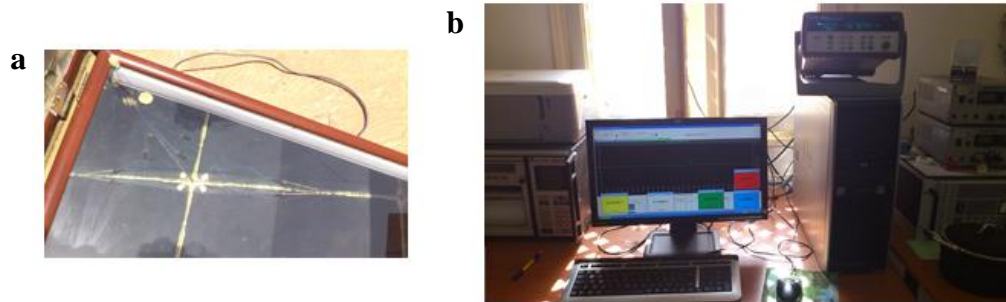


Fig 3.9: Chaîne de mesure et acquisition de données: (a) implémentation des capteurs de mesure; (b) affichage des températures acquises.

3.3.2. Schéma synoptique de la chaîne de mesure

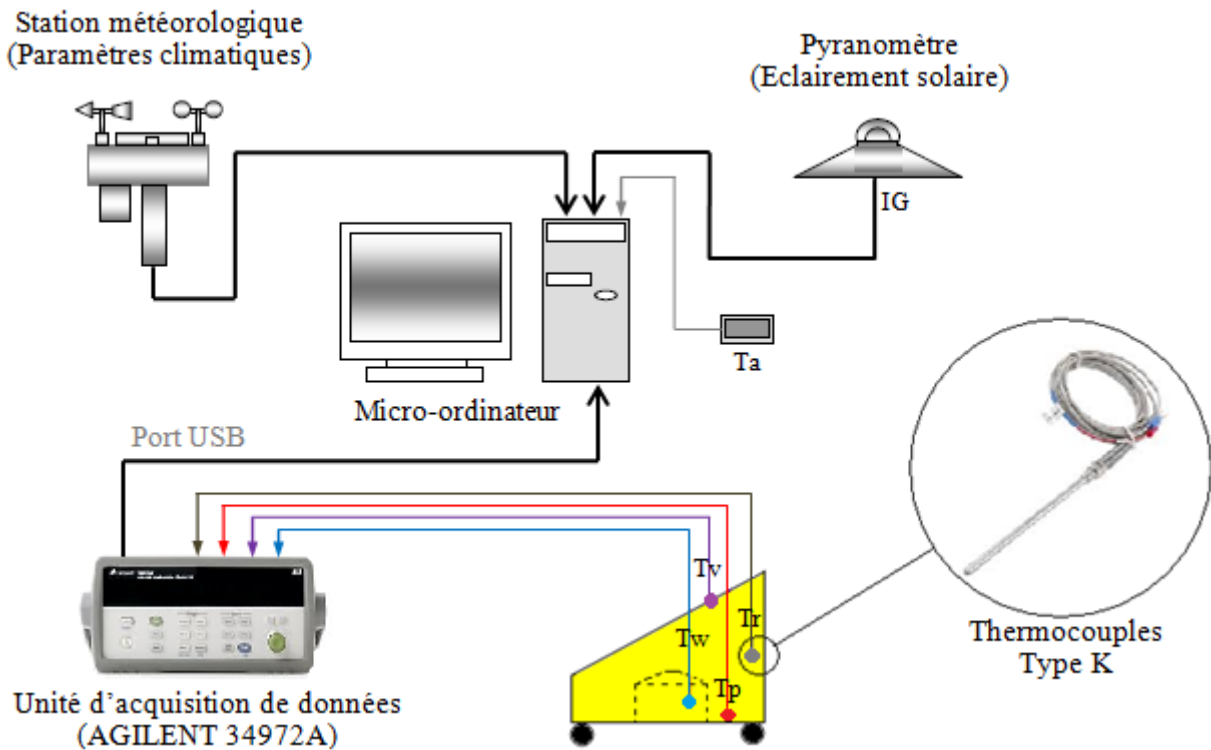


Fig 3.10: Schéma synoptique de l'installation du cuiseur solaire boîte.

La figure (3.10) ci-après représente le schéma synoptique de notre installation, cette dernière comporte plusieurs thermocouples de Type K implémentés à divers endroits du cuiseur solaire, d'autres capteurs permettant la mesure des paramètres climatiques (température ambiante, éclairement solaire et vitesse du vent) sont utilisés, liés à une unité d'acquisition de données de type AGILENT 34972A [18],

connectée à son tour à un micro-ordinateur par le baie d'un port USB. Le port USB, permet un grand nombre d'application avec une faible contrainte d'encombrement au point de vue fils de connexion.

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

- Thermocouple Type K pour mesurer les températures à différents endroits du cuiseur.
- Pyranomètre pour mesurer l'éclairement solaire.
- Station météorologique (mesure des paramètres climatiques ...etc.).
- Unité d'acquisition de donnée de type Agilent 34972A.

3.3.3. Quelques résultats des tests préliminaires (profil des températures)

Après l'étalonnage et la configuration de notre unité d'acquisition de donnée, nous avons lancé les premiers tests afin de vérifier le bon fonctionnement de l'installation. On donne ici un exemple des données collectées par le système d'acquisition installé correspondants à la préparation du café presse durant deux moments différents de la journée. Les mesures sont effectuées chaque 1 min et sont suivantes : la température ambiante (T_a), la température de la vitre (T_v), la température de l'air intérieur (T_r), la température de la plaque absorbante (T_p) [133].

La figure (3.11) représente l'évolution de l'éclairement global, direct et diffus mesurés à l'URAER, Ghardaïa pour une journée du printemps, qui est un jour perturbé par des passages nuageux, l'éclairement diffus est dominant notamment durant la matinée. Pour l'après-midi, la valeur de l'éclairement global atteint les 600 W/m².

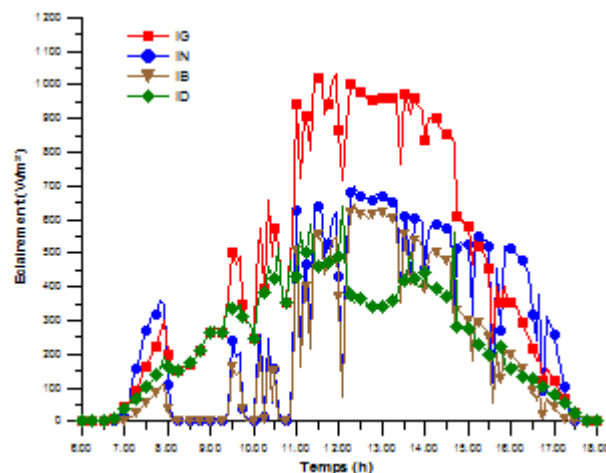


Fig 3.11: Eclairements solaires global, diffus et direct incident sur un plan horizontal (jour nuageux).

Le premier test est effectué la matinée entre 10 h et midi, un ajustement du cuiseur est assuré chaque 20 min pour permettre de poursuivre la course du soleil. Les résultats de ce test sont représentés sur la figure (3.12) ci-après. La figure (3.12a) montre la variation des températures des éléments du cuiseur ainsi que la température ambiante en fonction du temps au cours du test de préparation du café presse sous un ciel nuageux. Nous pouvons remarquer que l'allure des températures mesurées est non uniforme, les valeurs de ces dernières fluctuent en fonction de l'éclairement solaire. Par conséquent, l'évolution du phénomène de l'effet de serre à l'intérieur du cuiseur se trouve influencée et l'absorbeur n'a pu atteindre les 100 °C qu'après un temps de 1 heure 20 min (113 °C max), la préparation du café n'est réalisée qu'après 45 minutes passées.

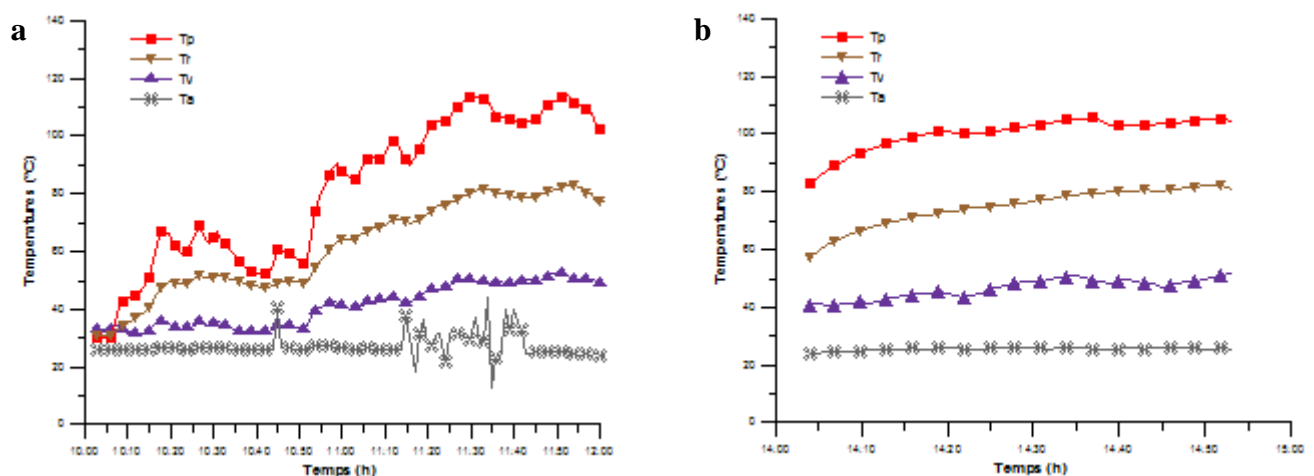


Fig 3.12: Evolution des températures mesurées: **(a)** pour le test du matin (ciel très nuageux); **(b)** pour le test de l'après-midi (ciel peu nuageux).

Le second test est réalisé l'après-midi entre 14 h et 15 h, un ajustement du cuiseur est effectué chaque 20 min. La figure (3.12b) représente la variation des températures au cours du test. L'allure des températures est uniformément ascendante du faite que : entre 14 h et 14:30 h le ciel été dégagé. On peut remarquer qu'au début du test (14 h), les valeurs mesurés étaient loin des valeurs initiales de la température ambiante, ceci est dû au faite que le cuiseur à subit une période du préchauffage avant le début du test. On peut remarquer également que la température de l'absorbeur ne dépasse pas les 100 °C, pourtant le ciel est moins nuageux par rapport au test du matin, ceci à pour cause la hauteur du soleil, qui diminue progressivement l'après-midi influençant l'intensité de l'éclairement solaire qui devient de plus en plus faible. La préparation du café est réalisée au bout de 30 minutes.

3.4. EVALUATION DES PERFORMANCES THERMIQUES DU CUISEUR

3.4.1. Les Normes Indiennes de Mullick et le Standard Européen de Funk

Il est connu que le rendement thermique d'un cuiseur solaire de type boîte dépend des paramètres climatiques tels que l'éclairement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent ...etc., ainsi que des paramètres propre au design conçu tel que les matériaux utilisées pour l'isolation, les propriétés de la plaque absorbante, le nombre de vitrage et l'utilisation des miroirs réflecteurs. Le test et l'évaluation des performances thermiques des cuiseurs solaires sont nécessaires pour la caractérisation de ces dispositifs, leurs résultats fournissent une base de comparaison avec différents autres modèles. Mullick et al. ont développé une procédure de test thermique pour les cuiseurs solaires boîtes [136]. Selon cette procédure, une méthode d'essai complète suivant la Norme IS13429: 2000 est disponible pour le test de ces systèmes [137]. Suivant cette Norme, deux principaux tests sont effectués (un test de stagnation et un test de chaleur sensible) pour la détermination des deux paramètres de performance thermique (figures of merits, F_1 et F_2) sur la base des relevés des profils thermiques sans tenir compte de l'effet du miroir réflecteur. La Norme indienne IS13429 [138] propose des limites normalisées pour les valeurs inférieures de F_1 et F_2 , qui sont 0.12 et 0.40 pour une charge de 8 kg/m², respectivement. En outre, une méthode de test des cuiseurs solaires a été également suggérée par Funk [139, 140]; Suivant ce Standard, les performances des cuiseurs solaires sont déterminées par deux paramètres, à savoir, la puissance de cuisson ajustée (P_{adj}) et le coefficient total de pertes thermiques (U_L). Cette section comprend les différentes formules; selon les Normes Indiennes et le Standard Européen, permettant la détermination des paramètres des performances thermiques à partir des relevés des profils des températures.

3.4.2. Evaluation des performances selon les paramètres des Normes Indiennes

3.4.2.1. Détermination du paramètre 'First figure of merit'

Selon le BIS [138] et Mullick et al. [136], le test de stagnation sur un cuiseur solaire de type boîte est mené pour l'évaluation de la première figure of merit F_1 , qui est définie comme le rapport entre le rendement optique η_0 et le coefficient global de pertes thermiques U_L . Pour déterminer la première figure of merit, le cuiseur solaire de type boîte; sans aucune charge, doit être exposée à l'éclairement solaire, permettant à la température de la plaque d'augmenter progressivement. A l'instant de stagnation, l'intensité de l'éclairement solaire global, la température de la plaque, la température ambiante et la vitesse du vent seront relevés à un intervalle de temps fixe. Expérimentalement, F_1 est

une mesure de la différence de température gagnée par la plaque absorbante à un stade particulier de l'éclairement solaire; elle est donnée par la relation suivante:

$$F_1 = \frac{\eta_o}{U_L} = \frac{T_{ps} - T_{as}}{I_s} \quad (3.10)$$

Où η_o et U_L sont respectivement le rendement optique et le coefficient global de pertes thermiques du cuiseur. T_{ps} , T_{as} et I_s sont la température de l'absorbeur, la température ambiante et l'éclairement solaire incident sur une surface horizontale, respectivement au moment de stagnation.

3.4.2.2. Détermination du paramètre 'Second figure of merit'

La seconde figure of merit F_2 est dérivée du test de chaleur sensible sous des conditions de pleine charge. Ce test nous donne des indications concernant le transfert de chaleur entre l'absorbeur du cuiseur boîte et l'eau à chauffer à l'intérieur de l'ustensile de cuisson. Pour déterminer la seconde figure of merit F_2 , le cuiseur sans réflecteur doit être chargé avec une quantité d'eau bien connue, soit 8 kg/m² de surface d'ouverture qui doivent être répartis de manière égale dans tous les ustensiles. La température de l'eau doit être ensuite laissée pour augmenter progressivement jusqu'à atteindre le point d'ébullition. La seconde figure of merit F_2 est obtenue en utilisant la relation suivante [136, 137]:

$$F_2 = \frac{F_1 (mc_p)_w}{A_{sc} \tau} \ln \left[\frac{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{wi} - \bar{T}_a}{\bar{I}_s} \right)}{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{wf} - \bar{T}_a}{\bar{I}_s} \right)} \right] \quad (3.11)$$

Avec: A_{sc} : La surface d'ouverture du cuiseur solaire boîte;

$(mc_p)_w$: La capacité thermique de l'eau dans le récipient de cuisson, m_w : masse ou quantité d'eau;

τ : L'intervalle de temps pendant lequel la température de l'eau augmente de T_{wi} à T_{wf} ;

T_{wi} : La température initiale de l'eau (60 °C);

T_{wf} : La température finale de l'eau (90 °C);

\bar{T}_a : La température ambiante moyenne;

\bar{I}_s : L'éclairement solaire moyen reçu par une surface horizontale.

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

Selon les Normes de Mullick [136], en plus de la première figure of merit F_1 et la seconde figure of merit F_2 , 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 (3.11) de la manière suivante:

$$\tau = \frac{-F_1 (mc_p)_w}{F_2 A_{sc}} \ln \left[\frac{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{wf} - \bar{T}_a}{\bar{I}_s} \right)}{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{wi} - \bar{T}_a}{\bar{I}_s} \right)} \right] \Rightarrow \tau_{\text{boil}} = \frac{-F_1 (mc_p)_w}{F_2 A_{sc}} \ln \left[1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{100 - T_a}{\bar{I}_s} \right) \right] \quad (3.12)$$

Ce temps est fonction de $\left(\frac{100 - T_a}{\bar{I}_s} \right)$, le tracé de τ_{boil} en fonction de $\left(\frac{100 - T_a}{\bar{I}_s} \right)$ réfère à une courbe qui est désignée sous le nom de la courbe caractéristique du système de cuisson.

3.4.3. Evaluation des performances selon les paramètres du Standard Européen

3.4.3.1. Calcul de la puissance de cuisson (Cooking power)

Les performances thermiques des cuiseurs solaires peuvent être également évaluées selon la procédure du Standard International développé par Funk [139]. Selon ce Standard, la puissance de cuisson P du cuiseur solaire peut être calculée quand une masse d'eau bien déterminée est maintenue à l'intérieur de l'ustensile de cuisson et le cuiseur solaire est mis en service selon certaines conditions décrites dans le Standard de Funk [139]. Et comme l'eau va se réchauffer durant le fonctionnement, sa température moyenne est surveillée et relevée pendant une durée de temps de 10 min durant un intervalle particulier ($\Delta t = 600$ s). Quand la température de l'eau atteint les 95 °C ou quand 4 heures de temps sont écoulés du début du test, l'expérimentation est arrêtée (l'une ou l'autre des deux conditions est satisfaite). La puissance moyenne délivrée durant cet intervalle est exprimée par la formule suivante:

$$P = \frac{(mC_p)_w \cdot (T_{wf} - T_{wi})}{\Delta t} \quad (3.13)$$

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

Funk [139] 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'éclairiments, la puissance de cuisson ajustée est donnée par l'équation (3.14), où \bar{I}_s est l'éclairiment solaire moyen, I_n est l'éclairiment solaire standardisé à 700 W/m².

$$P_{adj} = P \frac{I_n}{\bar{I}_s} \quad (3.14)$$

Selon les tests de ce Standard (Protocole), la vitesse du vent doit être inférieure à 1 m/s et la température de l'eau à l'intérieur des pots de cuisson doit être relevée entre 40 et 90 °C. La température ambiante et l'éclairiment solaire doivent être compris entre 20 à 35 °C et 450 à 1100 W/m², respectivement. Pour la surface d'ouverture du cuiseur, 7 kg d'eau /m² doit être réparti uniformément dans les ustensiles. La surface d'ouverture du cuiseur est définie comme la somme de la surface des réflecteurs et la surface d'ouverture du cuiseur projetée sur le plan perpendiculaire à l'éclairiment direct normal.

3.5. EVALUATION THERMODYNAMIQUE DES CUISEURS SOLAIRES

3.5.1. Concept énergie/exergie

Les performances thermiques des cuiseurs solaires peuvent être déterminées par une analyse approfondie des caractéristiques optiques et thermiques des matériaux constituant le cuiseur et de la conception de son design ou à travers des tests expérimentaux extensifs des performances sous des conditions contrôlées. L'analyse énergétique et exergétique est un autre moyen qui permet d'évaluer et comparer les cuiseurs solaires [141]. Comme l'ont souligné Panwar et al. [84], l'étude et l'expérimentation des systèmes utilisant l'énergie solaire selon les lois de la thermodynamique ont attiré l'attention de nombreux chercheurs à travers le monde, ce concept a été largement discuté par plusieurs scientifiques et a été l'objet de synthèse par Bejan [142, 143] et Petela [144]. Cependant, la première étude sur l'analyse énergétique et exergétique des cuiseurs solaires a été menée par Ozturk [145]. Il a été souligné dans son article que l'analyse exergétique convient le mieux et elle est plus pratique que l'analyse énergétique pour la prédiction du rendement du cuiseur solaire. Actuellement; à travers le monde, l'analyse thermodynamique des performances des cuiseurs solaires est considérée comme le moyen le plus efficace de l'obtention des informations précises sur les rendements énergétiques et les pertes dues à l'irréversibilité dans des situations réelles.

3.5.2. Analyse énergétique et exergétique

3.5.2.1. Détermination du rendement énergétique du cuiseur

L'analyse énergétique est la méthode habituelle de l'évaluation de la manière dont l'énergie est utilisée dans une opération incluant les traitements physiques ou chimiques des matériaux et le transfert et/ou de la conversion d'énergie [146]. Analyse énergétique est basée sur la première loi de la thermodynamique, c'est à dire la chaleur nette fournie par un processus est convertie en travail. L'analyse énergétique ne tient donc pas en compte les réductions en terme de potentiel énergétique. Cette analyse peut fournir des conseils pour une gestion correcte dans les applications où l'efficacité de l'utilisation dépend uniquement des quantités d'énergies. Ainsi, l'évaluation énergétique est adaptée pour le dimensionnement et l'analyse des systèmes utilisant une seule forme d'énergie [147]. Ces cuiseurs solaires dont l'énergie d'entrée dépend de la taille du collecteur (A_{sc}), et de l'intensité de l'éclairement solaire (I_s) peut être exprimée comme suit:

$$E_i = I_s \cdot \Delta t \cdot A_{sc} \quad (3.15)$$

L'énergie de sortie d'un cuiseur solaire dépend de la quantité d'eau (m_w) ou des aliments à cuire et de la différence de température. L'énergie de sortie peut être calculée comme suit:

$$E_o = (mc_p)_w \cdot (T_{wf} - T_{wi}) \quad (3.16)$$

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 (3.17) ci-dessous:

$$\eta = \frac{E_o}{E_i} = \frac{(mc_p)_w \cdot (T_{wf} - T_{wi})}{I_s \cdot \Delta t \cdot A_{sc}} \quad (3.17)$$

3.5.2.2. Détermination du rendement exergétique du cuiseur

Comme l'ont noté Panwar et al. en 2013 [146], le terme exergie est défini comme la quantité maximale de travail qui peut être obtenu à partir d'un système [148]. L'analyse exergétique décrite par Szargut et al. [149] donne toujours une base supplémentaire pour l'interprétation de la qualité du processus considéré. L'analyse exergétique implique l'examen de l'exergie à différents points dans une série de conversion d'énergie (détermination des rendements significatifs), ainsi que les étapes contenant beaucoup de pertes. Ceci est basé sur la seconde loi de la thermodynamique et la notion de production d'entropie irréversible [150, 148]. Il s'agit; de ce fait, d'une véritable mesure des

performances, c'est un outil très utile pour améliorer les performances d'un système en déterminant la grandeur de pertes en énergie dans le système [84].

Dans un processus en écoulement; en régime permanent, durant un intervalle de temps fini, le bilan exergetique global du cuiseur solaire peut être écrite comme suit:

$$\text{Exergy input} = \text{Exergy Output} + \text{Exergy Loss} \quad (3.18)$$

L'expression suivante pour le flux d'énergie disponible, qui est très répondu, est utilisée pour calculer l'exergie de l'éclairement solaire (exergie d'entrée au cuiseur solaire).

$$\Xi_i = I_s \cdot \Delta t \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_o}{T_s} \right)^4 \right] A_{sc} \quad (3.19)$$

La température du corps noir du soleil de 5762 K résulte en un spectre solaire concentré dans la bande de longueurs d'onde de $0,3 \pm 3,0$ pm [151]. Bien que la température de surface du soleil (T_s) peut variée à la surface de la terre en raison de la distribution spectrale, la valeur de 5800 K peut être considérée pour T_s .

L'exergie thermique de l'énergie thermique à la température T est:

$$\epsilon = \int_{T_o}^T (mc_p) \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) dQ \quad (3.20)$$

L'équation (3.20) peut être appliquée pour les processus non-isothermes. Ainsi, la teneur en exergie thermique de l'eau à la température T_i peut être calculée par l'équation (3.21).

$$\epsilon_w (T_i) = (mc_p)_w \cdot [(T_{wf} - T_o) - T_a \cdot \ln(T_{wi} / T_o)] \quad (3.21)$$

Lorsque la température de l'eau est portée à la température finale T_f , l'exergie est:

$$\Delta \epsilon_w = \epsilon (T_{wf}) - \epsilon (T_{wi}) \quad (3.22)$$

Ainsi, l'exergie de sortie du cuiseur solaire boîte est calculée en utilisant l'équation (3.23) ci-dessous:

$$\Xi_o = (mc_p)_w \cdot \left[(T_{wf} - T_{wi}) - T_{ra} \cdot \ln \left(\frac{T_{wf}}{T_{wi}} \right) \right] \quad (3.23)$$

Il est à noter que lors du calcul de l'exergie de sortie du cuiseur solaire boîte par l'équation (3.23), la valeur de T_{ra} est considérée comme la température ambiante de référence pendant l'intervalle de temps donné. Dans l'équation (3.23), les températures sont en K.

Le rendement exergetique est un rapport entre le taux de transfert de l'exergie associée à la sortie par rapport à la vitesse de transfert de l'exergie associé à l'entrée [152]. Kaushik et Gupta [148] ont défini le rendement exergetique (ψ) d'un cuiseur solaire boîte comme le rapport de l'exergie de sortie du cuiseur (Ξ_o) (augmentation de l'exergie de l'eau due à l'élévation de température) à l'exergie de l'entrée du cuiseur (Ξ_i) (exergie de l'éclairement solaire). Ainsi, le rendement exergetique est donné par:

$$\psi = \frac{\text{exergy output}}{\text{exergy input}} = \frac{\Xi_o}{\Xi_i} = \frac{(mc_p)_w \cdot [(T_{wf} - T_{wi}) - T_a \cdot \ln(T_{wf} / T_{wi})]}{I_s \cdot \Delta t \cdot [1 - (4T_a / 3T_s) + (T_a / 3T_s)^4] A_{sc}} \quad (3.24)$$

3.6. TESTS EFFECTUES ET DISCUSSION DES RESULTATS

3.6.1. Description des tests effectués et données expérimentales utilisées

Les tests expérimentaux ont été réalisés à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables, située à Ghardaïa, Sud de l'Algérie (32.39 °N, 3.78 °E, 463 m au niveau de la mer) de 8 h à 17 h (ALT) [153-156]. Au cours de la période expérimentale, la température ambiante (T_a), la température de l'eau dans les pots (T_w), la température de l'air à l'intérieur de la boîte (T_r), la température du couvercle en verre (T_v), la température de la plaque absorbante (T_p), l'éclairement solaire total incident sur la surface horizontale de l'absorbeur, (I_s), et la vitesse du vent (W_s) ont été relevés et enregistrés à un intervalle de temps régulier. L'éclairement solaire global incident sur une surface horizontale a été mesuré à l'aide d'un pyranomètre Kipp & Zonen CMP21 et l'éclairement solaire direct normal est mesuré avec un pyrhéliomètre K & Z CHP1, en W/m^2 . La vitesse du vent (en m/s) a été mesurée en utilisant un anémomètre NRG 40H. La précision de l'anémomètre est de l'ordre de $1\% \pm 0.1$ m/s. Pour les tests 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 à l'intérieur des cuiseurs boîtes et sont utilisés pour mesurer la température au niveau du vitrage, de l'absorbeur, et des températures de l'air intérieur. Un thermocouple spécial a été inséré depuis un trou percé dans le couvercle du cuiseur 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 un système d'acquisition de données par ordinateur (data-logger AGILENT 34972A) pour un intervalle de 5 minutes. Lors des expérimentations, l'utilisation et l'ajustement des angles des miroirs réflecteurs est nécessaires selon le besoin et l'orientation du cuiseur est réalisée d'une manière adéquate [134].

Durant l'expérimentation des cuiseurs, il existe de fortes chances de commettre des erreurs et des incertitudes de mesure et ceci est peut-être dû au type d'instrumentation, aux conditions climatiques, aux méthodes d'étalonnages, aux méthodes d'observations et aux méthodes de test [157, 146]. Les incertitudes expérimentales et la plage de fonctionnement de différents paramètres mesurés lors de nos expériences sur les cuiseurs solaires sont présentées sur le tableau 3.3.

Paramètres	Incertitudes	Plage de fonctionnement
Incertitude sur la mesure de l'éclairement solaire global	$\pm 2\%$	-40°C à +80°C 310 à 2800 nm
Incertitude sur la mesure de l'éclairement solaire direct normal	$\pm 1\%$	-40°C à +80°C 200 à 4000 nm
Incertitude sur la mesure des températures	$\pm 0.3^\circ\text{C}$ à 25°C	-40°C à +70°C
L'incertitude sur la mesure de la vitesse du vent	< 0.1 m/s au-delà de 5 à 25 m/s	1 à 96 m/s

Tab 3.3: Incertitudes et plages de fonctionnement des paramètres expérimentaux.

3.6.2. Comparaison entre caractéristiques des deux cuiseurs réalisés

Cette partie concerne l'expérimentation des deux cuiseurs solaires boîtes réalisés, le premier cuiseur est avec surface d'ouverture ordinaire et le second cuiseur est avec surface d'ouverture inclinée. Une étude comparative des performances des deux cuiseurs est réalisée en fonction de deux principaux paramètres: la première figure of merit F_1 et la seconde figure of merit F_2 tel que décrit par le Bureau des Normes Indiennes (BIS) [136, 137]. L'effet de l'ajout des miroirs réflecteurs a été également analysé dans cette session [153]. La figure (3.13) représente les deux types de cuiseurs réalisés fonctionnant sous les mêmes conditions.

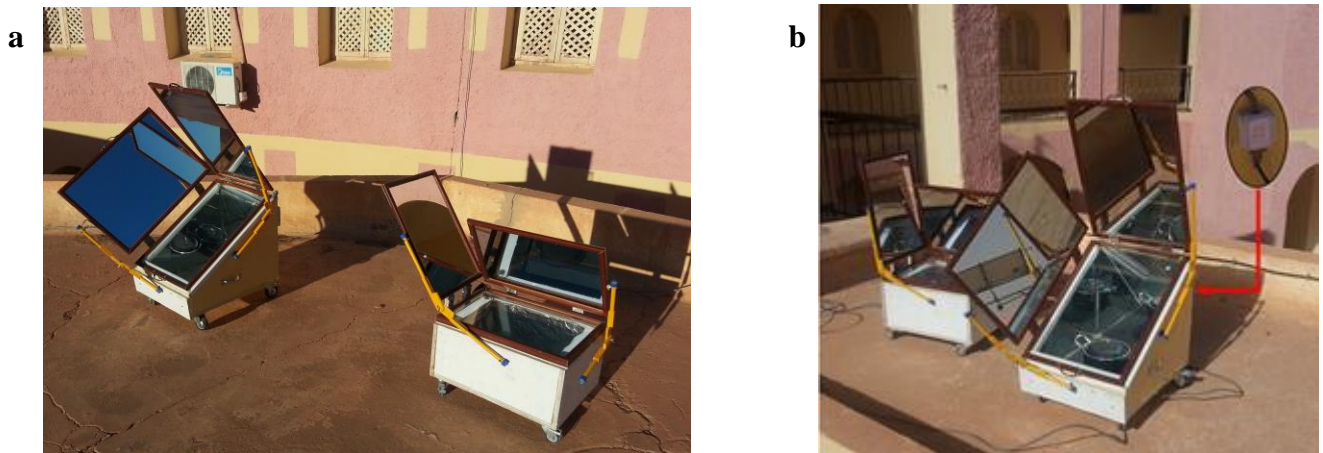


Fig 3.13: Vue des cuiseurs boîtes réalisés avec surface réceptrice horizontale et surface réceptrice inclinée mis en service lors des tests de comparaison à l'URAER, Ghardaïa: **(a)** orientation des cuiseurs suivant une saison hivernale; **(b)** orientation des cuiseurs suivant une saison estivale.

Les profils des températures des deux cuiseurs solaires boîtes mesurées expérimentalement et relevées à l'extérieur (en plein air) pour évaluer les performances des deux systèmes de cuisson solaires peuvent être classés; selon les conditions des tests, en trois catégories: les tests sans charge et sans réflecteurs, des tests avec charge et sans réflecteurs, et des tests avec charge d'eau et avec réflecteurs. Pour l'ensemble des tests, les cuiseurs solaires sont restés fermés, des orientations des cuiseurs; afin de suivre les mouvements du soleil, sont réalisées chaque 20 min de temps avec un ajustement régulier des positions des miroirs réflecteurs dans le but d'assurer un maximum de réflexion des rayons sur les absorbeurs des deux cuiseurs.

3.6.2.1. Profil des températures pour le test sans charge d'eau et sans réflecteurs

Ce test est effectué pour déterminer la première figure of merit F_1 . Les deux cuiseurs sans réflecteurs et sans ustensile sont laissés exposés au rayonnement solaire entre 10 h et 16 h. Les températures des plaques absorbantes (T_p) ont été enregistrées chaque intervalle de 5 min jusqu'à atteindre l'état de stagnation. Les valeurs de l'intensité de l'éclairement solaire (I_s) et de la température ambiante (T_a) ont également été mesurées. Les résultats de ce test sont illustrés sur les courbes de la figure (3.14), obtenus dans des conditions de test de stagnation pour un jour d'hiver type (Février 2013).

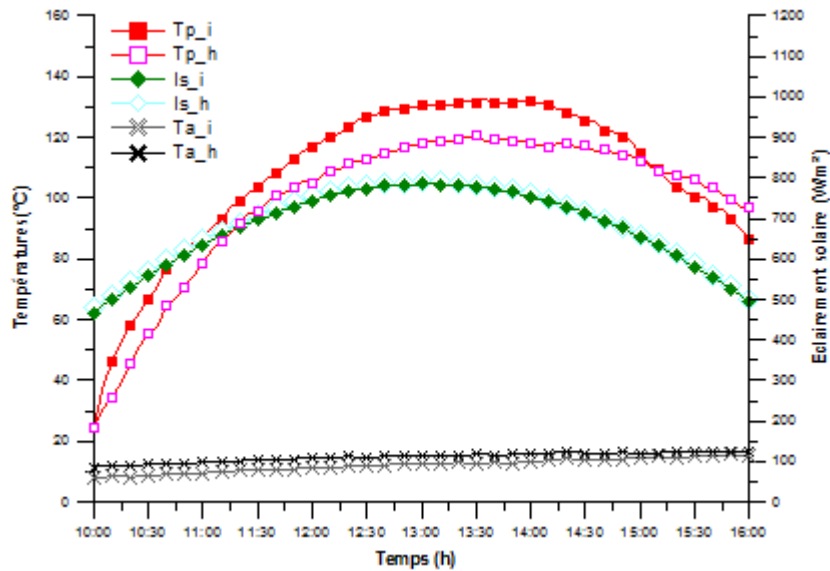


Fig 3.14: Variation des températures mesurées à différents endroits des cuiseurs correspondant à un éclairement solaire global du 14 Février 2013 pour le cuiseur ordinaire et du 10 Février 2013 pour le nouveau cuiseur, utilisées pour déterminer la première figure of merit.

3.6.2.2. Profil des températures pour le test avec charge d'eau et sans réflecteurs

Ce test est effectué pour déterminer la seconde figure of merit F_2 . Les cuiseurs solaires sans réflecteurs ont été chargés d'une quantité bien déterminée d'eau. Selon la Normes BIS, cette expérience doit être menée dans les 2 heures précédant midi solaire, avec une intensité d'éclairement solaire supérieure ou égale à 600 W/m^2 . Il est également recommandé que la quantité de la charge d'eau doit être calculée en fonction de 8 kg d'eau/m^2 du cuiseur et doit être également répartie dans les récipients.

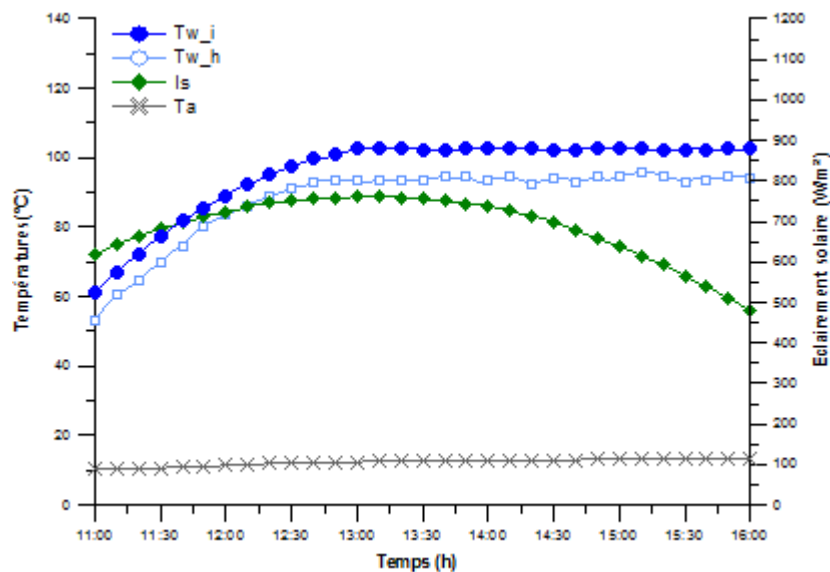


Fig 3.15: Variation des températures de l'eau mesurées dans les ustensiles des deux cuiseurs et variation de l'éclairement solaire global correspondant (du 17 Février 2013), utilisées pour déterminer la seconde figure of merit.

Dans le présent test, la quantité d'eau normalisée est égale à 1,6 kg, qui sera distribué dans deux récipients de cuisson. Les valeurs des températures relevées instantanément sont calculées en moyen chaque 10 min d'intervalle. Les valeurs de l'éclairement solaire (I_s), la température de l'air ambiant (T_a), et la température de l'eau (T_{wi} , T_{wf}) sont enregistrées pour les deux cuiseurs jusqu'à ce que la température de l'eau de chaque cuiseur dépasse les 95 °C. La figure (3.15) présente la variation des températures de l'eau avec le temps, dans les ustensiles de cuisson pour les mêmes conditions de test de chaleur sensible pendant une journée ensoleillé du 17 Février 2013.

3.6.2.3. Profil des températures pour le test avec charge d'eau et avec réflecteurs

Ce test est effectué pour déterminer l'effet des miroirs réflecteurs sur les performances des cuiseurs solaires. Ainsi, des tests sont réalisés pour plusieurs jours clairs sans, avec un seul et avec deux réflecteurs, les cuiseurs sont chargés avec une quantité d'eau (1 litre) et exposés au rayonnement solaire de 9 h du matin à 16 h l'après-midi. Les réflecteurs ont été placés sur le bord supérieur et le coté de chaque cuiseur avec des armatures permettant le réglage de l'angle d'inclinaison. Les données suivantes ont été relevées à un intervalle régulier de 5 minutes: la température de la plaque absorbante (T_p), la température de l'eau dans les pots (T_{wf}), la température ambiante (T_a) et l'éclairement solaire (I_s) pour chaque test et chaque cuiseur. Les profils thermiques des différentes températures relevées sont représentés sur la figure (3.16), obtenus durant trois jours typiques d'hiver en Février 2013.

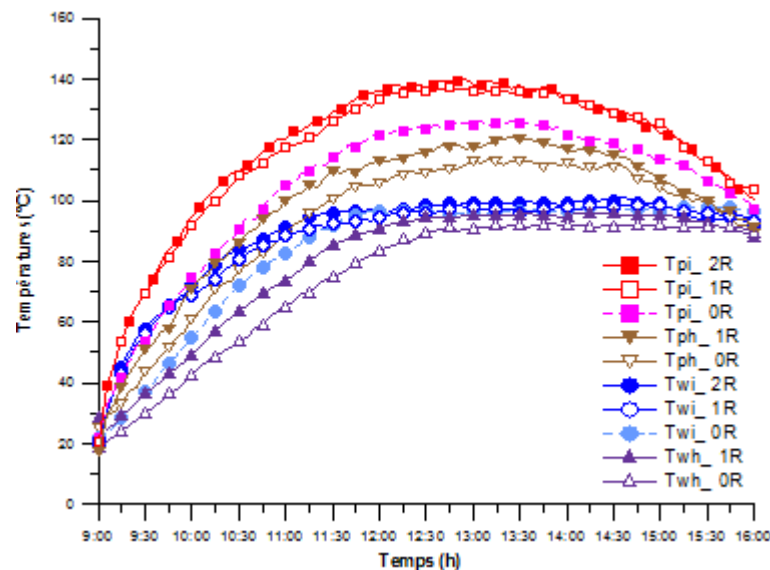


Fig 3.16: Variation des températures mesurées de l'absorbant, des températures de l'eau en fonction de l'heure locale, pour les deux cuiseurs boîtes dans le cas sans, avec un seul et avec deux réflecteurs.

3.6.2.4. Résultats des tests de stagnation de température (Calcul de F_1)

La figure (3.14) représente les variations journalières de l'éclairement solaire global incident sur une surface horizontale, les variations de la température ambiante et la température de la plaque de l'absorbeur des deux cuiseurs pour le test sans charge et sans réflecteur. Il est clair que; durant les deux jours de tests sélectionnés, l'intensité de l'éclairement solaire augmente avec le temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale aux environs de 13 h (après midi solaire).

Suivant les tests expérimentés sur les cuiseurs solaires, nous avons calculé la première figure of merit, $F_1 = 0.13 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$ avec les valeurs de $T_{ps} = 118 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{as} = 15.4 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_s = 764.5 \text{ W}/\text{m}^2$ et $F_1 = 0.15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ avec les valeurs de $T_{ps} = 130.6 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{as} = 12.4 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_s = 758.9 \text{ W}/\text{m}^2$ à partir de l'équation (3.10) pour le cuiseur solaire à surface d'ouverture horizontale et pour le cuiseur solaire avec surface d'ouverture inclinée, respectivement. Ces valeurs sont en parfaite concordance avec les valeurs recommandées par les Normes BIS pour les cuiseurs solaires boîtes. A partir de ces résultats, il est clair que le cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée à une valeur de la première figure of merit F_1 supérieure à celle du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice horizontale et donc il présente de meilleure performance.

3.6.2.5. Résultats des tests de chaleur sensible (Calcul de F_2)

A partir des courbes des de chaleur sensible présentés sur la figure (3.15) et calculés depuis l'équation (3.11), la seconde figure of merit $F_2 = 0.38$ en utilisant $F_1 = 0.13 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$, $m_w = 1 \text{ kg}$, $c_{pw} = 4200 \text{ J}/\text{kg}^\circ\text{K}$, $A_{sc} = 0.2 \text{ m}^2$, $\tau = 105 \text{ min}$ (6300 s), $T_{wi} = 62.3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{wf} = 93.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\overline{T}_a = 14.3 \text{ }^\circ\text{C}$, et $\overline{I}_s = 775.1 \text{ W}/\text{m}^2$ pour le cuiseur solaire boîte ordinaire. La deuxième valeur de F_2 obtenue est 0.47 avec des valeurs initiales de $F_1 = 0.15 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$, $m_w = 1 \text{ kg}$, $c_{pw} = 4200 \text{ J}/\text{kg}^\circ\text{K}$, $A_{sc} = 0.2 \text{ m}^2$, $\tau = 80 \text{ min}$ (4800 s), $T_{wi} = 61.3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{wf} = 95.1 \text{ }^\circ\text{C}$, $\overline{T}_a = 12.1 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\overline{I}_s = 750.3 \text{ W}/\text{m}^2$, pour le cuiseur solaire boîte modifié.

Les calculs réalisés ci-dessus sont en respect des valeurs $T_{wi} > T_a$ recommandées par (Mullick et al. [136, 158]) et les valeurs de T_{wf} sont aussi inférieures au point d'ébullition comme suggéré par (Mullick et al. [158]). On peut voir clairement, que l'intervalle de temps τ du processus de chaleur sensible est réduit d'une manière remarquable (de 23.8 %) pour le cas du cuiseur à surface inclinée, qui est une durée de temps très suffisante pour la préparation de deux repas successive d'une famille dans la journée. La valeur de F_2 est plus élevée pour le cuiseur amélioré, ce qui conduit à de meilleures performances en termes de cuisson des aliments.

3.6.2.6. Résultats des tests de chauffage d'eau (effet des boosters)

A partir des tests de chauffage de l'eau présentés sur la figure (3.16), il est clair, comme anticipé, que l'ajout des miroirs réflecteurs aux designs des cuiseurs boîtes permet d'augmenter les valeurs des températures de la plaque absorbante par rapport aux cas sans réflecteurs. Les températures maximales des absorbeurs obtenues sans réflecteurs, avec un seul et avec deux réflecteurs sont 113.3, 121.1, et 122.6 °C pour le cuiseur boîte à surface horizontale, respectivement. Ces valeurs se trouvent plus élevées pour le cuiseur boîte à surface inclinée: 126, 137.3, 139.8 °C, respectivement. Cependant, l'ajout du deuxième réflecteur (placé sur le côté latéral des cuiseurs) n'a pas affecté d'une manière significative les températures maximales de l'absorbeur dans les deux cas des cuiseurs solaires (la différence de température est de 2.5 °C seulement). Ceci indique que; dans les régions du Sahara comme la ville de Ghardaïa, l'utilisation de plus d'un réflecteur (le deuxième réflecteur) n'améliore pas les performances des cuiseurs solaires, au contraire ceci influera négativement sur le coût total du cuiseur. Ce phénomène est expliqué par la valeur élevée de l'angle d'incidence des rayons solaires sur le deuxième réflecteur additionnel. Cependant, les rayons solaires arrivent avec une incidence normale sur le premier réflecteur ajouté, ce qui permet une meilleure contribution à la collecte de l'énergie solaire à l'intérieur des cuiseurs. A partir des résultats de la figure (3.16), on peut également constater que le temps de chauffage d'une quantité d'eau de 1 kg à partir de 20 °C en utilisant le cuiseur à surface réceptrice inclinée est amélioré de 18.7 % dans le cas de l'ajout d'un réflecteur (130 min par rapport à 160 min). Ainsi, nous pouvons conclure que les performances thermiques du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée avec un réflecteur additionnel principal sont améliorées considérablement par rapport au cuiseur sans réflecteurs additionnels.

3.6.2.7. Discussion des résultats obtenus

Suivant la Norme IS13429: 2000 [138], les résultats des tests présentés: de stagnation, de chaleur sensible et de chauffage de l'eau des deux cuiseurs boîtes révèlent de meilleures performances du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée par rapport au cuiseur à surface horizontale. La conception du cuiseur avec surface inclinée proposé permet de minimiser la largeur de la bande d'ombre sur l'absorbeur, cette configuration permet également d'augmenter la largeur effective des rayons solaires ($W_i > W_h$) interceptés par la plaque absorbante (Fig 3.17), qu'on peut démontrer mathématiquement de la manière suivante:

A partir de la figure (3.17) et à l'aide des relations trigonométriques simples, nous avons:

$$W_h = L' \cdot \sin(\gamma_s) \quad (3.25)$$

$$W_i = L_1 \cdot \cos(90 - \gamma_s - \beta) \quad (3.26)$$

Selon les Normes des cuiseurs solaires boîtes [138], la longueur du booster mirror doit être de mêmes dimensions que la base (L') pour couvrir la surface réceptrice total du cuiseur. Pour notre cas et afin de satisfaire cette exigence, nous allons admettre la suggestion suivante: la longueur du miroir réflecteur va être égale à la longueur de la vitre inclinée (L_1), et on pourrait écrire:

$$L_1 = \frac{L}{\cos(\beta)} \approx \frac{L'}{\cos(\beta)} \quad (3.27)$$

En remplaçons l'expression de L_1 dans l'équation (3.26), on obtient l'expression (3.28) pour calculer la largeur effective des rayons solaires W_i interceptés par la plaque absorbante du cuiseur à surface inclinée, qui est toujours supérieure à celle du cuiseur horizontal W_h (Eq 3.25):

$$W_i = L' \cdot \frac{\sin(\gamma_s + \beta)}{\cos(\beta)} \quad (3.28)$$

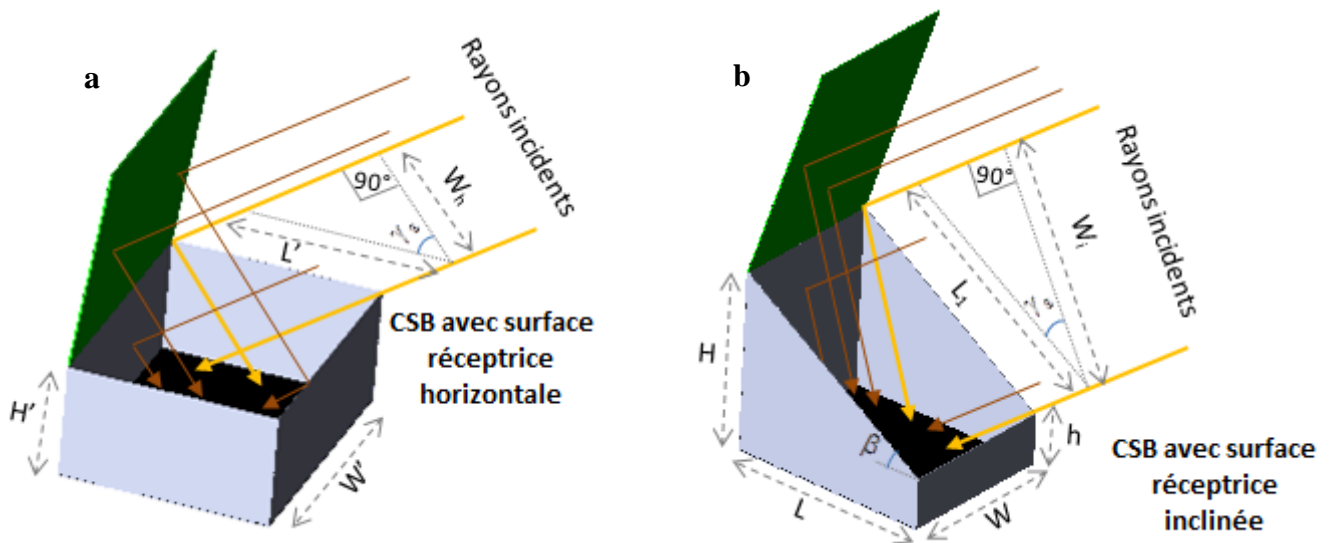


Fig 3.17: Tracé optique des rayons solaires: (a) incident sur l'absorbeur du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice horizontale, largeur du faisceau lumineux est W_h ; (b) incident sur l'absorbeur du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée, largeur du faisceau lumineux est W_i .

3.6.3. Tests et résultats des performances suivant les Normes Indiennes et le Standard Européen du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée

Cette partie concerne l'évaluation des performances et la caractérisation du cuiseur solaire boîte avec surface d'ouverture inclinée (Fig 3.18). L'analyse des performances du cuiseur est réalisée en fonction des principaux paramètres: la première figure of merit F_1 et la seconde figure of merit F_2 tel

que décrit par le Bureau des Normes Indiennes (BIS) [136, 137], le temps d'ébullition τ_{boil} sera calculé et la courbe caractéristique ($x\tau$) de notre cuiseur sera également déterminée [154]. La puissance de cuisson ajustée P_{adj} est estimée à partir de la courbe de régression $P_{\text{adj}} = f(\Delta T)$ suivant le Standard International de Funk [139] et la valeur du coefficient de pertes en chaleur est ensuite déduite. Les profils des températures des différents éléments du cuiseur sont mesurés en temps réel et représentés pour différentes conditions climatiques: pour ciel clairs et nuageux durant la période hivernale et estivale.

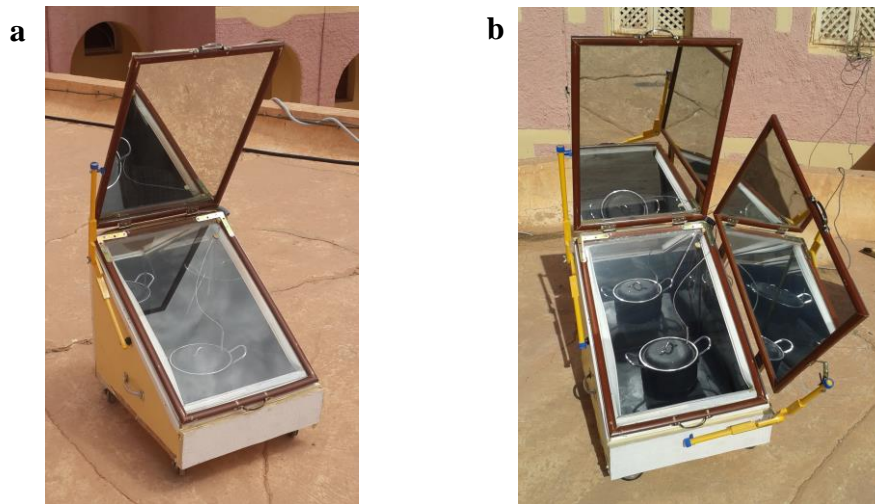


Fig 3.18: Vue du cuiseur boîte réalisé avec surface réceptrice inclinée muni de réflecteurs additionnels mis en service lors des tests d'évaluation à l'URAER, Ghardaïa: **(a)** orientation des cuiseurs suivant une saison hivernale; **(b)** orientation des cuiseurs suivant une saison estivale.

3.6.3.1. Première figure of merit

Les figures (3.19) et (3.20) représentent les résultats des tests effectués sur le cuiseur à surface réceptrice inclinée sans charge et sans réflecteurs. Les variations de l'éclairement solaire global incident sur le plan horizontal de l'absorbeur, la température ambiante et la température de plaque absorbante du cuiseur, mesurés dans des conditions de test de stagnation par ciel nuageux (en raison de l'intermittence des passages nuageux) et en absence du vent, sont représentées sur la figure (3.19a) et (3.19b) pour la saison d'hiver et la saison d'été, respectivement. Les résultats des tests du cuiseur boîte réalisés par cieus clairs sont également représentés sur la figure (3.20a) et (3.20b) pour un jour d'hiver et un jour d'été, respectivement.

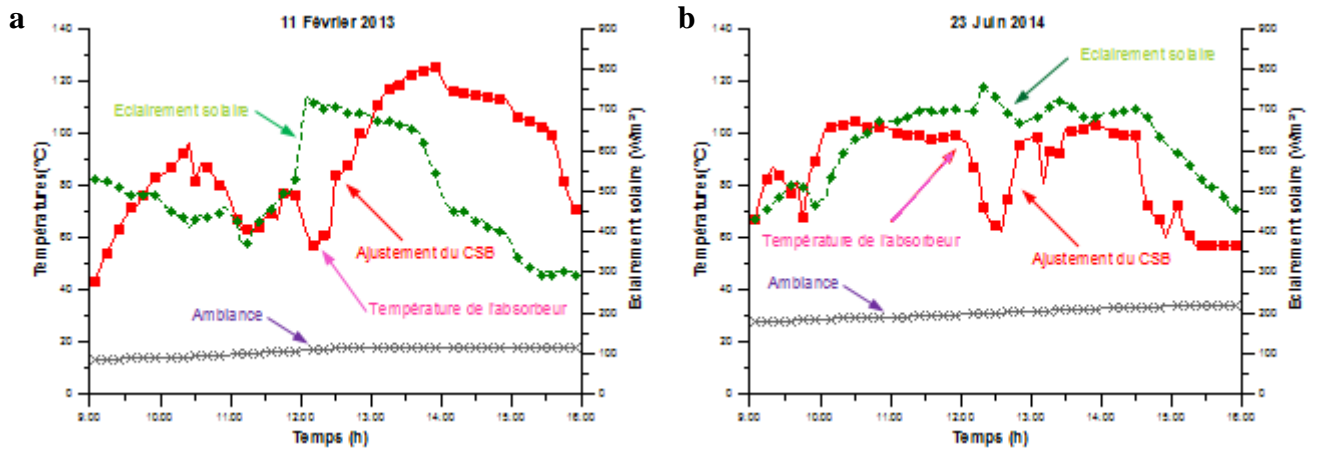


Fig 3.19: Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées de la plaque absorbante du cuiseur, sans utilisation du réflecteur, sous des conditions de test de stagnation, (a) pour un ciel couvert en un jour d'hiver de l'année 2013, (b) pour un ciel nuageux en un jour d'été de l'année 2014.

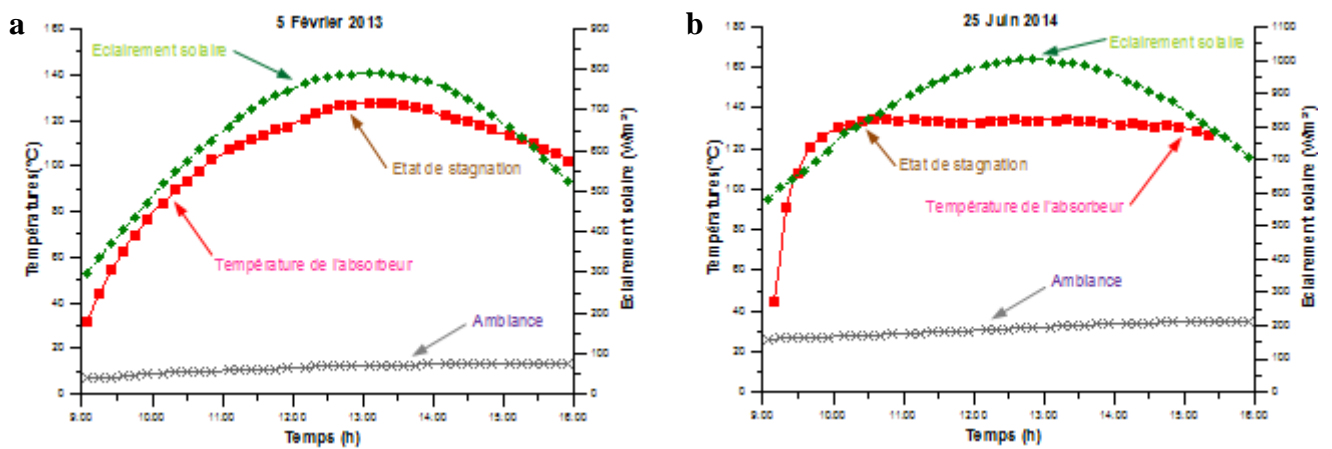


Fig 3.20: Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées de la plaque absorbante du cuiseur, sans utilisation du réflecteur, sous des conditions de test de stagnation, (a) pour un ciel clair en un jour d'hiver de l'année 2013, (b) pour un ciel clair en un jour d'été de l'année 2014.

Pour les conditions de ciel nuageux, la température maximale de la plaque absorbante T_p et la température de l'air intérieur T_r sont de 125.3 °C et 98.3 °C, respectivement. Ces valeurs ont été mesurées le 11 Février 2013 à 13 h 55 (Fig 3.19a) à une valeur d'éclairement solaire de 543.5 W/m² et une température ambiante égale à 17.5 °C. Au cours du test d'été le 23 Juin 2014 (Fig 3.19b), la température maximale de l'absorbeur et de l'air intérieur; mesurée à 10 h 25, sont de 103.67 °C et 77.9 °C, respectivement. Suivant ces résultats obtenus; dans des conditions de ciex nuageux, montrent que le cuiseur solaire ne peut être exploité pour la cuisson à cause des valeurs de l'air intérieur et des températures de l'absorbeur qui restent faibles même au mois d'été. Le cuiseur peut être utilisé pour chauffer les aliments cuits précédemment.

Pour des conditions de ciel clair, la température maximale de la plaque absorbante est de 127.6 °C mesurée à 13 h 05 heure locale le 5 Février 2013 (Fig 3.20a) à une valeur d'éclairement solaire horizontal de 791.9 W/m². Les résultats obtenus en saison tempérée (25 Juin 2014) ont montrés que les températures de stagnation sont également élevées. La température maximale de l'absorbeur était de 134.4 °C, cette valeur est mesurée à 10 h 30 heure locale (Fig 3.20b) à une valeur d'éclairement solaire horizontal de 824.3 W/m².

Pour le test expérimental de stagnation effectué en hiver (Fig 3.20a), la première figure of merit F_1 est calculée comme étant égale à 0.145 m²°C/W en utilisant l'équation (3.10), avec les valeurs de $T_{ps} = 127.6$ °C, $T_{as} = 12.5$ °C et $I_s = 791.9$ W/m². Pour le test expérimental de stagnation sans réflecteur effectué en été (Fig 3.20b), la première figure of merit F_1 est calculée avec les valeurs de $T_{as} = 28.1$ °C, $T_{ps} = 134.4$ °C et $I_s = 824.3$ W/m² comme étant 0.129 m²°C/W.

Selon Mullick et al. [136], la première figure of merit F_1 varie entre 0.12 et 0.16. Une valeur élevée de F_1 indique un bon rendement optique η_0 et un faible facteur de pertes en chaleur U_L . Notre cuiseur solaire de type de boîte réalisé est caractérisé par une bonne valeur du paramètre F_1 (0.145m²°C/W) en raison de la bonne interception des rayons solaires, conséquence du design à surface réceptrice inclinée proposé.

3.6.3.2. Seconde figure of merit

En saison hivernale, un test de chauffage de l'eau est réalisé selon la procédure de Mullick [136]. La charge totale de l'eau est de 8 kg/m² de surface de l'ouverture, pour la surface d'ouverture de notre cuiseur (0.2 m²), la charge totale de l'eau est estimée à 1.6 kg, cette quantité d'eau est éventuellement répartis entre deux ustensiles de cuisson identiques. Les températures de l'absorbeur, de l'eau dans les pots, de la température ambiante et de l'éclairement solaire, pour un ciel clair, en fonction du temps sont présentées sur la (Fig 3.21a). Pendant la saison estivale, le cuiseur recevra une plus grande intensité d'éclairement solaire en raison de la hauteur du soleil, qui est plus importante que celle de la saison hivernale. Le test de chauffage de l'eau est effectué avec une quantité de 1.6 kg d'eau distribuée sur deux ustensiles identiques, réalisé le 26 Juin 2014, sous un ciel clair. Les variations typiques de l'éclairement solaire, de la température ambiante, de la température de l'absorbeur et de la température de l'eau mesurées au cours du test sont présentées sur la (Fig 3.21b).

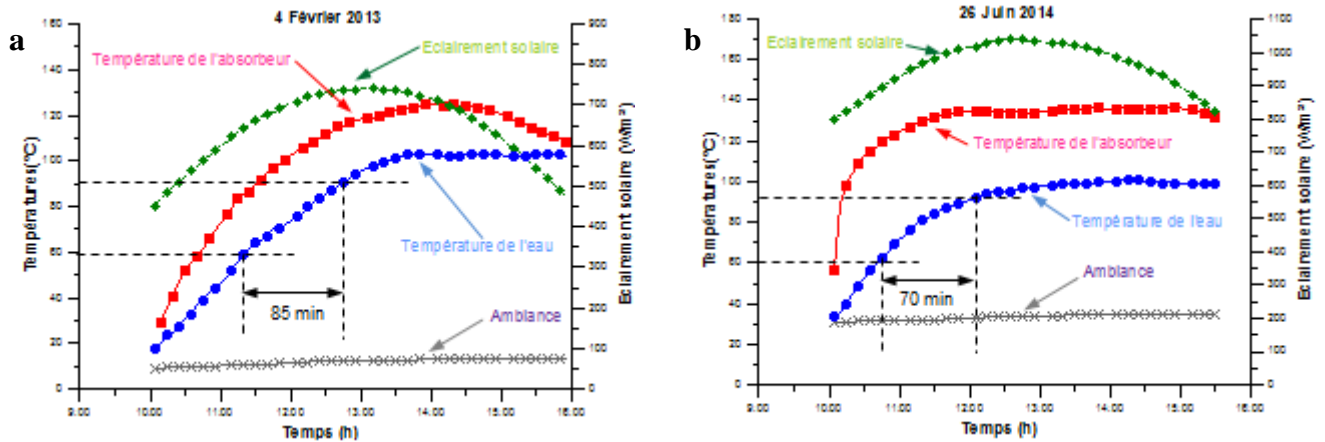


Fig 3.21: Les variations journalières de l'éclairement solaire et des températures mesurées des éléments du cuiseur, sans utilisation du réflecteur, sous des conditions de test de chaleur sensible, (a) pour un jour d'hiver de l'année 2013, (b) pour un jour d'été de l'année 2014.

Pour le test de chauffage de l'eau du 4 Février 2013, nous avons commencé le test à 10 h 05 min avec une température initiale de l'eau égale à 17.8 °C et une température ambiante égale à 8.9 °C (Fig 3.21a). La température de la plaque absorbante avait atteint un maximum de 125 °C à 14 h correspondant à une valeur d'éclairement solaire de 716 W/m². Le temps nécessaire pour augmenter la température de l'eau à partir de 61 °C à 91 °C est calculé comme étant 85 min. La figure (3.21b) montre que durant le test d'été; débuté à 10 h 05 min à une température initiale de l'eau égale à 33.9 °C et une température ambiante égale à 30.8 °C, la température de l'absorbeur atteint sa valeur maximale d'une manière plus rapide qu'en hiver à 12 h avec 135 °C, un temps de 70 min était suffisant pour arriver à une température d'eau de 91 °C.

Utilisant l'équation (3.11) et la figure (3.21a), la seconde figure of merit F_2 est calculée comme étant égale à 0.391 utilisant $F_1 = 0.145 \text{ m}^2\text{C/W}$ avec des valeurs de $m_w = 1 \text{ kg}$, $c_{pw} = 4200 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$, $A_{sc} = 0.2 \text{ m}^2$, $\tau = 85 \text{ min}$, $T_{wi} = 61.3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{wf} = 90.9 \text{ }^\circ\text{C}$, $\bar{T}_a = 11.4 \text{ }^\circ\text{C}$, et $\bar{I}_s = 705 \text{ W/m}^2$. La valeur correspondante pour F_2 , calculée à partir des profils thermiques de températures estivales (Fig 3.21b) s'élève à 0.333 (en utilisant $\bar{I}_s = 969.2 \text{ W/m}^2$, $\bar{T}_a = 32.1 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{wi} = 62.8 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{wf} = 90.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 70 \text{ min}$ et $F_1 = 0.129 \text{ m}^2\text{C/W}$).

La seconde figure of merit F_2 varie entre 0.254 et 0.490 en fonction de la charge et du nombre d'ustensiles utilisés (Mullick et al. [158]). Une valeur élevée de F_2 (0.391) indique une bonne efficacité de transfert de chaleur depuis la plaque d'absorbeur et l'air intérieur vers le contenu du récipient de cuisson. Pour notre cuiseur solaire boîte réalisé, F_2 est satisfaisante et le cuiseur est capable de cuire des repas en une durée de temps relativement réduite.

3.6.3.3. Période de chaleur sensible et courbe caractéristique du cuiseur

La période de chauffage sensible d'un cuiseur solaire boîte à n'importe quelles conditions climatiques (\bar{I}_s et \bar{T}_a) peut être calculée en utilisant l'équation (3.12). Les valeurs calculées de F_1 et F_2 seront utilisés pour déterminer les performances du cuiseur réalisé sous différentes valeurs d'éclairement solaire à partir de 500 W/m² jusqu'à 1000 W/m² avec un pas de 50 W/m² (voir Tab 3.4). La figure (3.22a) est un exemple de tracé de l'évolution du temps d'ébullition en fonction de la température de l'eau pour le jour du test d'hiver (4 Février 2013) [154].

La courbe caractéristique correspondante de notre cuiseur est illustrée sur la figure (3.22b) 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° et pour des valeurs spécifiques des deux facteurs F_1 et F_2 (0.145 et 0.391, respectivement) avec une valeur d'éclairement solaire moyenne de 750 W/m² et une température ambiante moyenne de 20 °C, le temps nécessaire pour faire bouillir une quantité d'eau bien déterminée est de 173 min.

\bar{T}_a en °C	Constante de temps τ_{boil} (min)							
	$\bar{I}_s = 750$ W/m ²		$\bar{I}_s = 800$ W/m ²		$\bar{I}_s = 900$ W/m ²		$\bar{I}_s = 950$ W/m ²	
	Hiver	Eté	Hiver	Eté	Hiver	Eté	Hiver	Eté
5	269.06	545.33	222.36	344.19	169.38	231.75	0.100	202.85
10	228.71	361.87	194.57	279.49	152.23	202.85	0.095	180.18
15	197.95	286.53	171.69	235.83	137.09	179.02	0.089	160.76
20	173.09	238,35	152.23	202.85	123.52	158.76	0.084	143.77
25	152.23	202.85	135.31	176.32	111.24	141.13	0.079	128.67
30	134.26	174.72	120.34	154.14	100.02	125.53	0.074	115.08
35	118.47	151.43	106.92	135.07	89.68	111.54	0.068	102.73
40	104.39	131.56	94.75	118.35	80.11	98.85	0.063	91.41
45	91.69	114.22	83.62	103.47	71.20	87.25	0.058	80.95

Tab 3.4: Valeurs calculées de la constante du temps τ_{boil} pour différentes valeurs d'éclairement solaire et de température ambiante.

Selon les résultats du tableau 3.4, on peut déduire par exemple que si la valeur de l'éclairement solaire augmente de 750 à 800 W/m² et la température ambiante étant inchangée (20 °C), le temps pris pour atteindre l'ébullition serait réduit à 152 min. De la même manière, si la valeur de l'éclairement solaire étant de 750 W/m² et la température ambiante augmente de 20 à 30°C par exemple, le temps requis pour atteindre l'ébullition est réduit à 134 min. On pourrait donc confirmer que la valeur moyenne de l'éclairement solaire \bar{I}_s et de la température ambiante \bar{T}_a sont proportionnels à la constante de temps liée à l'état d'ébullition τ_{boil} .

Il est à noter que; pour le jour de test du 4 Février 2013 (Fig 3.21a), le temps nécessaire pour porter la température de l'eau à l'ébullition est mesuré expérimentalement (Fig 3.22a) comme étant 205 min (3h 25 min) à une valeur de température ambiante de 12.6 °C et un éclairement solaire de 738 W/m² contre $\tau_{\text{boil}} = 221$ min (3h 41 min) pour le temps calculé numériquement (Tab 3.4), une erreur absolue de 16 min est constatée, qui est une erreur acceptable par rapport à une erreur de 13 min calculée et publiée par Sethi et al. [159] dans leur article récent. Concernant le test de la saison estivale du 26 Juin 2014 (Fig 3.21b), la constante de temps est déterminée expérimentalement comme étant égale à 115 min (1h 55 min) avec une valeur d'éclairement solaire de 1011 W/m² et une température ambiante de 33 °C, la valeur de τ_{boil} calculée est de 103 min (1h 43 min) avec les valeurs de $\bar{I}_s = 956$ W/m² et $\bar{T}_a = 33^\circ\text{C}$ (Tab 3.4), l'erreur de calcul est de 12 min.

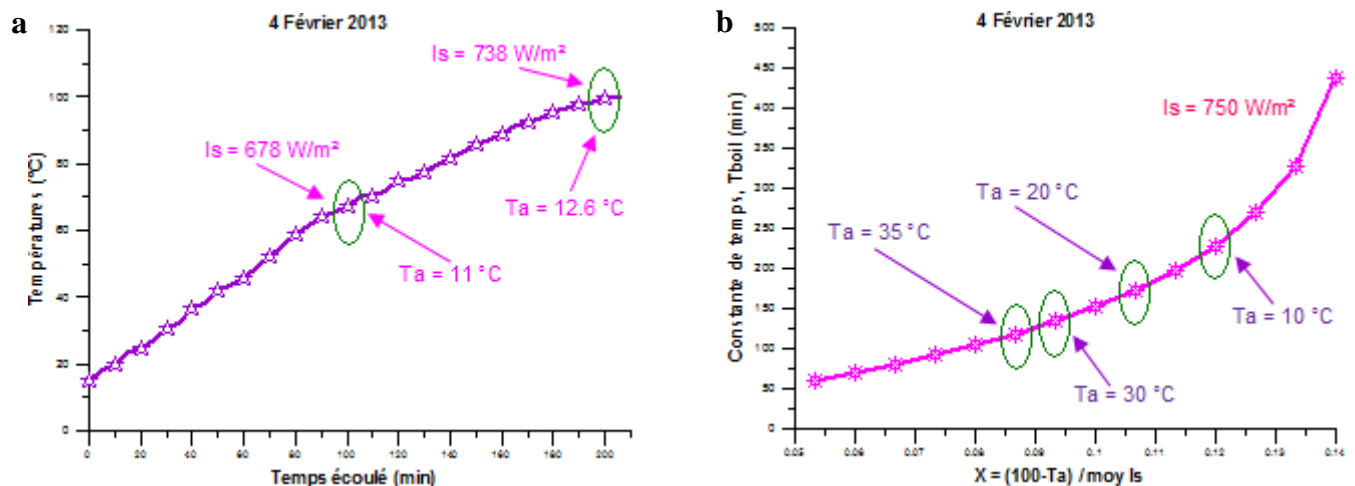


Fig 3.22: Caractérisation du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée à une latitude de 32°: (a) Evolution de la courbe du temps d'ébullition en fonction des températures de l'eau pour un jour type d'hiver; (b) courbe caractéristique des performances ($x\tau$) du cuiseur réalisé pour un éclairement solaire de 750 W/m².

3.6.3.4. Puissance de cuisson

Afin de prendre en considération l'effet du miroir réflecteur sur les performances du cuiseur solaire réalisé, la puissance de cuisson ajustée (P_{adj}) est calculée selon la procédure du Standard International [139]. Des tests sont réalisés durant plusieurs jours clairs d'hiver et d'été de l'année 2014. La surface d'interception calculée de notre cuiseur avec son réflecteur additionnel est de 0.266 m^2 , à cet effet, la charge de l'eau pour le test de puissance de cuisson est prise égale à 2 kg réparti uniformément sur deux ustensiles. Lors de chaque test, les températures de l'eau dans les deux pots ainsi que l'intensité de l'éclairement solaire et la température ambiante ont été enregistrés durant l'intervalle de temps allant de 10h00 du matin à 16h00 l'après-midi (ALT). La figure (3.23a) représente le profil thermique des températures pour un test réalisé durant le mois d'hiver à Ghardaïa (2 Février 2014), la figure (3.24a) est une représentation des profils des variables du test du mois d'été (25 Juin 2014).

Les valeurs de puissance de cuisson ajusté en fonction de la différence de température entre l'eau et l'ambiance (ΔT) sont représentées pour le test d'hiver et d'été sur la figure (3.23b) et figure (3.24b), en utilisant les profils thermiques des résultats obtenus de la figure (3.23a) et figure (3.24a); respectivement, et les équations (3.13) et (3.14).

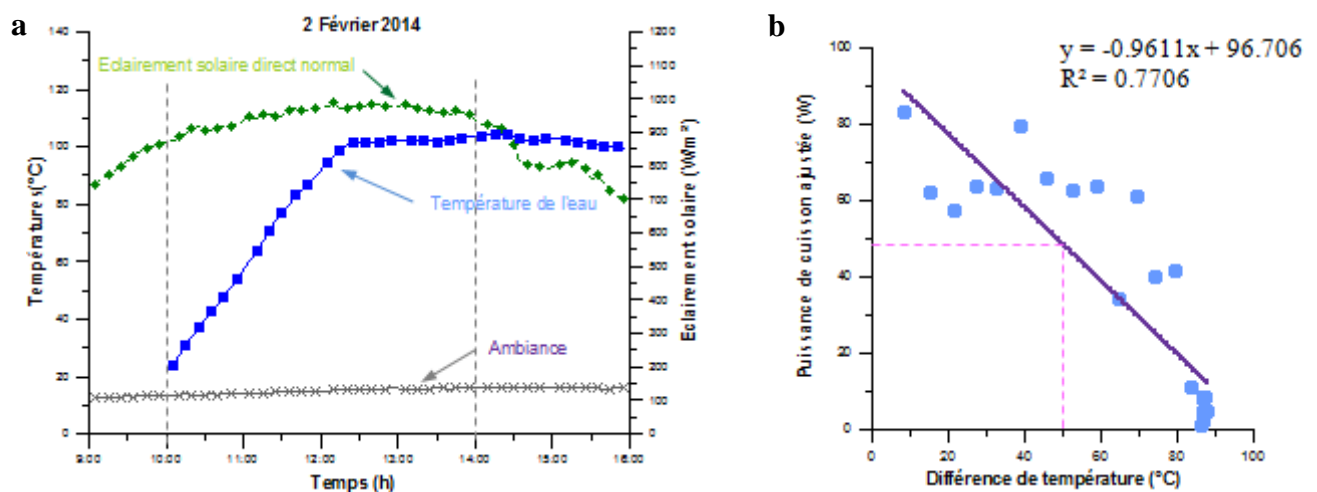


Fig 3.23: Expérimentation de la puissance de cuisson du cuiseur solaire réalisé en un jour clair d'hiver en Février 2014: (a) variations journalières de l'éclairement direct normal et des températures de l'eau mesurées (charge de 2 kg) avec utilisation du réflecteur; (b) puissance de cuisson ajustée en fonction de la différence de température.

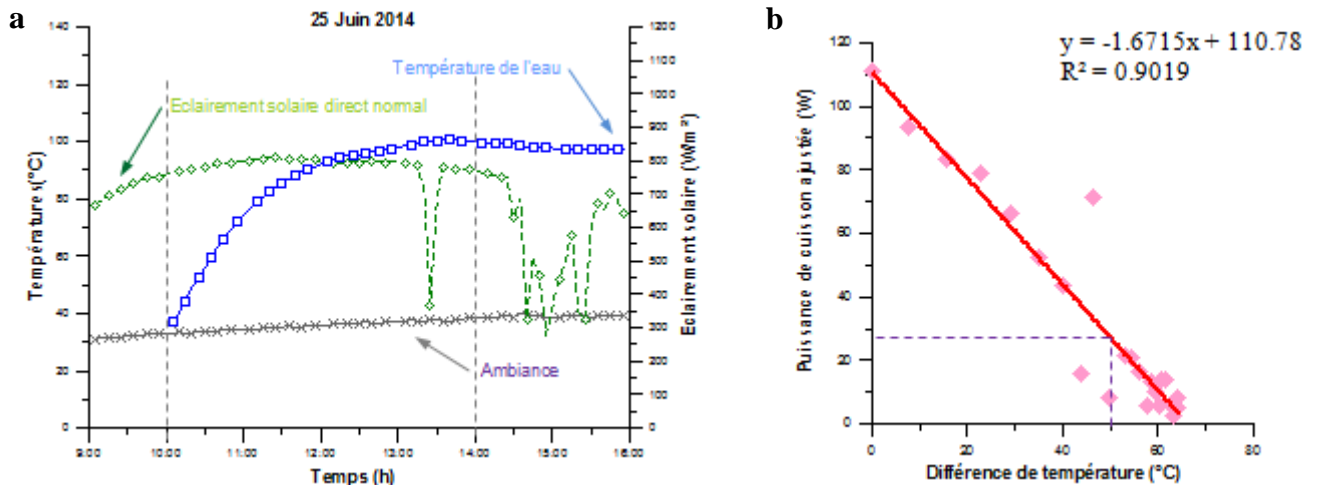


Fig 3.24: Expérimentation de la puissance de cuisson du cuiseur solaire réalisé en un jour clair d'été en Juin 2014: (a) variations journalières de l'éclairement direct normal et des températures de l'eau mesurées (charge de 2 kg) avec utilisation du réflecteur; (b) puissance de cuisson ajustée en fonction de la différence de température.

A partir des courbes de puissance de cuisson ajustée; qui sont des droites linéaires, les valeurs de puissance de cuisson initiale P_{ini} (à $\Delta T = 0$ °C, interception avec l'axe des Y), de puissance de cuisson standardisée P_{adj} (au $\Delta T = 50$ °C) et du coefficient de perte de chaleur (pente de la courbe linéaire) ont été obtenus. Les relations suivantes sont déduites pour notre cuiseur solaire boîte réalisé:

$$P_{adj} = 96.706 - 0.9611(\Delta T), \text{ pour le test d'hiver} \quad (3.29)$$

$$P_{adj} = 110.78 - 1.6715(\Delta T), \text{ pour le test d'été} \quad (3.30)$$

Les valeurs de puissance de cuisson initiales, des puissances de cuisson standardisées; pour le test du 2 Février et du 25 Juin, sont: $P_{ini} = 97$, $P_{adj} = 48$ W et $P_{ini} = 111$, $P_{adj} = 26$ W, respectivement. Les coefficients de pertes obtenus à partir de la pente des droites de régression sont estimés à 0.96 W/°C et à 1.67 W/°C et les valeurs des coefficients de régression linéaire de détermination $R^2 = 0.77$ et 0.90; respectivement, satisfont aux Normes des tests (meilleurs que 75 %).

Des valeurs élevées de la puissance de cuisson initiales associée à un faible coefficient de pertes en chaleur indiquent une bonne isolation de notre cuiseur solaire boîte, selon les Normes Internationales [139].

3.6.4. Tests et résultats des rendements du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée

Afin de procéder à une évaluation des performances thermiques du cuiseur réalisé en termes de rendement énergétique et exergétique en fonction des conditions météorologiques locales [155, 156], plusieurs tests de chauffage de l'eau ont été réalisés durant le mois de Mai et Juin 2013 suivant la

méthode décrite par Funk, présentée dans la 3^{ème} Conférence Mondiale sur la Cuisson Solaire [139], expérimentée et validée par Ozturk [160] et Panwar et al. [84]. Les jours de tests qui ne satisfont pas aux exigences de la méthode sont rejetés. Les expériences ont été effectuées avec 1 et 2 litres d'eau et en utilisant 1, 2, ou sans réflecteurs. Un ustensile de cuisson ordinaire d'une capacité de 2.5 l peint en noir et sans isolation a été utilisé pour les tests. Il est à noter également que le vitrage n'a pas été ouvert pendant les mesures.

La figure (3.25) représente les tracés des valeurs instantanées de l'éclairement solaire et de la température de l'air ambiant à Ghardaïa pour les six jours de tests retenus. Les valeurs maximales de l'éclairement global sont de 1046, 1044, 1044, 1075, 1054 et 1025 W/m² pendant les jours correspondant au 26, 29, 30 Mai et 10, 11, 12 Juin 2013. Les températures ambiantes maximales avaient atteint les 33.3, 33.2, 32.2, 33.7, 36.2 et 27.4 °C; respectivement, enregistrées à 16 h (TSV).

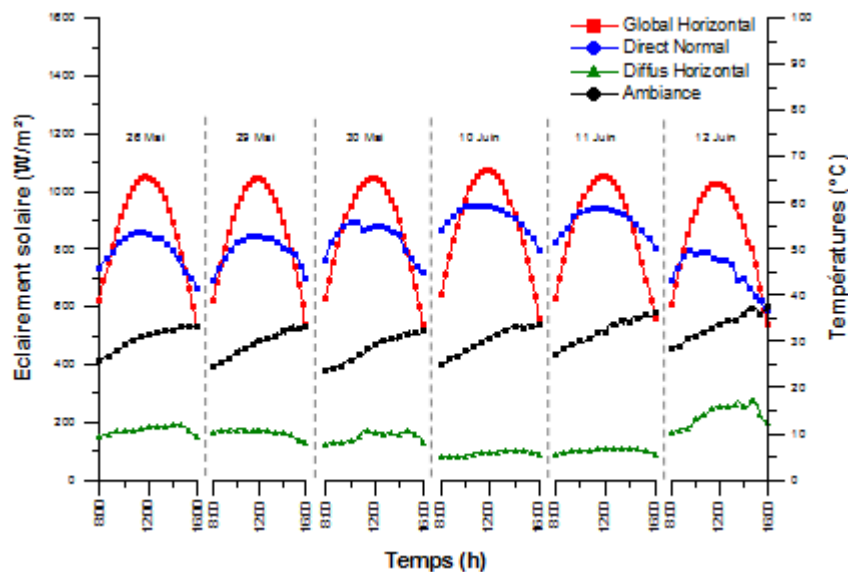


Fig 3.25: Les variations journalières de l'éclairement solaire direct normal, global, diffus et de la température ambiante pour les six jours de tests au mois de Mai et de Juin à Ghardaïa.

Dans ce qui suit, on donnera les équations permettant de calculer l'éclairement solaire total I_s incident sur l'absorbeur du cuiseur (Figure 3.26). L'équation 3.36 est appliquée aux données expérimentales pour déduire l'éclairement total incident sur l'absorbeur du cuiseur boîte, dans le cas l'utilisation du réflecteur.

L'équation (2.47) du chapitre 2 a été modifiée pour inclure l'angle zénithal qui détermine la position du soleil (sa hauteur) de manière instantané, et qui permettra un ajustement du miroir réflecteur aux moments désirés. L'équation (3.31) donne l'expression de l'angle zénithal θ_z en fonction de la hauteur du soleil γ_s utilisée pour le calcul de l'angle α d'inclinaison du réflecteur (Equation 3.32). L'angle χ est également donné par l'équation (3.33) pour calculer l'inclinaison du réflecteur à partir de la surface inclinée de l'angle β . L'expression (2.8) du chapitre 2 précédent est utilisée pour calculer l'angle Azimutale θ_{az} de l'orientation du cuiseur par rapport au Sud.

$$\theta_z = \frac{\pi}{2} - \gamma_s \quad (3.31)$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \left(2\theta_z + \beta - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.32)$$

$$\chi = \frac{\pi}{2} - \alpha + \beta \quad (3.33)$$

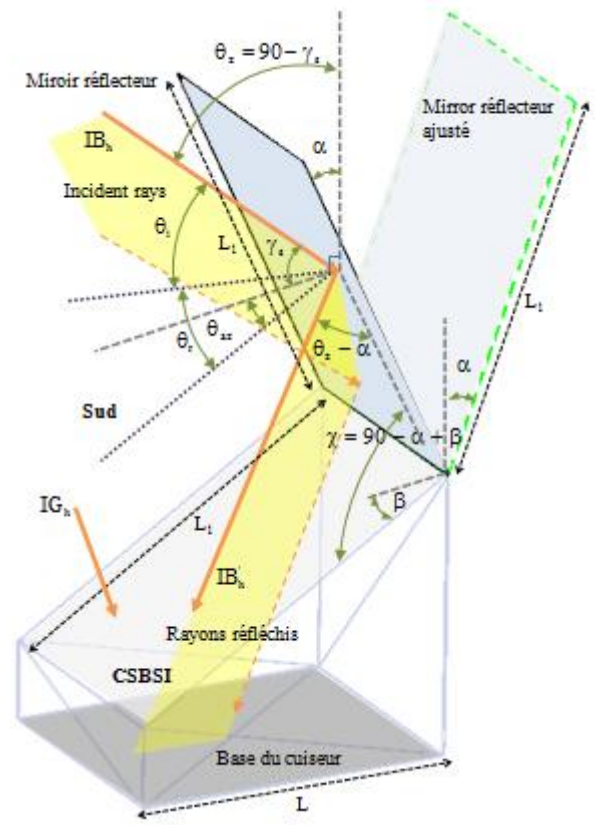


Fig 3.26: Différents angles servant au calcul de l'éclairement solaire total I_s incident sur le cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée (CSBSRI), testé par la méthode énergétique/exergétique.

A partir de la figure (3.26), nous pouvons écrire l'éclairement solaire total I_s incident sur l'absorbeur du cuiseur comme étant:

$$I_s(\gamma_s, T_L) = IG_h(\gamma_s, T_L) + IB'_h(\gamma_s, T_L) \quad (3.34)$$

Avec :

$$IB'_h(\gamma_s, T_L) = IB_h(\gamma_s, T_L) \cdot F_{rv} \cdot R_r \cdot \left(\frac{A_r}{A_v} \right) \cdot \cos(\theta_{rv}) \quad (3.35)$$

Où F_{rv} est le facteur de forme, R_r est la réflectivité du miroir réfléchissant, A_r est la surface du réflecteur, A_v est la surface de la vitre et θ_{rv} est l'angle de l'incidence des rayons solaires à partir du miroir vers le vitrage, $\theta_{rv} = \theta_z - \alpha$ (voir Figure 3.26). On obtient donc l'expression de I_s de la manière suivante :

$$I_s(\gamma_s, T_L) = IG_h(\gamma_s, T_L) + IB_h(\gamma_s, T_L) \cdot F_{rv} \cdot R_r \cdot \left(\frac{A_r}{A_v} \right) \cdot \cos(\theta_z - \alpha) \quad (3.36)$$

3.6.4.1. Température de l'eau et la différence de température dans le cuiseur

La figure (3.27a) donne les profils des températures des différents éléments du cuiseur durant le test du 10 Juin 2013 à Ghardaïa avec un récipient de cuisson rempli avec 2 litres d'eau. Comme l'indique les résultats, la température de l'air ambiant varie entre 24.9 °C et 33.6 °C, alors que l'éclairement solaire varie entre 645 W/m² et 1 075 W/m² pendant la période expérimentale. La température de l'eau dans le pot augmente avec l'augmentation de l'éclairement solaire atteignant son maximum (87.5 °C) dans l'après-midi. La température moyenne de l'eau enregistrée pour la période du test (de 8 h à 15 h) est de 72.6 °C dans l'ustensile.

La température de l'eau à l'intérieur du pot de cuisson est comparée à la température ambiante afin de vérifier l'efficacité du cuiseur. La figure (3.27b) illustre la variation de la différence de température entre l'eau et l'ambiance en fonction du temps pour le test du 10 Juin. Initialement, la différence de température entre l'eau et l'ambiance est petite, elle augmente avec le temps. A 10 h dans la matinée, elle est de l'ordre de 38.2 °C, cette différence atteint les environs de 53.8 °C à 14 h en début d'après-midi quand la valeur de la température ambiante est de 33.2 °C. La différence de température moyenne journalière mesurée dans le cuiseur est de 49.6 °C pour cet exemple de test sur le site Ghardaïa. Les résultats de ce test montrent que le cuiseur est capable de maintenir la température de l'eau dans l'ustensile à une valeur de 53.8 °C supérieure à la température ambiante. La température de l'eau atteint les 86.95 °C à 14 h de l'après-midi. Une courbe similaire et des valeurs proches sont enregistrées par Ozturk [160] et Panwar et al. [84].

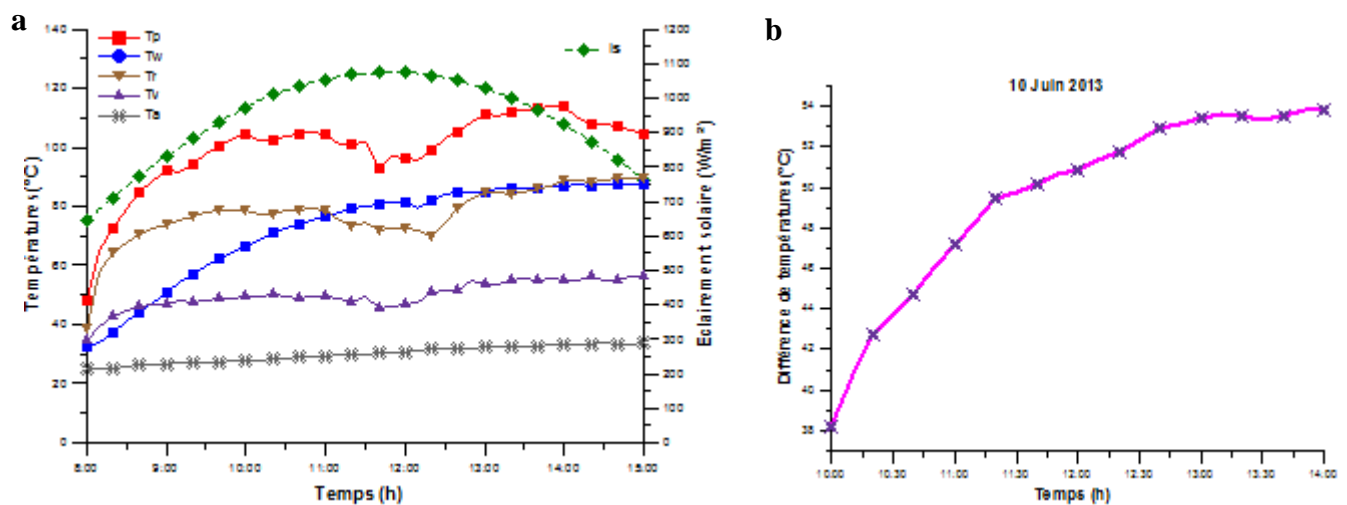


Fig 3.27: Profils des températures correspondants au test réalisé le 10 Juin 2013 en fonction du temps: (a) températures de de la plaque absorbante (T_p), de l'air intérieur (T_r), de la vitre (T_v), de ustensile de cuisson (T_w) et courbe de l'éclairement solaire; (b) différence de température entre l'eau et l'ambiance.

3.6.4.2. Comparaison de l'énergie et l'exergie de sortie du cuiseur

Les résultats du tableau 3.5 montrent les variations de l'énergie et de l'exergie de sortie en fonction du temps pour le test effectué le 10 Juin 2013 à Ghardaïa. L'énergie de sortie du cuiseur solaire boîte; calculée en utilisant l'équation (3.16), varie dans l'intervalle de 0.36 à 27.09 kJ durant la période expérimentale. Comme l'indique le tableau 3.5, l'énergie de sortie dans le cuiseur augmente d'une manière rapide dans les trois premières heures, puis diminue à partir de 12 h à 14 h. L'énergie de sortie moyenne du cuiseur est de 10.67 kJ/jour, tandis que l'énergie d'entrée moyenne est de 142.79 kJ/jour. L'étude montre que l'énergie de sortie du cuiseur dépend de l'intensité de l'éclairement solaire et de la différence de température de l'eau, augmentant directement avec ces deux paramètres.

Temps solaire (h)	Entrée (kJ)		Sortie (kJ)	
	Energie	Exergie	Energie	Exergie
8:00				
9:00	118.37	110.49	26.06	1.81
10:00	138.27	129.02	14.28	1.58
11:00	150.40	140.29	11.37	1.52
12:00	153.30	142.95	0.53	0.08
13:00	146.67	136.71	1.46	0.21
14:00	131.53	122.58	0.97	0.15
Moyenne journalière	142.79	133.17	10.67	1.20

Tab 3.5: Résultats de l'énergie (E_o) et l'exergie de sortie (Ξ_o) du cuiseur boîte à surface inclinée.

L'exergie de sortie du cuiseur; calculée à partir de l'équation (3.23), est significativement différente de l'énergie de sortie. Ce paramètre pour valeur min 0.05 kJ et une valeur max de 2.46 kJ pour la période du test, l'exergie de sortie moyenne journalière est estimée à 1.2 kJ/jour.

A partir de ces résultats, il est clair que l'exergie de sortie du cuiseur est toujours inférieur à l'énergie de sortie, un rapport de 1/10 est déduit d'après notre étude expérimentale (voir Equation 3.37) ci-après. Nous avons observé un facteur similaire pour le calcul de l'énergie et l'exergie de sortie concernant les résultats des études récentes menées par Panwar et al. [161] et Ozturk [160].

La différence entre l'énergie et l'exergie de sortie est dû; comme l'a expliqué Ozturk [160], au fait que la qualité de l'énergie a été prise en compte dans le calcul de l'exergie de sortie. Cependant,

en calculant l'énergie de sortie uniquement la quantité de l'énergie a été considérée. En d'autres termes, la partie inutile de l'énergie thermique stockée dans l'eau a été ignorée dans le calcul de l'exergie de sortie.

$$\Xi_{o_moy} (CSB) \approx 0.1 E_{o_moy} \quad (3.37)$$

3.6.4.3. Rendement énergétique et exergétique du cuiseur

La figure (3.28) montre les résultats comparatifs des rendements énergétiques et exergétiques pour le test réalisé le 10 Juin 2013. Le rendement énergétique du cuiseur boîte varie dans un intervalle de 0.26 à 22.86 %. Par contre, le rendement exergétique varie entre 0.04 et 1.92 % au cours de la période expérimentale. On remarquerait qua la courbe de variation dans le temps du rendement exergétique est similaire (même allure) à la courbe de variation du rendement énergétique. Des valeurs de rendement maximum du cuiseur sont obtenues pour la période matinale, et les valeurs minimales sont obtenues au début de l'après-midi affectées par des variations de l'éclairement solaire entre 830 et 1075 W/m² enregistrées au cours de la période entre 9 h et 14 h.

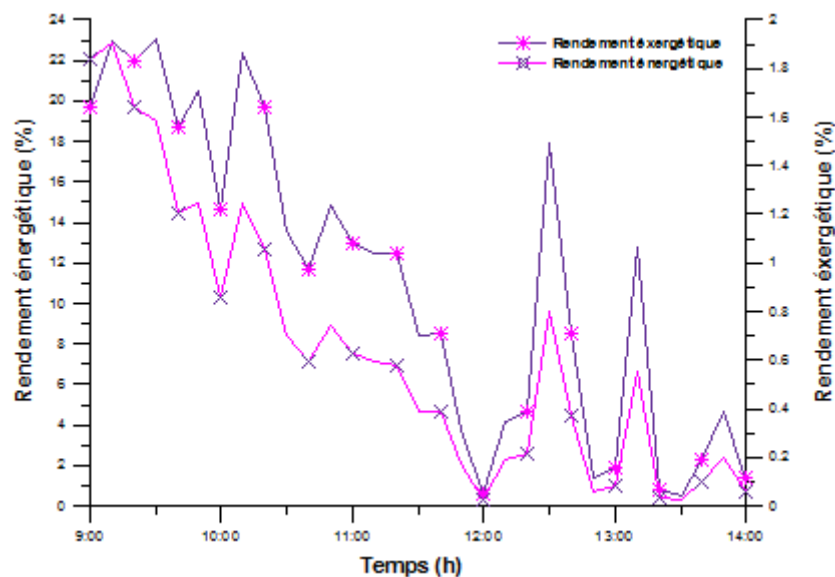


Fig 3.28: Graphes du rendement énergétique et exergétique du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée en fonction du temps de la journée pour le test du 10 Juin 2013.

On peut voir clairement que le rendement exergétique est considérablement inférieur au rendement énergétique, ceci peut être expliqué par l'énergie contenue dans l'eau utilisé comme matériau de stockage thermique considérée pour le calcul du rendement énergétique (Panwar et al. [84], Ozturk [160]). En d'autres termes, pour calculer le rendement énergétique, la quantité de l'énergie transférée est prise en compte, et la qualité de l'énergie transférée est négligée. Une similitude de

tendance graphique des courbes des deux rendements énergétiques et exérgétiques a été notée par Panwar et al. [161] et Ozturk [160]. Ces résultats montrent que le présent cuiseur est bien conçu et ces performances sont efficaces, et ceci du faite que toutes les précautions ont été prises lors de la construction du cuiseur afin de réduire les pertes en chaleur (design et choix des matériaux).

3.6.4.4. Influence des réflecteurs ajoutés sur les rendements du cuiseur

Afin de déterminer les avantages de l'ajout des réflecteurs (booster miroirs) sur les performances thermiques du cuiseur réalisé en termes de rendement énergétique et exérgétique, plusieurs tests de chauffage de l'eau ont été réalisés. Pour mener l'expérience, le récipient de cuisson est rempli avec 2 kg d'eau et posé à l'intérieur du cuiseur. Dans ce test deux réflecteurs ont été ajoutés au cuiseur: le premier réflecteur; placé en haut du cuiseur et orienté vers le Sud, a un axe de rotation horizontal dans le plan Nord-Sud et un seconde réflecteur; monté sur le côté du cuiseur et orienté vers l'Est, effectue un mouvement autour d'un axe incliné dans le plan Est-Ouest. L'orientation du cuiseur est effectué à intervalles régulier de 1h de temps [160, 84], les deux réflecteurs sont également ajustés de leurs positions initiales durant les tests selon les angles d'inclinaisons calculés précédemment. Pour le cuiseur solaire expérimenté sans et avec réflecteurs en place, les températures de la plaque absorbante et de l'eau sont enregistrées pour 3 jours de tests (10, 11 et 12 Juin 2013) et sont illustrées sur la figure (3.29).

Comme prévu, en ajoutant des miroirs réflecteurs, les résultats expérimentaux montrent clairement que le cuiseur solaire atteint des valeurs de températures plus élevées que sans l'ajout des réflecteurs. Les températures maximales de l'absorbeur obtenues sans, avec un seul et avec deux réflecteurs sont égales à 104.7, 116 et 119.3 °C, respectivement. Les températures moyennes journalières de l'absorbeur sont de 99.4 °C (sans réflecteurs), 104.3 °C (avec un réflecteur) et 105.7 °C (avec deux réflecteurs). L'addition du deuxième réflecteur (réflecteur monté sur le côté du cuiseur) n'améliore pas la température maximale et la température moyenne journalière de l'absorbeur (la différence moyenne est de 1.4 °C), et de ce fait n'affecte pas d'une manière significative les performances thermiques du cuiseur. Ces conclusions sont en parfaites concordances avec les résultats de la simulation optiques obtenus dans le chapitre précédent.

La figure (3.29) montre que le temps requis pour augmenter la température de l'eau de 60 à 80 °C est de 2h 10 min (temps 1) pour le cuiseur sans réflecteurs. Afin d'élever la température de l'eau jusqu'à les 80°C, le temps nécessaire serait de 1h 50 min (temps 2) pour le cuiseur avec un réflecteur par rapport à temps de 1h 40 min dans le cas des deux réflecteurs ajoutés. Nous estimons un écart de

temps de 20 et 30 min; respectivement, pour le cuiseur avec un et deux réflecteurs par rapport au cas sans réflecteurs. Ainsi, la différence de temps de chauffage de 2 kg d'eau à l'aide du cuiseur réalisé est améliorée d'environ 23 % dans le second cas (un réflecteur) par rapport au premier cas (sans réflecteur).

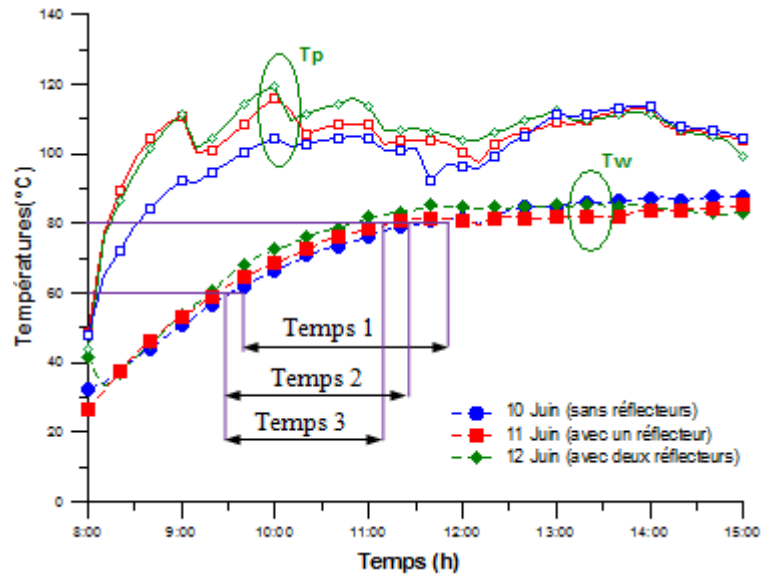


Fig 3.29: Comparaison entre les températures de l'absorbeur et les températures de l'eau du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée en fonction du temps, sans l'utilisation, avec utilisation d'un seul et avec deux réflecteurs.

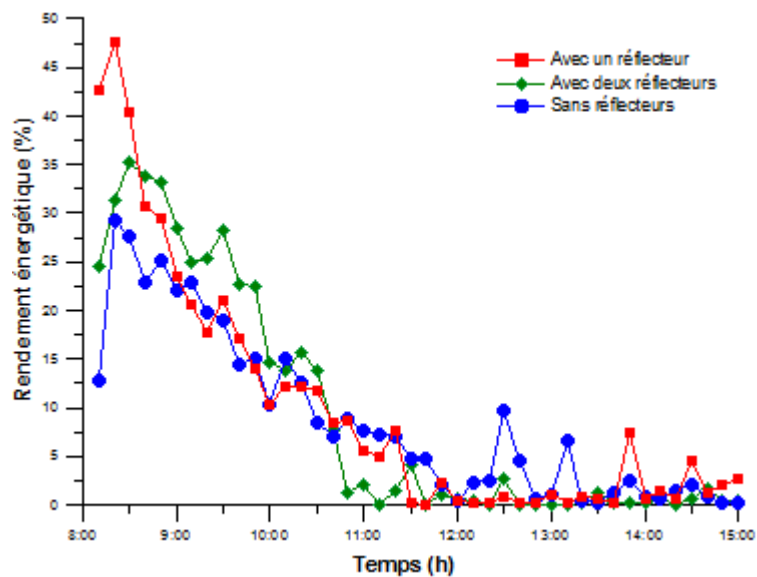


Fig 3.30: Comparaison entre les rendements énergétiques du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée sans l'utilisation, avec utilisation d'un seul et avec deux réflecteurs.

La figure (3.30) illustre la variation du rendement énergétique instantané du cuiseur en fonction du temps calculé avec l'équation (3.17). Ce rendement varie dans un intervalle de 0.2 à 29.3 kJ au

cours de la période du test du 10 Juin (sans réflecteurs). Il est clair à partir du graphe de la figure (3.30) que en ajoutant des réflecteurs, le rendement énergétique du cuiseur se trouve amélioré. Le rendement énergétique moyen est de 13.6 % sans réflecteurs (test du 10 Juin), 16.2 % avec l'ajout d'un réflecteur (test du 11 Juin) et de 16.1 % avec deux réflecteurs supplémentaires (test du 12 Juin).

Les variations du rendement exergetique instantané du cuiseur en fonction du temps, calculé à partir de l'équation (3.24) est illustré sur la figure (3.31). Le rendement exergetique moyen du cuiseur est estimé à 1.2 % pour l'ensemble des trois tests. D'autres tests supplémentaires effectués le 26, 29 et 30 Mai 2013 ont permis de fournir plus d'informations sur l'effet des réflecteurs sur le rendement exergetique. Comme l'indique la figure (3.31), le rendement exergetique moyen journalier du cuiseur sans, avec un et avec deux boosters est de 0.73 %, 0.90 % et 0.96 %, respectivement. Un maximum de valeurs du rendement exergetique est déterminé comme étant égal à 1.8 %, 2.5 % et 3.2 % pour les cas sans, avec un et avec deux réflecteurs, respectivement.

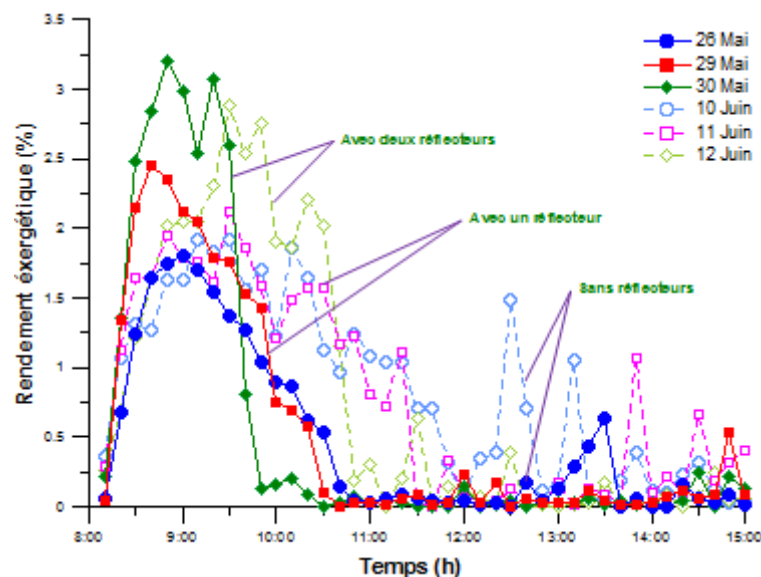


Fig 3.31: Comparaison entre les rendements exergetique du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée sans l'utilisation, avec un seul et avec deux réflecteurs.

D'après les résultats expérimentaux des tests énergie/exergie, nous pouvons conclure; en général, que les rendements énergétiques et exergetiques du cuiseur sont nettement supérieurs dans le cas de l'ajout des réflecteurs par rapport au cas sans réflecteurs (16.2 et 0.9 % par rapport à 13.6 et 0.73 %). Les performances du cuiseur solaire grandement améliorées en utilisant des réflecteurs additionnels. Cependant, on remarque facilement que le gain en rendement (énergie et exergie) du cuiseur testé sur le site de Ghardaïa avec un réflecteur en place est quasi-similaire au cas avec deux réflecteurs

supplémentaires, le rendement énergétique est d'environ 16.2 % et 16.1 %, le rendement exergétique est de 0.90 % et 0.96 %. Ceci s'explique par des valeurs élevées de l'angle d'incidence sur le second réflecteur (monté sur le côté du cuiseur), les rayons solaires arrivent avec une incidence presque normal sur le premier réflecteur (poursuite dans le plan Nord-Sud), ce qui permet une meilleure contribution à la collecte de l'énergie dans le cuiseur et l'améliorations de ces performances thermiques.

3.6.4.5. Influence de la variation de la charge sur les rendements du cuiseur

Pour déterminer l'effet de la variation de charge sur les rendements énergétiques et exergétiques du cuiseur, ces tests ont été réalisés pendant 4 jours clairs en utilisant différents volumes d'eau (une et deux litres). La figure (3.32) illustre les variations des températures en fonction du temps dans l'ustensile avec 1 et 2 L d'eau, avec et sans réflecteur.

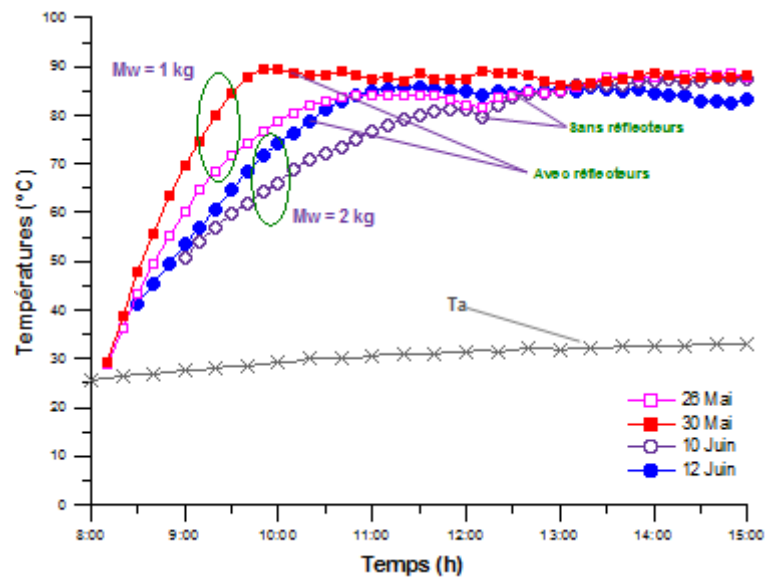


Fig 3.32: Variation de la température de l'eau dans le cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée en fonction du temps pour 1 et 2 litres de charge d'eau, sans et avec utilisation d'un réflecteur additionnel.

Il est clair d'après les résultats de la figure (3.32) que l'augmentation de température de l'eau (depuis l'ambiance) dans le cas du cuiseur chargé avec 1 L d'eau (26, 30 Mai) se produit plus rapidement que dans le cas du cuiseur chargé avec 2 L d'eau (10, 12 Juin). Le temps requis pour atteindre le niveau de stagnation est plus petit dans les deux premiers cas; ce temps est estimé à environ 2h 30 min pour le test effectué le 26 mai avec une charge de 1 L d'eau sans utilisation du réflecteur, et à seulement 1h 50 min lors de l'ajout du réflecteur (test du 30 Mai). Cependant, le temps nécessaire pour atteindre le niveau de stagnation lors d'une charge d'eau de 2 L est de l'ordre de 2h 40 min pour le test effectué le 12 juin et de 3h 35 min pour le test du 10 Juin sans réflecteur. Pour la température de

l'eau moyenne mesurée sans et avec booster, elle est de 76.5 °C (26 mai) et 80.6 °C (30 mai) pour une charge de 1 L, et elle est de 74.5 °C (12 Juin) et 72.3 °C (10 Juin) pour 2 L d'eau. Il est bien évident que la température moyenne de l'eau est plus élevée avec le réflecteur en place.

La figure (3.33) illustre la variation du rendement énergétique et exergetique en fonction du temps pour 1 et 2 L d'eau, en utilisant le cuiseur avec un réflecteur additionnel principal.

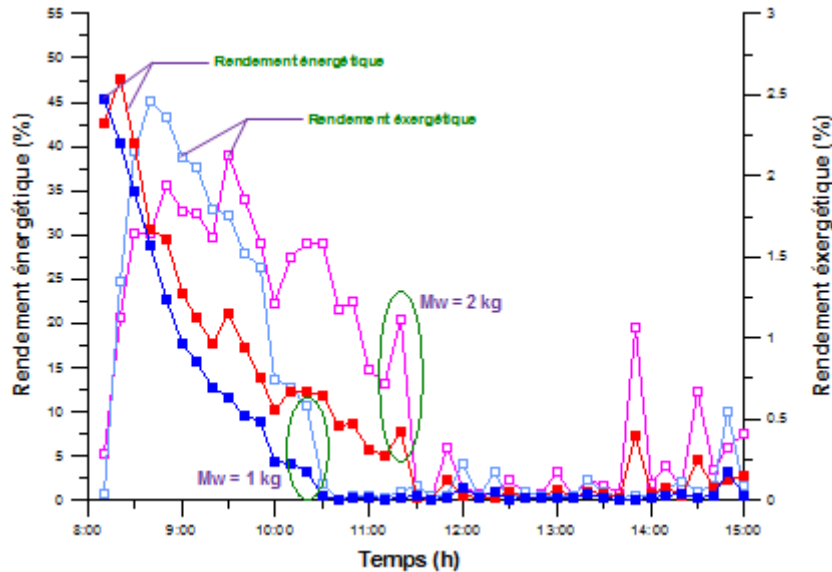


Fig 3.33: Variation des rendements énergétiques et exergetiques en fonction du temps du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée pour 1 et 2 litres de charge d'eau avec utilisation d'un réflecteur additionnel.

D'après la figure (3.33), on peut voir que; dans un premier temps, les valeurs des deux rendements sont élevés, puis diminuent avec le temps. Ces variations des rendements en fonction du temps sont dues aux valeurs des énergies et exergeries de sorties qui sont directement proportionnelle à la différence de température (voir les équations (3.16) et (3.23), respectivement). Cependant, les énergies et exergeries d'entrées initiales sont faibles, car les intensités initiales de l'éclairage solaire incident sur l'absorbeur sont faibles. Par conséquent, les valeurs de la sortie par rapport à l'entrée (rendement instantané) sont importantes dans la matinée au début des expériences. A midi et dans le début de l'après-midi, les rendements énergétiques et exergetiques du cuiseur diminuent car l'intensité de l'éclairage solaire augmente à ce moment de la journée et la différence de température auprès du point d'ébullition (niveau stagnation) augmente lentement. Le rendement énergétique moyen du cuiseur avec 1 et 2 L d'eau est de 10.97 et 16.23 %; respectivement, alors que, le rendement exergetique moyen est de 0.90 et 1.20 %; respectivement. Par conséquent, il a été constaté que le rendement énergétique et exergetique journalier moyen du cuiseur avec 2 L d'eau est supérieur à celui de 1 L, ceci est dû au fait

que l'énergie et l'exergie de sortie sont directement proportionnels au volume de l'eau. Les résultats obtenus concernant l'effet de la charge sur le rendement exergetique du cuiseur sont en parfaite concordance avec ceux publiés récemment par Kumar et al. [162].

3.6.5. Tests et résultats des éléments caractéristiques de performances du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée

Après les étapes d'évaluation des performances du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée suivant les Normes Indiennes de Mullick [136] et le Standard Européen de Funk [139, 140] et selon la procédure testée par Ozturk [160] et Panwar et al. [84] calculant les rendements énergétiques et exergetique du cuiseur, cette partie concerne la détermination des éléments caractéristiques des performances du cuiseur boîte réalisé. Comme l'a suggéré Ozturk en 2007 [145], la variation des rendements énergétiques et exergetiques, les valeurs maximales et moyennes, les valeurs spécifiques à une différence de température de 50 °C sont évaluées à partir des courbes de régression. Sur la base de la méthode proposée par Kumar et al. [163], quatre paramètres indicateurs des performances du cuiseur sont également déterminés; à savoir : la puissance crête exergetique, le produit de l'écart de température exergetique, le coefficient de pertes thermiques et le facteur de qualité.

3.6.5.1. Courbe de régression déterminante des efficacités spécifiques du cuiseur

L'effet de la différence de température sur le rendement énergétique et exergetique du cuiseur est illustré sur la figure (3.34) et figure (3.35) pour le test réalisé le 04 Février 2013 (sans réflecteur) et pour le test du 02 Février 2014 (avec réflecteur); respectivement. Suivant ces résultats; pour une charge d'eau de 2 L, le rendement énergétique du cuiseur varie entre 6.45 et 18.82 % pour le premier test et entre 8.84 et 20.73 % pour le second test, quand la température de l'eau enregistre une variation entre 40 et 90 °C. Le rendement journalier moyen au cours de la période expérimentale (10 h et 16 h) est calculé comme étant 12.27 % pour le test sans réflecteur et 17.24 % pour le test du cuiseur avec son réflecteur principal. Ces résultats sont en parfaite cohérence avec ceux trouvés par Todd et Miller [164] en 2001, ces derniers ont constaté que le rendement moyen des cuiseurs boîtes sont de 8 à 22 %, pour les meilleures conceptions. D'autre part, le rendement exergetique du cuiseur varie de 1.27 à 2.75 % pour le test du 04 Février 2013, alors qu'il varie de 1.60 à 3.44 % pour le test du 02 Février 2014, le rendement exergetique moyen est estimé à 1.97 % pour le premier test et à 2.57 % pour le second test.

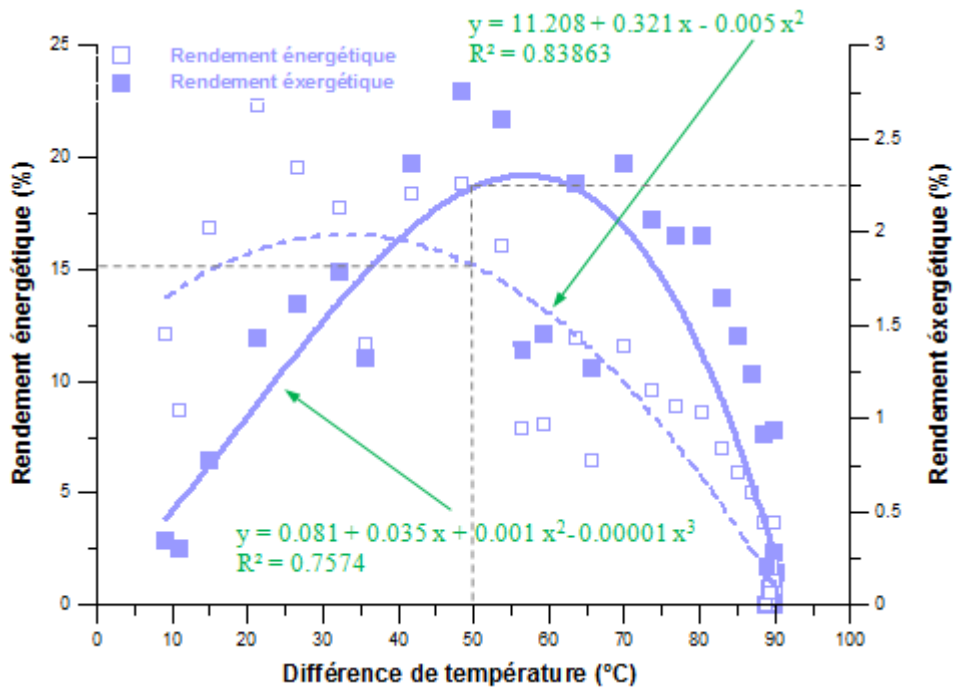


Fig 3.34: Effet de la différence de température sur le rendement énergétique et exergétique du CSBSRI réalisé pour le test du 04/02/2013, sans l'ajout du réflecteur et avec une charge d'eau de 2 L.

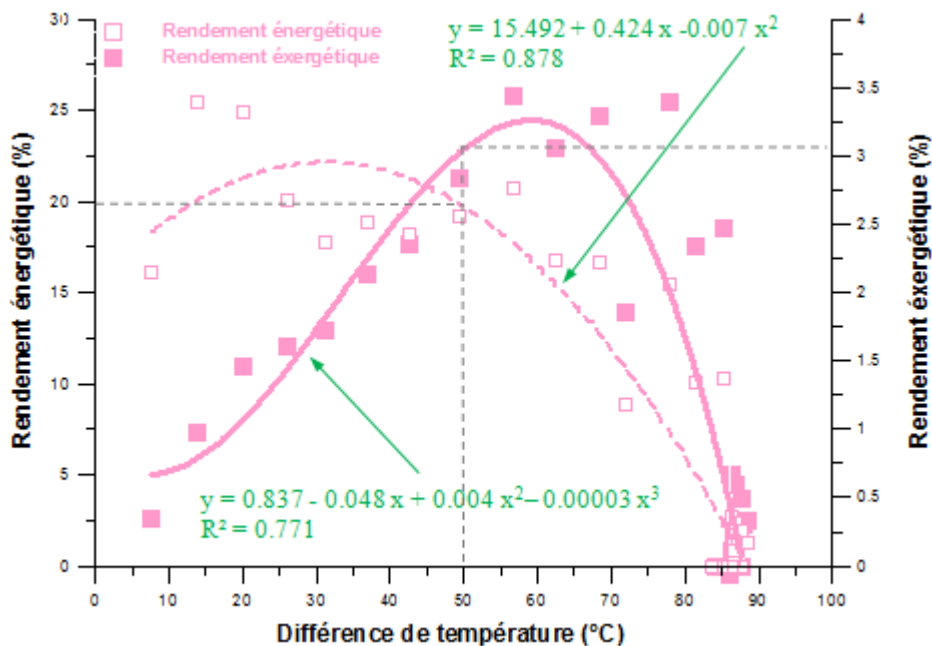


Fig 3.35: Effet de la différence de température sur le rendement énergétique et exergétique du CSBSRI réalisé pour le test du 02/02/2014, avec l'ajout d'un réflecteur et avec une charge d'eau de 2 L.

Nous avons tracé une régression linéaire des points pour trouver la relation entre le rendement énergétique et la différence de température. D'après les courbes, nous avons constaté que le rendement énergétique est un polynôme du 2^{ème} ordre pour les deux cas, les valeurs des rendements énergétiques

diminuent quand la différence de température augmente. Le rendement énergétique en fonction de la différence de température pour notre cuiseur testé à Ghardaïa est donné par l'équation (3.38) et (3.39) pour le test du 04 Février 2013 et le test du 02 Février 2014; respectivement. Le coefficient de régression linéaire est de $R^2 = 0.84 \%$ et $R^2 = 0.88 \%$, respectivement. La valeur du rendement énergétique est calculée pour une différence de température de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ en utilisant les relations déterminées ci-dessus, La valeur du rendement énergétique correspondant au test sans réflecteur est de 15.14% , cette valeur est calculée comme étant 19.74% en ajoutant un réflecteur au cuiseur (second test).

$$\eta (0\text{Ref}) = -0.005(\Delta T^2) + 0.321(\Delta T) + 11.208 \quad (3.38)$$

$$\eta (1\text{Ref}) = -0.007(\Delta T^2) + 0.424(\Delta T) + 15.492 \quad (3.39)$$

De la même manière, nous avons tracé une régression linéaire des points pour trouver la relation entre le rendement exergetique et la différence de température. D'après les courbes, nous avons constaté que le rendement exergetique est un polynôme du 3^{ème} ordre pour les deux cas, les valeurs des rendements exergetiques augmentent progressivement avec la différence de température puis diminuent lentement. Le rendement exergetique en fonction de la différence de température pour notre cuiseur testé à Ghardaïa est donné par l'équation (3.40) et (3.41) pour le premier et le second test; respectivement. Le coefficient de régression linéaire est de $R^2 = 0.76 \%$ et $R^2 = 0.77 \%$, respectivement. La valeur du rendement exergetique est calculée pour une différence de température de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ en utilisant les relations déterminées ci-dessus, La valeur du rendement exergetique correspondant au test sans réflecteur est de 2.24% , cette valeur est calculée comme étant 3.05% en ajoutant un réflecteur au cuiseur (second test).

$$\psi (0\text{Ref}) = -1.3 \cdot 10^{-5} (\Delta T^3) + 0.0008 (\Delta T^2) + 0.0353 (\Delta T) + 0.0815 \quad (3.40)$$

$$\psi (1\text{Ref}) = -3.7 \cdot 10^{-5} (\Delta T^3) + 0.004 (\Delta T^2) - 0.048 (\Delta T) + 0.837 \quad (3.41)$$

3.6.5.2. Détermination des paramètres indicateurs des performances du cuiseur

Comme proposé par Kumar [163], la puissance crête exergetique (Ξ_{x0_max}), le produit de l'écart de température exergetique ($\Delta T \Xi_{x0}$), le coefficient de pertes thermiques (U_{Lx0}) et le facteur de qualité (ρ_{sc}) sont également évalués. La puissance crête exergetique est la puissance de sortie maximale obtenue de la courbe d'ajustement en traçant le graphique entre la puissance exergetique de sortie (Ξ_{x0}) et la différence de température de l'eau et de l'ambiance ΔT , un cuiseur atteignant une puissance exergetique élevée à une grande différence de température est meilleur. Le facteur de qualité (ρ_{sc}) est défini comme le rapport entre la puissance crête exergetique et les pertes en puissance exergetique

correspondante au même instant. Un facteur de qualité élevé est souhaitable, une valeur plus élevée de ce facteur signifie une valeur petite du coefficient de perte thermique. Le produit de l'écart de température exergétique correspondant à la moitié de la puissance crête exergétique ($\Delta T \Xi_{x0}$) peut également être considéré comme un autre indicateur de référence dans ce type d'analyses, une valeur du produit de l'écart de température exergétique élevée signifie que les pertes en chaleur sont minimisées. Le coefficient de pertes thermiques (U_{Lx0}) est obtenu en divisant la valeur de la pente de la droite obtenue à partir de la courbe d'ajustement des variations des pertes en puissance exergétique (le second terme du numérateur de l'équation (3.23)) en fonction de la différence de température, par la valeur de la surface du vitrage du cuiseur.

Les variations de la puissance exergétique de sortie en fonction de la différence de température pour le test réalisé le 04 Février 2013 (sans réflecteur) et pour le test du 02 Février 2014 (avec réflecteur), sont présentées sur les Figures 3.36a et 3.37a, respectivement. Les courbes des pertes en puissance exergétique en fonction de la différence de température sont tracées sur les Figures 3.36b et 3.37b, pour le premier et le second test, respectivement.

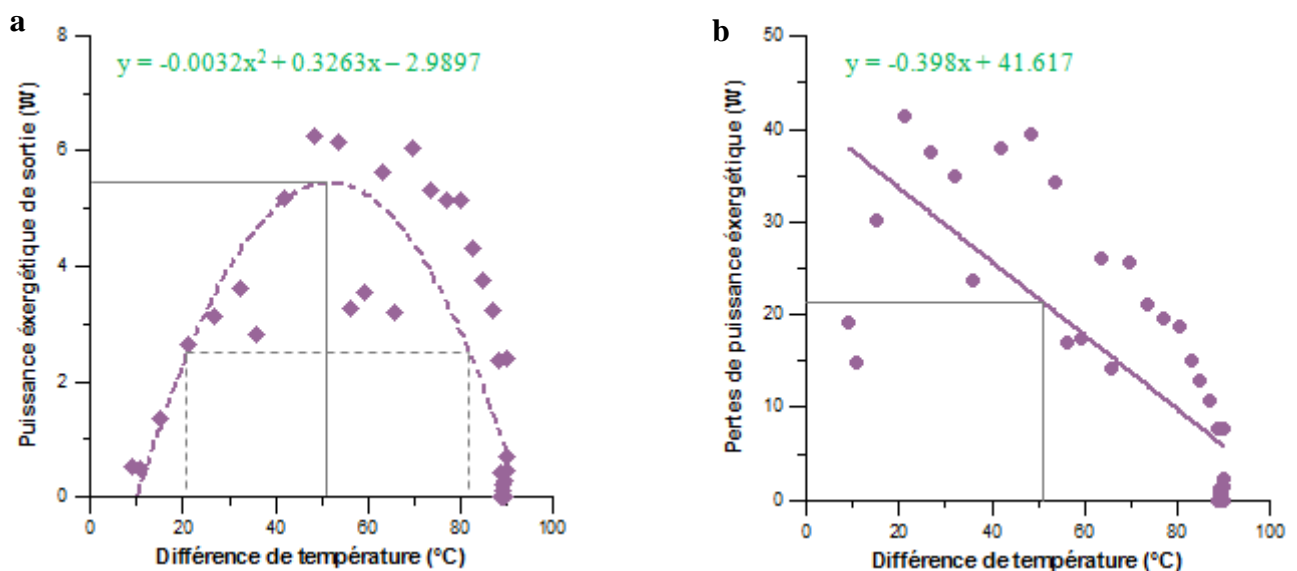


Fig 3.36: Détermination des paramètres indicateurs de performances du CSBSRI pour le test du 04/02/2013, sans l'ajout du réflecteur et avec une charge d'eau de 2 L: (a) variation de la puissance exergétique de sortie; (b) variation des pertes en puissance exergétique, en fonction de la différence de température.

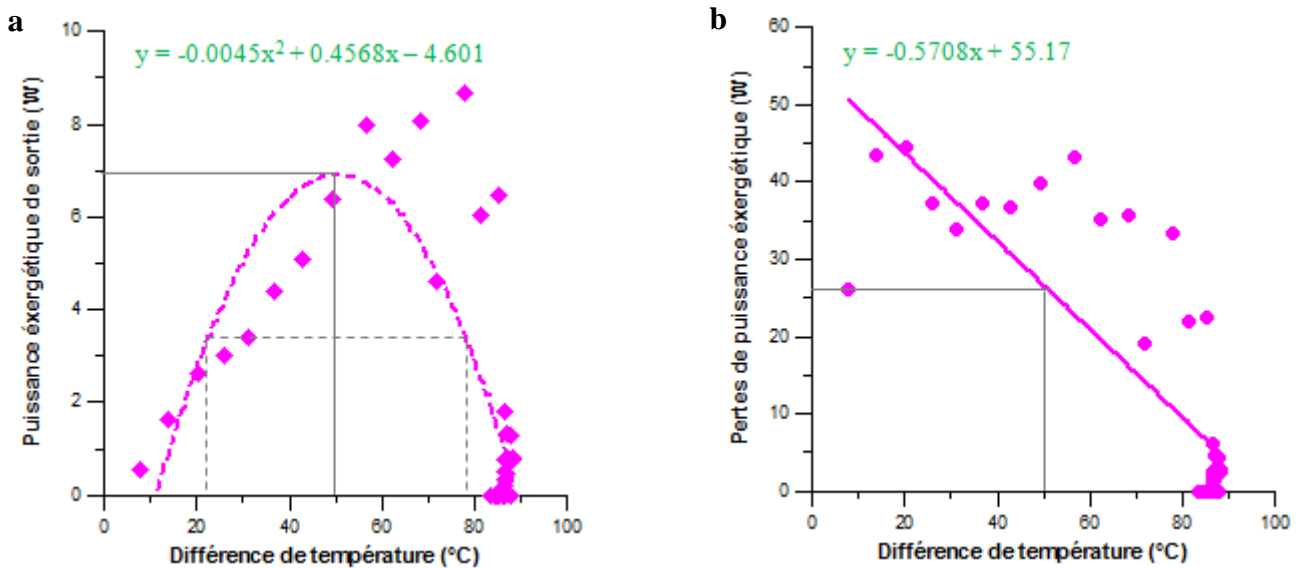


Fig 3.37: Détermination des paramètres indicateurs de performances du CSBSRI pour le test du 02/02/2014, avec l'ajout d'un réflecteur et avec une charge d'eau de 2 L: (a) variation de la puissance exergétique de sortie; (b) variation des pertes en puissance exergétique, en fonction de la différence de température.

On peut constater d'après les résultats des courbes, que la puissance exergétique de sortie maximale a atteint 5.33 W à une différence de température de 53.5 °C pour le test sans réflecteur et elle est de l'ordre de 6.8 W à un ΔT égal à 49.4 °C pour le cuiseur avec réflecteur.

Les points correspondants à la moitié de la puissance crête exergétique (H.E.Ps.) sont situés à la différence de température de 80.3 et 21.2 °C (premier test), les H.E.Ps. sont entre 77.83 et 33.21 °C (second test). Les pertes en puissance exergétique à la même différence de température sont égales à 21.41 W et à 26.13 W, respectivement. La valeur du produit de l'écart de température exergétique est de 315 WK et de 303.38 WK, pour le premier et le second test, respectivement.

D'après ces résultats, il a été également constaté que la variation des pertes en puissance exergétique en fonction de la différence de température est presque linéaire lorsque ΔT est comprise entre 60 et 95 °C, et c'est la même marge adoptée par Mullick [136] pour calculer la seconde figure of merit F_2 . Les valeurs du coefficient de pertes thermiques sont alors déterminées comme étant 1.93 W/m²K et 2.72 W/m²K. Le facteur de qualité est alors égal à 0.249 et à 0.26, pour le cas sans et avec réflecteur, respectivement. Le coefficient de pertes thermiques spécifique du cuiseur (U_{LL}) à une charge de 2L est de 0.97 W/m² K kg (premier test) et de 1.36 W/m² K kg (second test).

3.7. VALIDATION DES RESULTATS OBTENUS

3.7.1. Comparaison des résultats avec d'autres cuiseurs

Dans le but d'une meilleure évaluation des performances thermiques du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée, les résultats des tests expérimentaux de stagnation obtenus de notre cuiseur sont comparés avec d'autres prototypes de cuiseurs boîtes réalisés à travers le monde (voir Tab 3.6). Ce tableau montre que; en période hivernale, la valeur de la température de stagnation de la plaque absorbante de notre cuiseur solaire (128 °C) est comptée parmi les températures les plus élevées des autres cuiseurs boîtes, ceci indique une amélioration considérable des performances du design réalisé.

Réf N°	Référence	Date du test	Eclairement solaire (W/m ²)	Température ambiante (°C)	Température de stagnation (°C)	Temps à la stagnation (LT)
1	Vishaya et al. [165]	23/09/1982	1020	32	122	12:00
2	Nahar [166]	–	760	28	132	14:00
3	Negi and Purohit [52]	–	630	23	105.9	12:00
4	Purohit and Purohit [41]	–	950	32	138	12:30
5	Kumar et al. [53, 54]	–	858	38	138	13:40
6	Harmim et al. [8]	23/07/2008	960	48	140	12:00
7	Harmim et al. [167]	30/12/2012	719	18.2	127.7	12:30
8	Mahavar et al. [168] SFSC-1	17/06/2009	945	35	140	13:00
9	Mahavar et al. [169] SFSC-2	20/05/2010	859	42.5	144	13:20
10	El-Sebaili and Ibrahim [48]	21/07/2002	–	–	122	–
11	Sethi et al. [159]	Janvier 2010	980	20	125	13:00
12	Misra et al. [170]	01/01/2010	662	39.6	133.9	11:30
13	Farooqui [171]	13/11/2012	742.5	36.5	130	–
14	Fayadh [172]	04/03/2011	700	25	110	11:55
15	Yettou et al. [154]	05/02/2013	792	12.5	127.6	13:05

Tab 3.6: Comparaison des températures de stagnation de notre cuiseur solaire avec d'autres cuiseurs boîtes réalisés dans le monde.

Les valeurs de la première et la deuxième figure of merit sont aussi comparées avec d'autres cuiseurs de type boîte comme l'indique le tableau 3.7. Testé en saison d'hiver sur le site de Ghardaïa, sans réflecteurs ajoutés et avec une capacité importante, notre design de cuiseur est caractérisé par des valeurs remarquables de F_1 et F_2 . Ceci est expliqué par une bonne isolation thermique et une bonne réception des rayons solaires quel que soit l'angle de la hauteur solaire.

Selon les Normes de Mullick [136], un cuiseur boîte avec une valeur de F_1 supérieure à 0.12 est classé 'Grade A' et un cuiseur avec une valeur de F_1 inférieure à 0.12 est classé 'Grade B', à cet effet notre cuiseur réalisé est classé 'Grade A'.

Réf N°	Référence	F_1 (m ² °C/W)	F_2	Quantité d'eau (kg)
1	Kumar et al. [53]	0.117	0.467	2
2	Kumar et al. [43]	–	0.487	2
3	Negi and Purohit [52]	0.1252	0.4051	–
4	Purohit and Purohit [41]	0.1251	0.4805	1.844
5	El-Sebaili and Ibrahim [48]	0.15	0.407	4
6	Harmim et al. [167]	0.152	0.47	3.5
7	Mahavar et al. [168] SFSC-1	0.116	0.466	1.2
8	Mahavar et al. [169] SFSC-2	0.118	0.488	1.2
9	Sethi et al. [159]	0.16	0.54	–
10	Misra et al. [170]	0.1424	0.408	1
11	Farooqui [171]	0.1258	0.369	1.37
12	Fayadh [172]	0.11	0,34	–
13	Yettou et al. [154]	0.145	0,391	1.6

Tab 3.7: Comparaison des valeurs de la première et la deuxième figure of merit de notre cuiseur solaire avec d'autres cuiseurs boîtes réalisés dans le monde.

La puissance de cuisson ajustée est également comparée avec d'autres valeurs de cuiseurs solaires de type boîte sur le tableau 3.8. Notre cuiseur est caractérisé par une bonne thermo-isolation (faible pente de la droite de régression de puissance de cuisson) et une surface de réception relativement élevée (puissance de cuisson initiale), en respect du Standard Européen proposé par Funk [139, 140].

Réf N°	Référence	Date du test	Puissance de cuisson ajustée	Puissance standardisée (W)
1	Funk [173]	17/11/1998	$P_{adj} = 115 - 1.56 (\Delta T)$	37
2	Funk [173]	17/05/1997	$P_{adj} = 125 - 1.58 (\Delta T)$	46
3	El-Sebaili and Ibrahim [48]	28/07/2002	$P_{adj} = 103.92 - 1.598 (\Delta T)$	22.02
4	Mahavar et al. [168] SFSC-1	24/06/2009	$P_{adj} = 103.5 - 1.474 (\Delta T)$	30
5	Mahavar et al. [169] SFSC-2	30/11/2010	$P_{adj} = 108.2 - 1.084 (\Delta T)$	52
6	Harmim et al. [167]	26/02/2013	$P_{adj} = 136.28 - 1.142 (\Delta T)$	78.9

7	Fayadh [172]	Mars_2011	$P_{adj} = 5.321 - 19.532 (\Delta T)$	–
8	Sethi et al. [159]	23/01/2013	$P_{adj} = -14.923 + 2.4418(\Delta T)$	103
9	Sethi et al. [159]	23/01/2013	$P_{adj} = -23.43 + 3.9976 (\Delta T)$	175
10	Yettou et al. [154]	02/02/2014	$P_{adj} = 96.706 - 0.9611(\Delta T)$	48
11	Yettou et al. [154]	25/06/2014	$P_{adj} = 110.78 - 1.6715(\Delta T)$	26

Tab 3.8: Expression de la puissance de cuisson ajustée de notre cuiseur solaire comparée avec d'autres cuiseurs boîtes réalisés dans le monde.

Nous avons également effectué une comparaison des performances du cuiseur réalisé avec d'autres cuiseurs réalisés à travers le monde (voir Tab 3.9) en termes de rendement énergétique et exergétique suivant la procédure testé par Ozturk [160] et Panwar et al. [84]. Notre cuiseur réalisé avec un réflecteur ajouté et une charge de 2 L d'eau est caractérisé par des valeurs de rendement énergétique (16.23 %) et exergétique (1.2 %) très acceptables comparés aux meilleurs cuiseurs boîtes réalisés.

Réf N°	Variables (moyenne journalière)	(SBC) Kumar [49]	(TPBSC) Kumar [163]	(AFC) Panwar [84]	(PDC) Panwar [161]	(SBC) Ozturk [160]	(SPC) Ozturk [145]	(CSBSRI) Yettou [156]
1	Différence de température (°C)	40.75	37.65	15.90	–	42.9	31.56	47.02
2	Eclairement solaire (W/m ²)	816.93	828.80	–	750.00	785.00	785.00	989.40
3	Energie d'entrée (kJ)	58.87	61.14	179.17	2599.92	133.6	–	140.11
4	Energie de sortie (kJ)	15.42	15.78	25.48	260.40	21.6	47.20	9.04
5	Exergie d'entrée (kJ)	54.66	56.81	166.48	2412.93	124.5	–	130.61
6	Exergie de sortie (kJ)	1.56	1.61	1.42	21.34	2.50	4.75	0.97
7	Rendement énergétique (%)	26.21	26.52	15.45	14.45	18.30	9.22	16.23
8	Rendement exergétique (%)	2.85	2.78	0.81	1.41	2.20	0.83	1.20

Tab 3.9: Paramètres du rendement énergétique et exergétique calculés de notre cuiseur solaire comparés avec d'autres cuiseurs boîtes réalisés dans le monde.

Les éléments caractéristiques de performances obtenus pour notre cuiseur; suivant la méthode appliquée par Kumar [163], ont été également sujet de validation (voir Tab 3.10). Du point de vue thermodynamique, les cuiseurs solaires boîtes; caractérisé par un coefficient de perte thermique faible

et un facteur de qualité élevé, sont les meilleurs dispositifs de cuisson solaire. Notre cuiseur réalisé est caractérisé par un facteur de qualité élevé (0.26), comparé avec d'autres valeurs des cuiseurs solaires boîtes réalisés à travers le monde. Avec un taux d'augmentation de la température moyen (303 WK), une puissance crête exergétique relativement élevée (6.8 W), un faible coefficient de pertes thermiques (2.7 W/Km²) et un rendement énergétique max de 21 %, il est bien adapté à la cuisson de divers aliments.

Le produit de l'écart de température exergétique est un paramètre représentant le taux d'augmentation de la température de l'eau durant la période d'évaluation. Sur cette base, le type SK-14 et le cuiseur Scheffler sont les plus appropriés pour une cuisson rapide. Cependant, entre ces deux, le SK-14 a un coefficient de perte thermique petit avec un facteur de qualité élevé et peut donc être considéré comme un meilleur dispositif pour des cuissons rapides à petites opérations (résidentielles). Cependant, pour des applications industrielles le concentrateur Scheffler est préférable en raison de la puissance crête exergétique et le produit de l'écart de température exergétique élevés. Sur la base de cette étude le simple cuiseur cylindro-parabolique est le moins meilleur.

Réf N°	Types de cuiseurs solaires	Paramètres indicateurs					
		Puissance crête exergétique	Produit de l'écart de température exergétique	Coefficient de pertes thermiques	Facteur de qualité	Rendement exergétique maximum	Rendement énergétique maximum
		(Ξ_{xo_max}) (W)	($\Delta T \Xi_{xo}$) (WK)	(U_{Lxo}) (W/Km ²)		[-]	Ψ_{max} (%)
1	SK-14 (domestique) [174], $m_w = 5$ kg, $A_s = 0.13$	18.21	735.21	40.35	0.11	–	–
2	Scheffler (communauté) [174], $m_w = 20$ kg, $A_s = 0.36$	55.75	2208.98	54.13	0.10	–	–
3	Parabolic trough [174], $m_w = 6.3$ kg, $A_s = 0.09$	6.91	160.08	47.74	0.09	–	–
4	Truncated pyramid type solar box cooker [175], $m_w =$ 2 kg, $A_s = 0.25$	7.12	356.20	4.09	0.15	3.89	36.38
5	Domestic solar box cooker [174], $m_w =$ 2.5 kg, $A_s = 0.25$	6.46	298.45	5.24	0.12	–	–
6	Stationary building- integrated solar cooker [176], $m_w =$ 5 kg, $A_s = 0.46$	21.40	1134.20	4.11	0.22	2.43	27.15

7	Notre cuiseur, $m_w = 2$ kg, $A_s = 0.21$ (sans booster)	5.33	315.00	1.93	0.25	2.75	18.82
8	Notre cuiseur, $m_w = 2$ kg, $A_s = 0.21$ (avec booster)	6.80	303.38	2.72	0.26	3.44	20.73

Tab 3.10: Paramètres indicateurs des performances obtenus pour notre cuiseur solaire comparés avec d'autres cuiseurs boîtes réalisés dans le monde.

3.7.2. Résultats de quelques préparations à l'aide du cuiseur boîte réalisé

Des tests de cuisson de différents aliments ont été également effectués durant le mois d'avril 2012, dans le but de monter l'efficacité du cuiseur réalisé. Les temps de cuisson de ces aliments sont présentés sur le tableau 3.11. La préparation des différents plats a été réalisée en respectant les contraintes suivantes:

- Fréquence: Deux (02) repas par jour.
- Quantité: Suffisant pour deux (02) personnes.
- Temps: Le premier repas est programmé à 13 h heures (ALT).
- Interaction: Les plats alimentaires peuvent nécessiter l'ouverture du cuiseur pendant la préparation.

La figure (3.38) représente une vue de quelques préparations réalisées à l'aide du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée.

Date	Premier repas			Second repas		
	Temps de début	Produits alimentaires	Temps de cuisson	Temps de début	Produits alimentaires	Temps de cuisson
10 Avr 2012	10:00	2 C à S de café	45 min	14:00	2 C à S de café	30 min
11 Avr 2012	10:00	3 oeufs + 250 g d'eau	30 min	14:00	3 oeufs + 250 g d'eau	20 min
12 Avr 2012	10:00	250 pommes de terre + 500 g d'eau + sel + poivre	50 min	14:00	250 pommes de terre + 500 g d'eau + sel + poivre	35 min
15 Avr 2012	10:00	250 g riz + 500 g d'eau	1 h 15 min	13:00	250 g riz + 500 g d'eau	50 min
16 Avr 2012	10:00	Cuisse de poulet + sel + poivre	2 h	13:00	Cuisse de poulet + sel + poivre	1 h 40 min

Tab 3.11: Tests de cuisson pour différents produits alimentaires à l'aide de notre cuiseur réalisé.

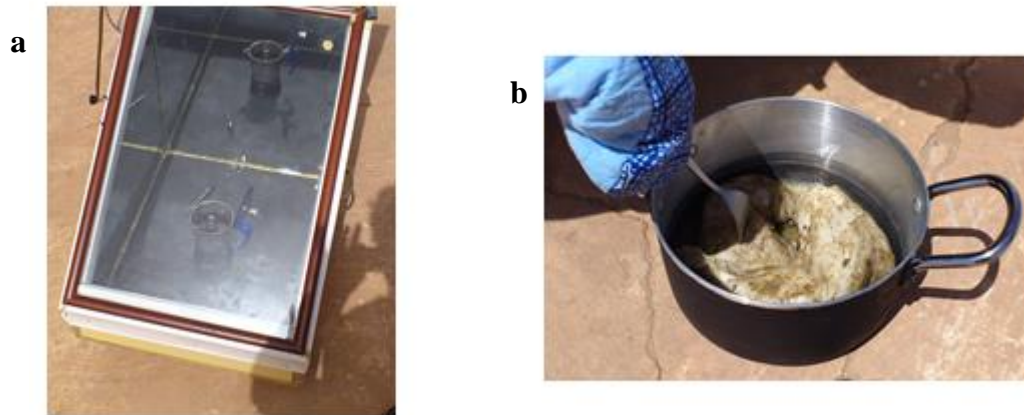


Fig 3.38: Vue de quelques préparations à l'aide du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée: (a) préparation d'un café; (b) préparation des cuisses de poulet.

3.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, une évaluation des performances du cuiseur boîte réalisé suivant les Normes et Standards Internationaux est présentée. Les résultats obtenus montrent que le présent cuiseur est bien conçu et ces performances sont efficaces, notre cuiseur solaire est caractérisé par une bonne valeur du paramètre F_1 ($0.145 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$) en raison de la bonne interception des rayons solaires, conséquence du design à surface réceptrice inclinée proposé, une valeur de F_1 élevée est un signe d'un bon rendement optique η_0 . L'intervalle de temps τ du processus de chaleur sensible est réduit d'une manière remarquable (de 23.8 %) par rapport au cuiseur horizontal, la durée de temps est très suffisante pour la préparation de deux repas successive d'une famille dans la journée. La valeur de F_2 (0.391) est également élevée, ce qui indique une bonne efficacité de transfert de chaleur depuis la plaque d'absorbeur et l'air intérieur vers le contenu du récipient de cuisson. Des valeurs obtenues élevées de la puissance de cuisson initiales ($P_{\text{ini}} = 97$) associée à un faible coefficient de pertes en chaleur ($0.96 \text{ W}/^\circ\text{C}$) indiquent une bonne isolation de notre cuiseur solaire boîte, selon le Standard International.

En ajoutant un réflecteur au design du cuiseur, les rendements énergétiques et exergétiques se trouvent améliorés (16.2 et 0.9 % par rapport à 13.6 et 0.73 %). Ces deux rendements sont également proportionnels au volume de l'eau utilisé (16.23 et 1.20 % par rapport à 10.97 et 0.9 %). Le cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée est caractérisé par un facteur de qualité élevé (0.26), comparé avec d'autres valeurs des cuiseurs solaires boîtes réalisé à travers le monde. Avec un taux d'augmentation de la température moyen (303 WK), une puissance crête exergétique relativement élevée (6.8 W), un faible coefficient de pertes thermiques ($2.7 \text{ W}/\text{Km}^2$) et un rendement énergétique max de 21 %, notre cuiseur solaire; réalisé et testé sur le site de Ghardaïa, est bien adapté à la cuisson de divers aliments.

L'approche présentée dans ce document est complète, réaliste et flexible. A la lumière de ces résultats; et comme perspectives envisagées, nous pensons qu'il serait possible et bénéfique d'établir des Normes d'Essai des cuiseurs solaires sur une base exergétique (exergy based test Standards). La puissance exergétique de sortie; si nécessaire, peut être converti en valeurs normalisées. Néanmoins, une exigence de tests expérimentaux extensifs et l'analyse de leurs résultats s'avèrent indispensables. L'étude de l'efficacité et la possibilité d'intégration du cuiseur solaire réalisé à travers l'ensemble du territoire national reste à étudier, cet aspect fera l'objet du dernier chapitre de cette thèse.

CHAPITRE 4

FAISABILITE DE LA CUISSON SOLAIRE EN ALGERIE : CARTES DU CUISEUR SOLAIRE

4.1. INTRODUCTION

La consommation d'énergie dans les pays développés croît à un rythme d'environ 1% par an, et celle des pays en développement, 5% par an [177]. A ce rythme, les réserves actuelles en pétrole et en gaz naturel ne peuvent couvrir la consommation mondiale que pour les 50 prochaines années dans le cas du pétrole, et pour les prochains 70 ans dans le cas du gaz naturel [178]. Toutefois, l'une des priorités fondamentales pour un pays comme l'Algérie est d'exploiter les sources d'énergies renouvelables et d'utiliser leurs systèmes de conversion d'énergie possédant des technologies respectueuses à l'environnement. Sur la figure (4.1), les régions colorées de la carte ont un ensoleillement abondant; favorable pour la cuisson solaire, durant presque toute l'année avec une moyenne annuelle d'ensoleillement supérieure à 4 kWh/m²/jour [179]. L'Algérie; de par sa situation géographique, dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre 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 [180]. Ce sont des conditions climatiques très favorables pour toutes les applications de l'énergie solaire spécialement la cuisson résidentielle, en particulier; si on considère que la demande algérienne globale à l'énergie pour la cuisson est prévue d'augmenter considérablement avec l'augmentation de la population au cours des prochaines années et sachant que la demande actuelle est couverte par l'utilisation du gaz naturel (villes) et par le bois des forêts dans les zones rurales et isolées [178].

Suite à une simulation optique de l'éclairement solaire concentré reçu sur la plaque absorbante d'un cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée, une réalisation expérimentale du cuiseur en question à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, et une éventuelle évaluation de ces performances thermiques, nous représentons dans ce dernier chapitre la cartographie

des températures atteinte par l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée; sans et avec réflecteur additionnel, estimées en période hivernales et estivales, en considérant les 48 wilayas de l'Algérie. Deux différentes approches sont considérées, la première approche (approche optique) est basée sur l'exploitation des résultats de la simulation optique des irradiances solaires incidentes sur l'absorbeur du cuiseur boîte. La deuxième approche (approche thermique) consiste à l'estimation des températures du cuiseur à partir d'un modèle mathématique du bilan énergétique du cuiseur développé à cet effet solidaire du programme de calcul des irradiances solaires. L'objectif principal; de part ces méthodes, est la cartographie des températures du cuiseur afin d'identifier son efficacité sur l'ensemble du territoire Algérien.

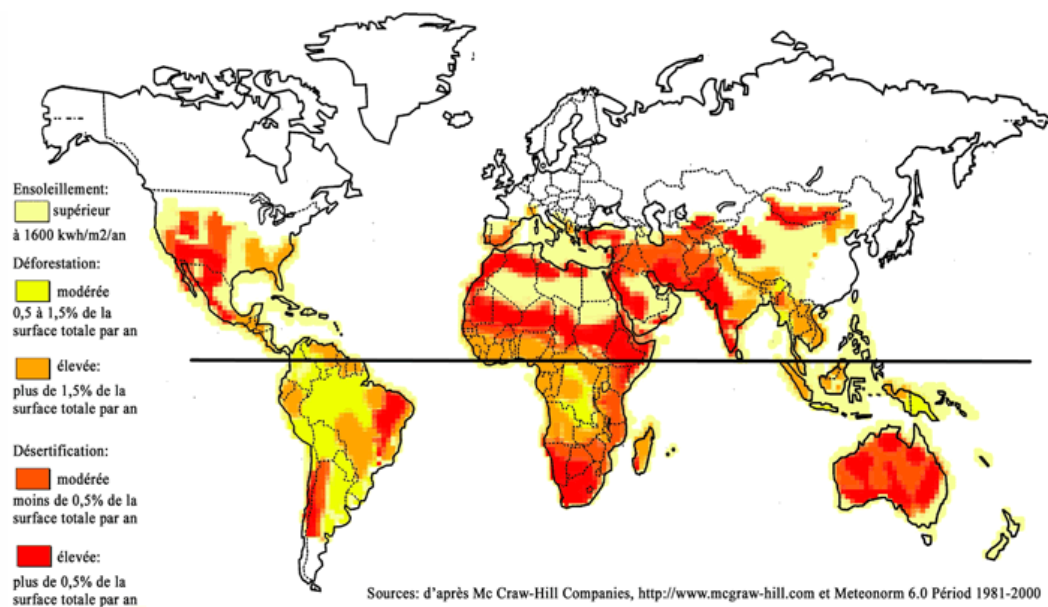


Fig 4.1: Zones du monde prioritaires pour le développement de la cuisson solaire [181].

4.2. PREMIERE APPROCHE (APPROCHE OPTIQUE) POUR LA CARTOGRAPHIE DES TEMPERATURES DU CUISEUR SOLAIRE BOITE A SURFACE RECEPTRICE INCLINEE SANS ET AVEC REFLECTEUR EN ALGERIE

4.2.1. Méthodologie adoptée

L'approche adoptée pour la réalisation des cartes des températures du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée peut être devisée en quatre étapes essentielles [182] :

- Etape 1 (Utilisation du langage Matlab [16]) : Cette étape concerne la modélisation sous environnement Matlab 2010 des paramètres de position du soleil (hauteur et azimut) nécessaires pour le calcul de l'éclairement direct, diffus et global incident sur un plan horizontal par ciel clair.
- Etape 2 (Utilisation du logiciel Tracepro [14]) : Après conception du cuiseur sur logiciel Solid Works [13], nous procéderons à la simulation optique de la répartition des rayons solaires incidents sur la

plaque absorbante du cuiseur boîte sans et avec réflecteur additionnel, à l'aide du logiciel Tracepro 7.01 [14], qui est un logiciel de simulation optique puissant basé sur la méthode 'RayTrace', et qui fait la simulation de presque tous les phénomènes optiques, pour cela nous avons converti les coordonnées du soleil calculées par Matlab en coordonnées de source de lumière sous format vectoriel utilisé par le logiciel [14]. Nous avons également inséré les valeurs de l'éclairement solaire déjà calculées pour le jour et l'heure considérée de la simulation.

- Etape 3 (Stefan-Boltzmann law) : Les cuiseurs solaires sont une application directe des lois du transfert de chaleur par rayonnement, principalement de la loi de Stephan-Boltzmann, qui stipule que la densité du flux émise ou reçue par un corps est proportionnelle à la 4^{ème} puissance de sa température. L'étape suivante consiste à faire le passage entre les données optiques et leurs correspondantes thermiques en faisant la conversion des résultats de l'éclairement concentré issus de la simulation optique en valeurs de température de l'absorbeur du cuiseur par application de la fameuse équation d'un corps noir de 'Stefan-Boltzmann law' [183] suivante :

$$C_{\max} R_1 R_2 I_s = \sigma_s T^4 \quad (4.1)$$

Où : C_{\max} est le facteur de concentration, il est égal à l'éclairement concentré divisé par l'éclairement incident, $R_1 R_2 = R_v$ représente la réflectivité du verre, I_s est l'éclairement incident en W/m^2 , σ_s est la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$), T^4 est la température en $^{\circ}K$.

- Etape 4 (Utilisation du logiciel Surfer [19]) : Les étapes précédentes sont ensuite appliquées sur 62 points, répartis sur diverses localisations géographiques de l'Algérie (y compris les coordonnées des 48 wilayas connues) afin de créer un fichier matriciel compatible aux formats de lecture du logiciel Surfer 8.02. Le logiciel Surfer de Golden Software Inc [19], est un outil universel de tracé de contours, de surfaces et de représentations cartographiques en 3D. Il permet également de faire des interpolations entre deux points adjacents avec une grande précision. La lecture du fichier matriciel XYZ par le logiciel Surfer, offre la possibilité de projection des résultats obtenus sur des cartes illustratifs analysables, ainsi des cartes de l'éclairement solaire, de l'éclairement concentré et des températures sont obtenues. Les cartes d'efficacité du cuiseur sans et avec ajout du réflecteur sont ensuite générées pour l'ensemble du territoire Algérien. La figure (4.2) donne un récapitulatif des quatre étapes appliquées pour l'obtention des cartes, la figure (4.3) illustre la manière d'utilisation du réflecteur dans le cas du cuiseur sans réflecteur avec réflecteur additionnel.

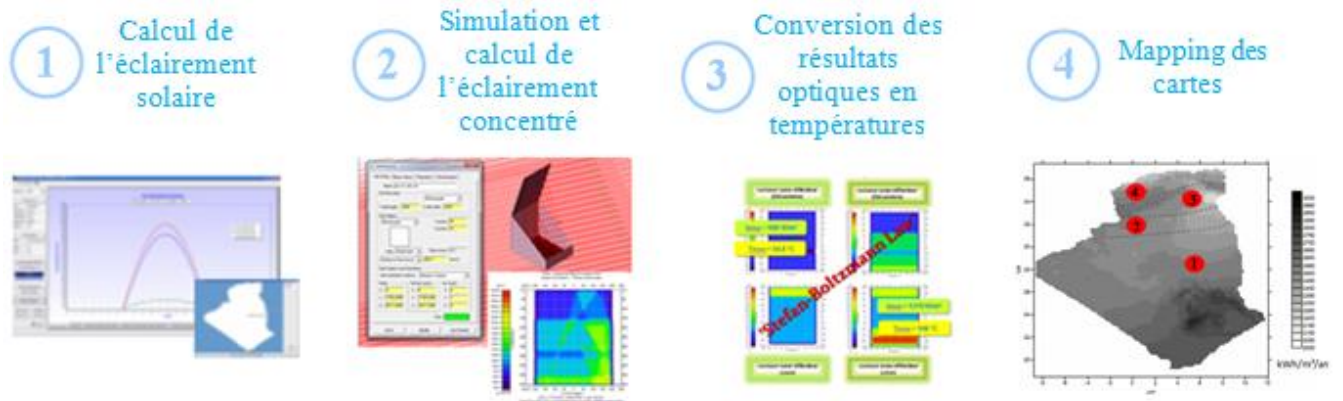


Fig 4.2: Représentation des étapes de réalisation des cartes suivant l'approche optique [182].

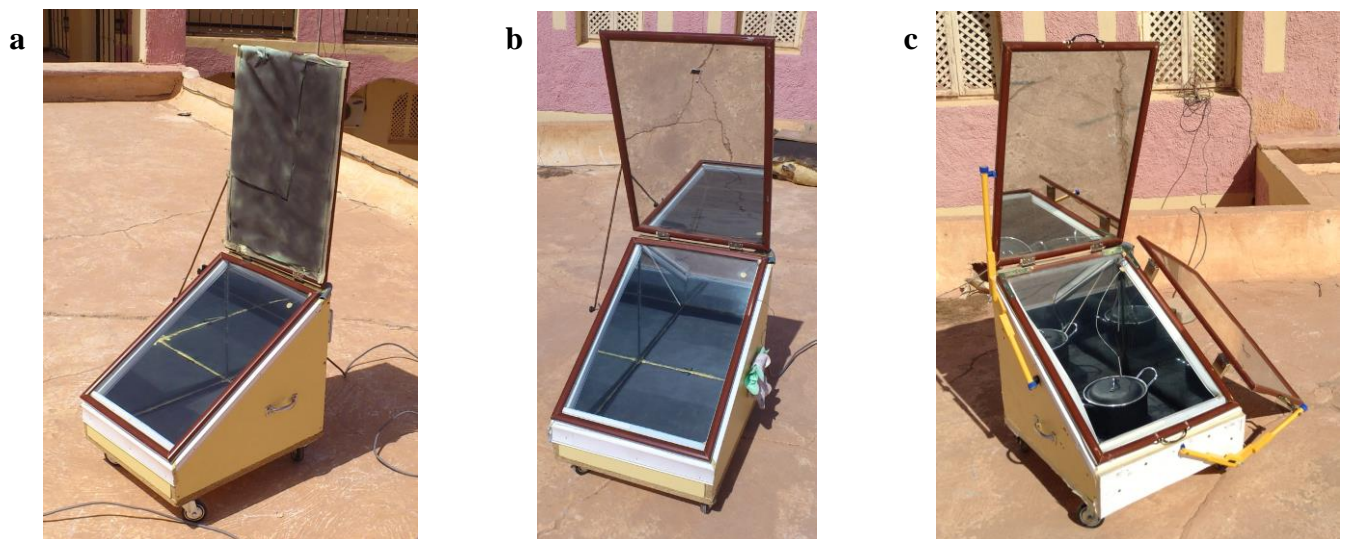


Fig 4.3: Vue du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée retenu pour le mapping des cartes à l'échelle nationale: **(a)** réflecteur hors service; **(b)** réflecteur principal en fonctionnement; **(c)** réflecteur latéral hors service.

4.2.1.1. Exemple de simulation pour le site de Ghardaïa

La figure (4.4) représente un exemple des résultats de la simulation optique par Tracepro de l'éclairement concentré incident sur l'absorbeur du cuiseur sans et avec utilisation du réflecteur pour les mois de Décembre et Juin, respectivement. On peut remarquer que la plaque absorbante du cuiseur boîte sans réflecteur est assimilée à une surface horizontale recevant une quantité de rayonnement solaire directement sans réflexion. On retrouve une quantité de 598.5 W/m^2 pratiquement sur la quasi-totalité de l'absorbeur pour le mois de Décembre (Fig. 4.4a) et une quantité de $\approx 1084 \text{ W/m}^2$ au mois de Juin (Fig. 4.4c). Dans le cas d'ajout d'un réflecteur, une plus grande quantité de l'éclairement concentré est reçu et le facteur de concentration est augmenté à cet effet. L'éclairement concentré moyenne est évalué à 989 W/m^2 pour le mois de Décembre et à 1370 W/m^2 pour le mois de Juin.

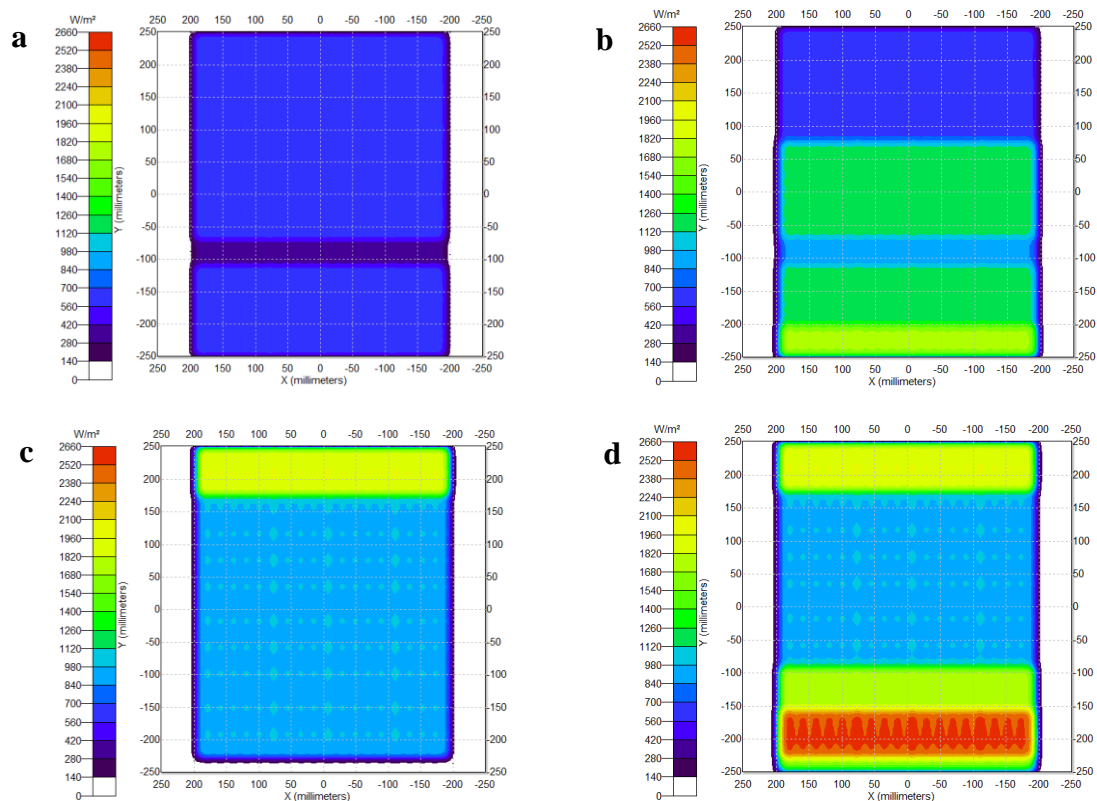


Fig 4.4: Exemple de résultats de la simulation optique de l'éclairage concentré incident sur l'absorbeur d'un cuiseur boîte à surface d'ouverture inclinée sur le site de Ghardaïa: **(a)** cuiseur sans réflecteur au mois de Décembre; **(b)** cuiseur avec réflecteur au mois de Décembre; **(c)** cuiseur sans réflecteur au mois de Juin; **(d)** cuiseur avec réflecteur au mois de Juin.

En appliquant la formule de Stefan-Boltzmann on obtient les grandeurs des températures suivantes : 54.8 °C pour le mois de Décembre sans réflecteur et 75.9 °C avec réflecteur, une température de 75.5 °C est obtenue pour le mois de Juin (sans réflecteur) et 105.6 °C (avec réflecteur). En comparant ces résultats théoriques avec ceux obtenus de l'expérimentation du cuiseur boîte sur le site de Ghardaïa (délivrés par des thermocouples type K), en considérant une quantité d'eau de 2 litre comme charge initiale; on obtient une erreur moyenne de ± 5 °C, ce qui représente une erreur très acceptable, soit des températures de 59.4 °C, 71.4 °C pour le mois de Décembre sans et avec réflecteur et 79.7°C et 108.4°C pour le mois de Juin sans et avec réflecteur; respectivement.

4.2.1.2. Validation expérimentale des résultats de simulation obtenus pour le site de Ghardaïa

Pour la validation des résultats, nous allons confronter quelques valeurs de températures atteintes par l'absorbeur du cuiseur boîte en appliquant l'approche adoptée dans cette étude avec des résultats expérimentaux obtenus des tests du cuiseur boîte sur le site de Ghardaïa (Lat : 32.23 °N, lon : 3.49 °E et Alt : 450 m) pour deux mois relatifs à deux saisons différentes durant deux moment de la journée favorables pour la cuisson solaire.

La figure (4.5) représente les résultats de la simulation par Tracepro de l'éclairement concentré incident sur l'absorbeur du cuiseur pour le mois de Septembre à midi et le mois de Mai à 11 h du matin. En tenant compte des valeurs de la hauteur du soleil (60 et 68°) et de l'azimut solaire (0 et -35°), les coordonnées du vecteur directeur du soleil serait donc :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2603 \\ 1490.62 \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 709.8 \\ 2755.1 \\ 604.8 \end{pmatrix}, \text{ respectivement.}$$

L'éclairement moyen concentré est évalué à 1638 W/m² pour le mois de Septembre et à 1690 W/m² pour le mois de Mai, la température de l'absorbeur est estimée à 122.86 °C pour le mois de Septembre à midi et à 119.96 °C pour le mois de Mai à 11 h.

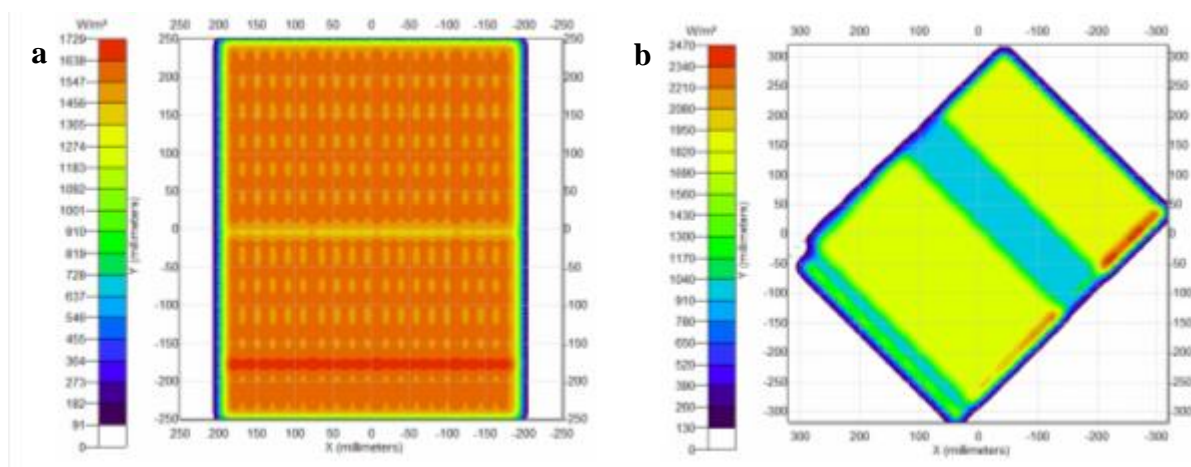


Fig 4.5: Résultats de la simulation de l'éclairement concentré incident sur l'absorbeur du cuiseur boîte à surface d'ouverture inclinée avec réflecteur additionnel sur le site de Ghardaïa: (a) au mois de Septembre 2013 à midi; (b) au mois de Mai 2013 à 11 h.

La figure (4.6) représente les résultats expérimentaux relatifs à l'évolution des températures de l'absorbeur du cuiseur boîte réalisé, obtenus des tests du 22 Septembre (N°=265) et du 29 Mai (N°=149) sur le site de Ghardaïa. Le cuiseur est chargé avec une quantité d'eau de 2 litre et fréquemment réorienté vers le soleil (un ajustement chaque 1 heure de temps), l'angle α du réflecteur additionnel est nul pour le mois de Septembre et de l'ordre de -5° pour le mois de Mai à Ghardaïa. Les données expérimentales de la température ambiante et de l'éclairement solaire global incident sur un plan horizontal sont fournies par la station radiométrique de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, de Ghardaïa. Un maximum de rayonnement global est de 899.42 W/m² est obtenu à midi (22 septembre) et de 980.96 W/m² à 11 h (29 Mai). Sur le graphique de la figure (4.6), on enregistre une température de l'absorbeur atteinte de 125 °C à midi (Septembre) et une température de

117 °C à 11h (Mai), soit une erreur de ± 2 °C pour les deux cas de tests, qui est une erreur très acceptable dans ce type de mesures.

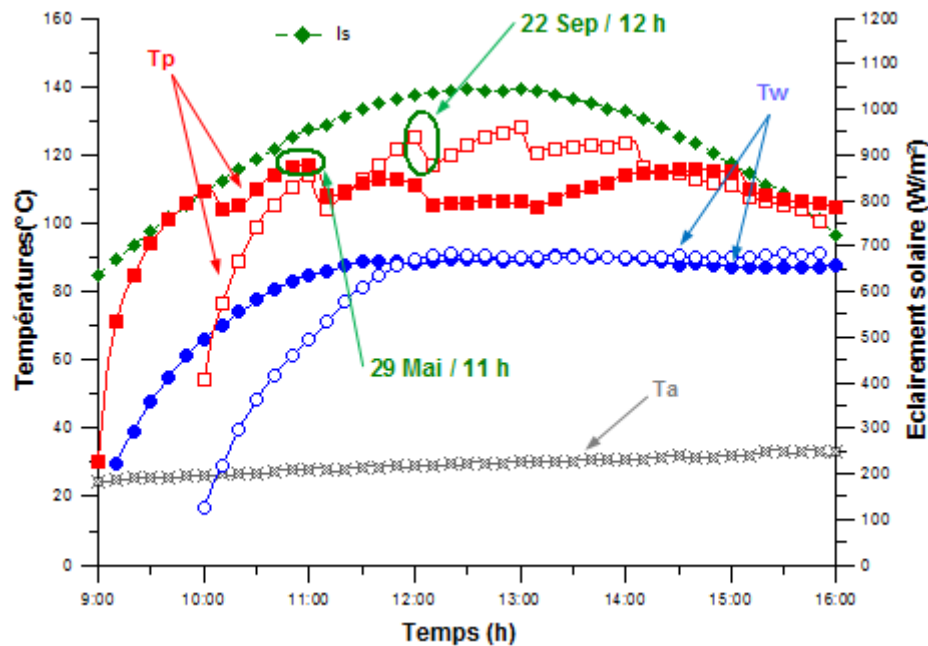


Fig 4.6: Résultats pratiques de l'évolution des températures de l'absorbeur du cuiseur boîte réalisé, mesurées sur le site de Ghardaïa pour les tests du 22 Septembre et 29 Mai 2013.

4.2.2. Mapping des cartes des températures du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée suivant la première approche

La représentation graphique de surface est un processus par lequel une surface continue est interpolée à partir d'un jeu de données (x, y, z) distribuées aléatoirement. Le résultat de cette interpolation fournit des données structurées sous forme de grille, l'utilisation de cette grille est indispensable pour pouvoir tracer des iso-contours des données à représenter. La précision de la grille obtenue et par conséquent de la surface interpolée dépend essentiellement du nombre et de la répartition des données initiales. Pour notre cas la zone d'étude se situe dans une surface définie entre $18^{\circ}\text{N} < X < 38^{\circ}\text{N}$ et $-9^{\circ}\text{E} < Y < 12^{\circ}\text{E}$ avec un nombre optimal de 62 points à interpoler. Le logiciel Surfer propose un interpolateur avec une procédure XYZ qui permet de transformer les résultats matriciels de la grille sous le format cartographié. Sur la figure (4.7), on donne un exemple de tracé des résultats obtenus pour les températures de l'absorbeur pour chaque (Latitude, Longitude) compris entre l'intervalle XY.

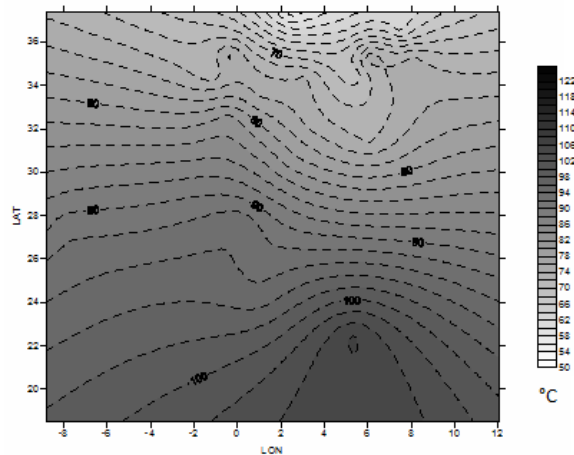


Fig 4.7: Exemple de tracé brute des températures de l'absorbeur d'un cuiseur boîte obtenu par ciel clair pour le jour type du mois de Décembre.

4.2.2.1. Mapping des cartes de l'éclairement et de l'éclairement solaire concentré (approche optique)

Afin de générer diverses cartes (éclairement, éclairement concentré, températures), nous avons appliqué l'approche détaillée précédemment, à savoir; modélisation mathématique, simulation optique, conversion des données, sur l'ensemble du territoire Algérien. Pour cela, et afin de couvrir la majeure totalité de la superficie du pays; nous avons opté pour 48 sites avec différentes coordonnées géographiques (Lat, Lon, Alt) originales du Service Google Earth.

Sur la figure (4.8a) et figure (4.8b), on donne un exemple de tracé des résultats obtenus concernant l'éclairement direct incident sur la surface réceptrice du cuiseur boîte pour un jour type du mois de Décembre et Juin, respectivement. La figure (4.9a) et figure (4.9b) représentent les cartographies de l'éclairement global incident sur le cuiseur. On donne également sur la figure (4.10a) et figure (4.10b) les cartes de l'éclairement concentré sur la plaque absorbante du cuiseur boîte sans et avec réflecteur pour un jour type du mois de Décembre, respectivement. La figure (4.11a) et figure (4.11b) représentent les cartes du cuiseur pour un jour type du mois de Juin.

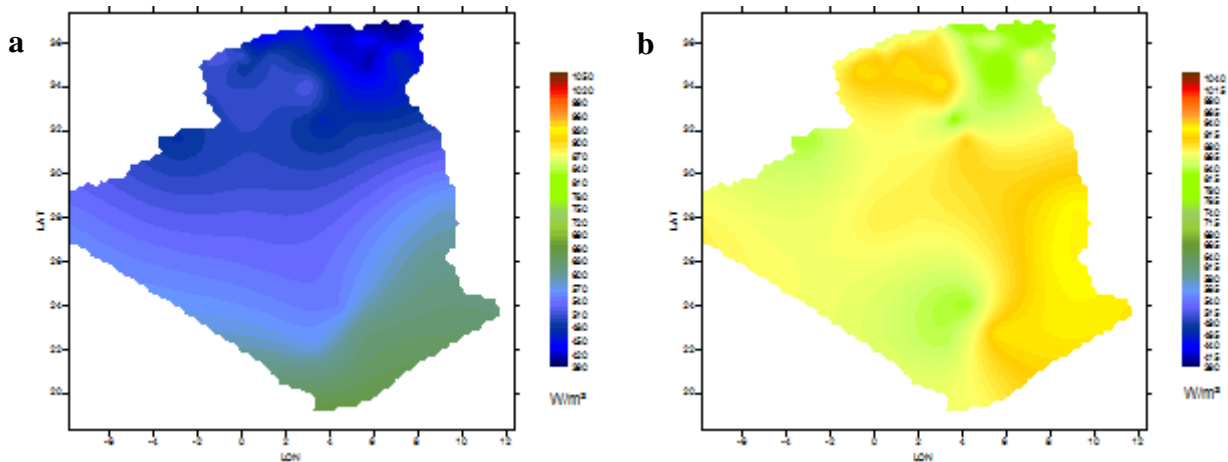


Fig 4.8: Tracé des cartes de l'éclairement solaire direct maximal, incident sur le plan récepteur du cuiseur boîte, obtenu par ciel clair pour un jour: **(a)** de la saison hivernale; **(b)** de la saison estivale.

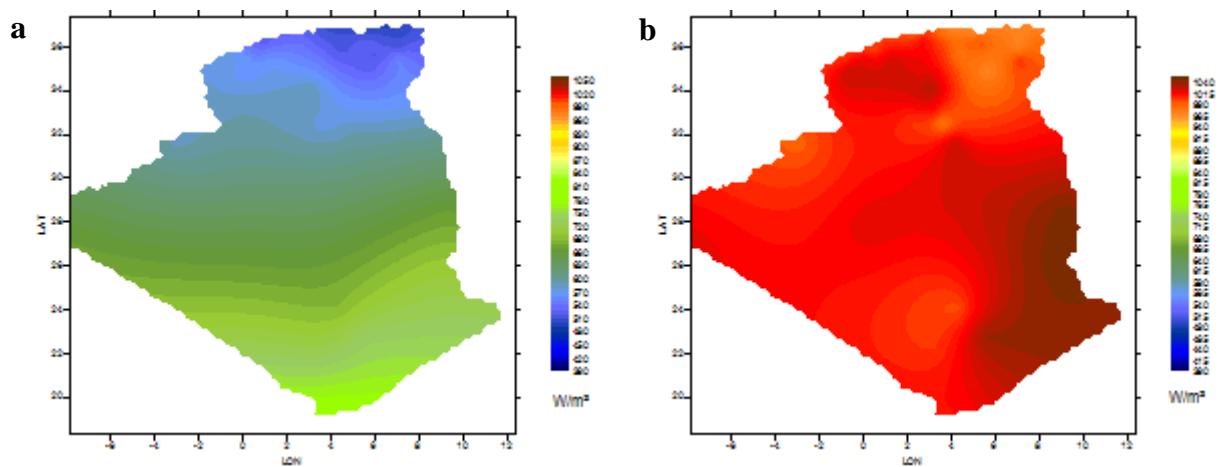


Fig 4.9: Tracé des cartes de l'éclairement solaire global maximal, incident sur le plan récepteur du cuiseur boîte, obtenu par ciel clair pour un jour type: **(a)** du mois de Décembre; **(b)** du mois de Juin.

Sur les cartes illustrant la variation de l'éclairement concentré, on peut très bien constater la quantité très importante de l'éclairement solaire concentré reçue sur la surface de l'absorbeur du cuiseur durant la période estivale par rapport à la période hivernale notamment au Sud du pays, l'effet de l'ajout du réflecteur sur la quantité du rayonnement concentré collectée est nettement visible sur ces cartes. La quantité de l'éclairement concentrée moyenne estimée au niveau de l'absorbeur sans réflecteur est de l'ordre de 1120.5 W/m^2 pour un jour type du mois de Juin à midi (Fig 4.11a) par rapport à 566 W/m^2 pour un jour type du mois de Décembre à midi (Fig 4.10a).

Ces quantités se trouvent nettement augmentées en ajoutant le réflecteur avec 1408.2 W/m^2 en moyenne en été (Fig 4.11b) et 942 W/m^2 en hiver (Fig 4.10b), ceci est principalement due à la quantité importante de l'éclairement solaire global reçue sur l'ensemble du territoire Algérien durant l'année. La valeur moyenne du rayonnement global au mois de Juin à midi est estimée à 999.9 W/m^2 (Fig 4.9b) dont un maximum, de l'ordre de 1046.89 W/m^2 ; est enregistrée à 'Tindouf', une valeur moyenne au

mois de Décembre est estimée à 552.8 W/m^2 (Fig 4.9a) avec un minimum de 496.7 W/m^2 à 'Skikda'. Dans le cas d'ajout du réflecteur, l'éclairement direct est aussi pris en considération (utilisation de l'équation 3.36) avec une moyenne de 859.2 W/m^2 en été (Fig 4.8b) et 463.5 W/m^2 en hiver (Fig 4.8a).

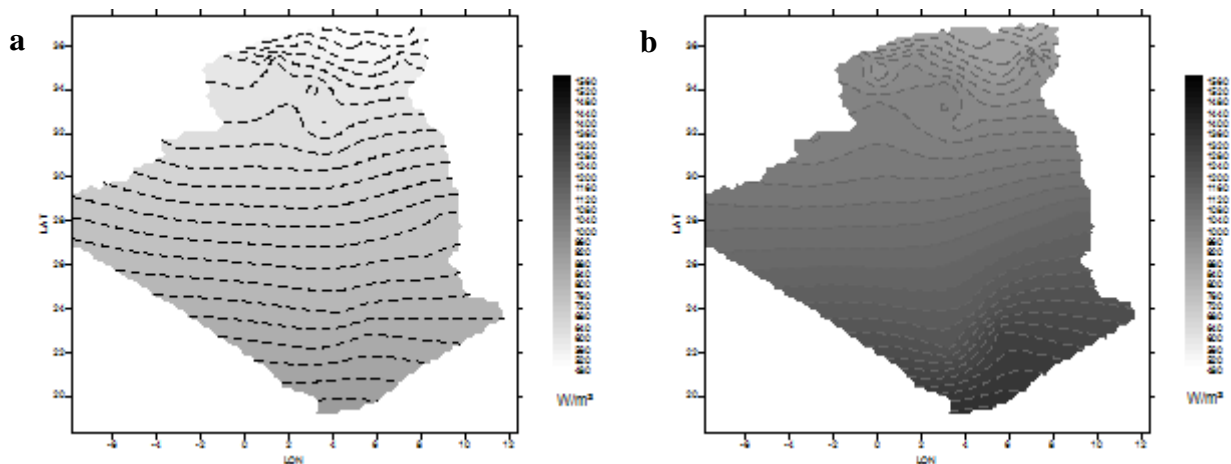


Fig 4.10: Cartographie l'éclairement solaire concentré sur l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée, obtenue par ciel clair pour un jour type du mois de Décembre: (a) sans réflecteur additionnel; (b) avec réflecteur additionnel, pour divers sites de l'Algérie.

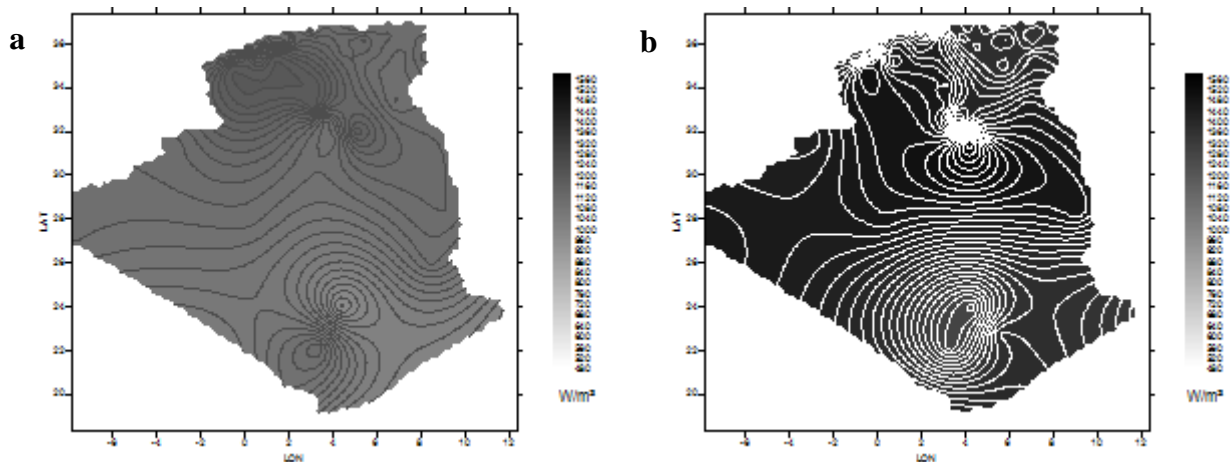


Fig 4.11: Cartographie l'éclairement solaire concentré sur l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée, obtenue par ciel clair pour un jour type du mois de Juin: (a) sans réflecteur additionnel; (b) avec réflecteur additionnel, pour divers sites de l'Algérie.

4.2.2.2. Mapping des cartes des températures du cuiseur sans et avec ajout du réflecteur (approche optique)

Après application de la loi de Stefan-Boltzmann d'un corps noir sur les données simulées, la projection des résultats obtenus est réalisée sous forme de tracé de cartes de températures atteintes par l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée pour chaque (Lat, Lon) comprise entre l'intervalle (X,Y). La figure (4.12a) et figure (4.12b) représente la cartographie des températures

atteintes par la plaque absorbante du cuiseur boîte sans l'ajout du réflecteur additionnel obtenue par ciel clair pour un jour type de la saison hivernale et estivale, respectivement. On donne également la représentation des températures de l'absorbeur dans le cas d'ajout d'un réflecteur plan sur la figure (4.13a) et figure (4.13b). Un exemple de températures obtenues pour le mois de Mars (sans réflecteur) et Octobre (avec réflecteur) est illustré sur la figure (4.14a) et figure (4.14b), respectivement [184]).

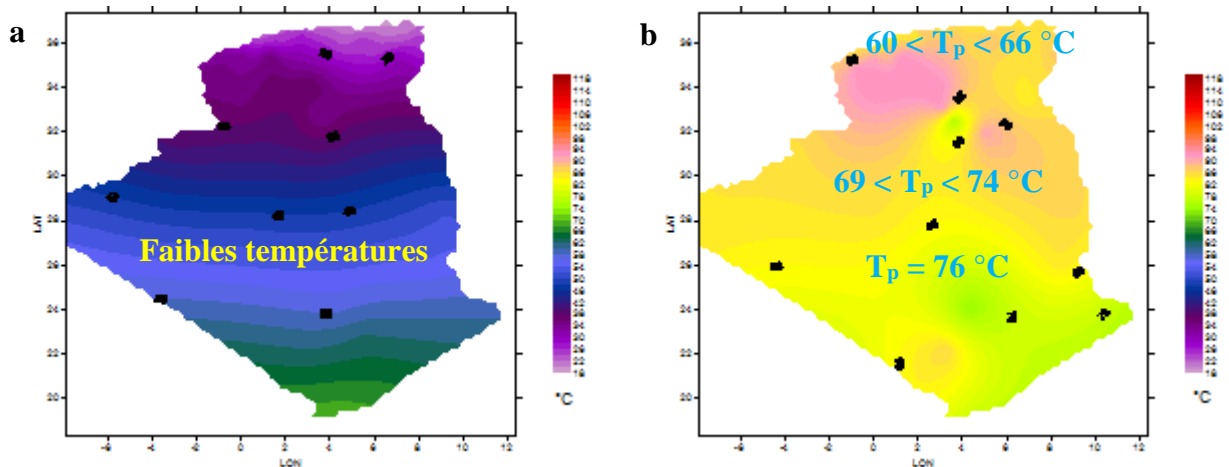


Fig 4.12: Cartographie des températures de l'absorbeur du cuiseur boîte réalisé, sans l'ajout de réflecteur additionnel, obtenue par ciel clair pour un jour type: (a) de la saison hivernale; (b) de la saison estivale.

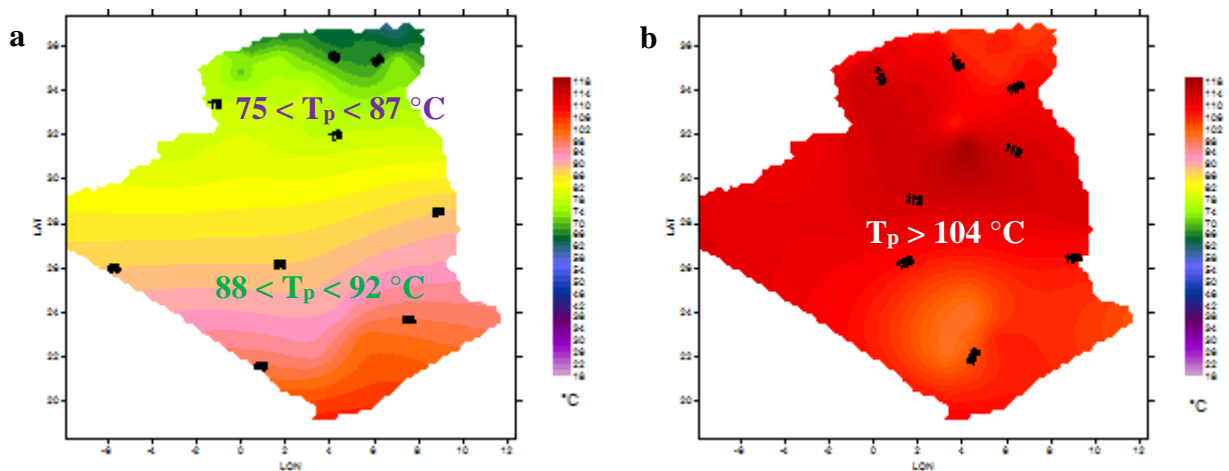


Fig 4.13: Cartographie des températures de l'absorbeur du cuiseur boîte réalisé, avec l'ajout de réflecteur additionnel, obtenue par ciel clair pour un jour type: (a) de la saison hivernale; (b) de la saison estivale.

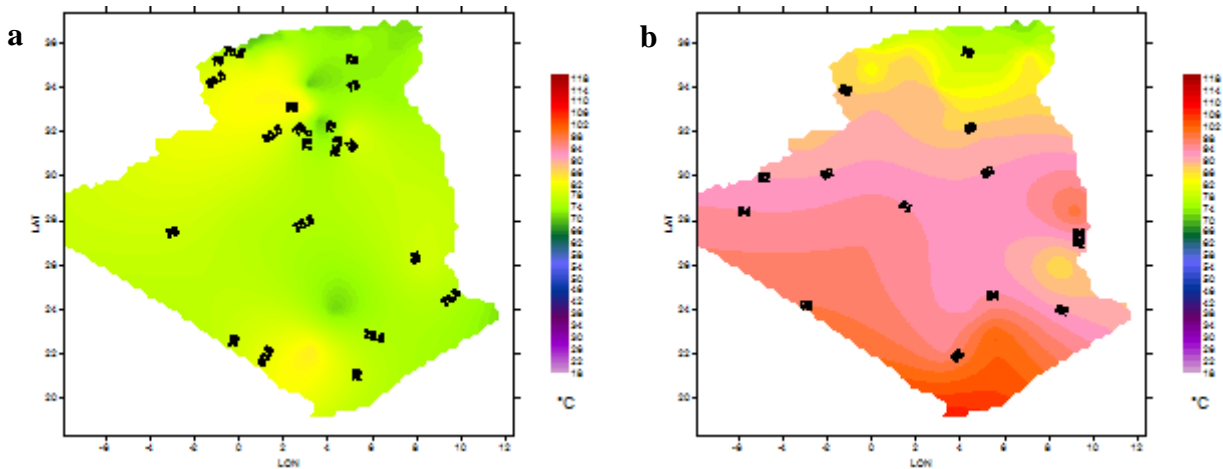


Fig 4.14: Cartographie des températures de l'absorbeur du cuiseur boîte, obtenue par ciel clair pour un jour type: **(a)** du mois de Mars sans réflecteur; **(b)** du mois d'Octobre avec réflecteur.

D'après les résultats de la cartographie des températures atteintes par l'absorbeur du cuiseur boîte, on remarque clairement que l'ajout du réflecteur conduirait à des températures de fonctionnement plus élevées et de ce fait des performances meilleures du cuiseur. D'après la distribution des iso-températures des cartes obtenues, on constate clairement que le cuiseur solaire muni du réflecteur peut être exploité durant toute la saison estivale (Fig 4.13b) sur l'ensemble du territoire Algérien avec des températures dépassant les 104 °C, le rayonnement concentré accède au 1360 W/m² dans la plus part des sites comme le montre la figure (4.11b). Pour la saison hivernale, la durée d'utilisation du cuiseur se trouve réduite en se dirigeant du Sud vers le Nord (Fig 4.13a), dépendant de la quantité de rayonnement solaire reçue, les températures enregistrées sont comprises entre 60.2 °C et 65.8 °C pour les sites ayant une latitude supérieure à 36 °N, et entre 68.5 °C et 73.6 °C pour des sites de latitude comprise entre 34 et 36 °N, les températures estimées sont supérieure à 76 °C au Sud du pays.

Le cuiseur sans réflecteur devient inefficace sur une grande partie du pays durant la saison hivernale due aux faibles températures délivrées (Fig 4.12a), le rayonnement concentrée ne dépassant pas dans les meilleurs cas les 841 W/m² (Fig 4.10a). Néanmoins, le cuiseur sans réflecteur reste exploitable sur la majeure superficie du pays durant la saison estivale, les températures estimées sont comprises entre 75.5 °C et 87.8 °C dans le Nord et entre 88.1 °C et 92.3 °C au Sud (Fig 4.12b). L'utilisation, en printemps et en automne; du cuiseur sans ou avec réflecteur varie d'un site à l'autre (Fig 4.14a) et (Fig 4.14b), généralement on remarque que l'exploitation du cuiseur est bénéfique à partir du mois de Mars jusqu'au mois d'Octobre avec des températures approchant les 90 °C après une durée d'exposition du cuiseur au soleil d'au moins une heure.

4.2.2.3. Mapping de la carte de l'efficacité du cuiseur solaire réalisé suivant l'approche optique

La cartographie des températures atteintes par l'absorbeur du cuiseur nous permet de proposer la classification en quatre zones du réseau étudié (Fig 4.15) [184] :

- La zone **I** : cette zone, qui représente le centre du Sahara et le grand Sud, recevant un rayonnement global annuel très élevé qui dépasse les 2500 kWh/m²/an, soit 7 kWh/m²/jour, répartie presque uniformément durant l'année, est caractérisée par des températures élevées, ce qui rend l'utilisation du cuiseur rentable durant tous les mois de l'année pour tout site ayant une latitude inférieur à 32 °N. Des valeurs de températures plus élevées que celles obtenues au centre du Sahara sont observées sur les régions délimitant le Hoggar et le Tassili.

- La zone **II** : constitue le nord du Sahara, elle est caractérisée par un rayonnement global annuel très élevé, ce qui rend le cuiseur efficace durant la période allant de Février à Octobre.

- La zone **III** : contient l'ensemble des hauts plateaux, elle est caractérisée par des valeurs de températures faibles mais un peu moins élevée que celle du littoral. Le cuiseur est efficace uniquement du mois de Mars à Septembre.

- La zone **IV** : s'étend sur les régions côtières de l'est, ouest et du centre, elle est caractérisée par un rayonnement global annuel de l'ordre de 2000 kWh/m²/an, soit 5 kWh/m²/jour. La distribution des températures est presque homogène dans la région nord avec une décroissance plus accentuée dans les régions côtières. Le cuiseur est inefficace notamment durant la période d'hiver, il est exploitable uniquement du mois d'Avril à Septembre.

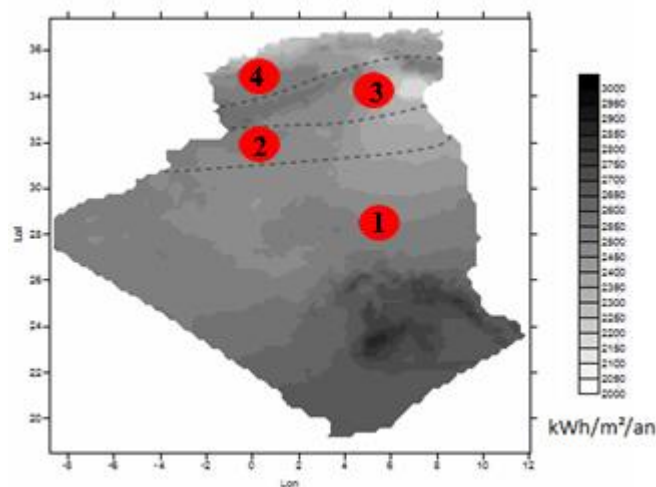


Fig 4.15: Cartographie de l'efficacité du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée répartis sur quatre zones de l'Algérie suivant l'approche optique.

4.3. DEUXIEME APPROCHE (APPROCHE THERMIQUE) POUR LA CARTOGRAPHIE DES TEMPERATURES DU CUISEUR SOLAIRE BOITE A SURFACE RECEPTRICE INCLINEE SANS ET AVEC REFLECTEUR EN ALGERIE

4.3.1. Modèle mathématique thermique du cuiseur solaire boîte proposé

Dans cette partie, nous nous proposons de cartographier les températures atteintes par l'absorbeur du cuiseur boîte sans et avec réflecteur par une approche thermique, cette dernière a l'avantage d'avoir une plus large applicabilité; en terme de températures obtenues, à différents états du système et à n'importe quel stade du processus de cuisson, elle sera donc plus pratique et permettra un gain de temps important. L'approche adoptée est basée sur la modélisation des bilans thermiques du cuiseur à travers les divers modes de transfert de chaleur. Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature par des chercheurs et scientifiques à travers le monde, régissant les échanges thermiques dans un cuiseur solaire boîte horizontal [146, 185-189]. Pour notre cas, nous nous proposons d'établir un modèle propre à notre cuiseur à surface réceptrice inclinée réalisé. Les différents modes de transfert de chaleur dans un cuiseur boîte sont illustrés sur la figure (4.16) et sont les suivants:

- Echange de chaleur entre l'absorbeur et l'air intérieur ($Q_{c,ab \rightarrow a}$): la plaque absorbante reçoit l'énergie du soleil, elle s'échauffe et chauffe la couche d'air la plus proche, ce qui provoque le transfert de chaleur par convection naturelle.
- Echange de chaleur entre l'absorbeur et la vitre ($Q_{r,ab \rightarrow gl}$): chaque corps dans la nature cède de la chaleur sous forme de rayonnement après absorption d'un maximum d'énergie. La plaque échange une quantité d'énergie absorbée vers la vitre qui représente une source froide.
- Echange de chaleur entre l'air intérieur et la vitre ($Q_{c,a \rightarrow gl}$): l'air chaud qui monte du bas du cuiseur rencontre la vitre (corps à température inférieure) et cède de la chaleur par convection.
- Echange de chaleur entre la vitre et l'ambient ($Q_{c,g \rightarrow am} / Q_{r,g \rightarrow sky}$): la température de la vitre augmente à cause des quantités d'énergie reçues par convection et par rayonnement, et perd la chaleur par convection due au vent, et par rayonnement avec le ciel.
- Echange de chaleur entre l'absorbeur et le bas du cuiseur (Q_{ab-am}): comme il n'y a pas pratiquement des corps isolants à 100 %, le transfert de chaleur par conduction entre la plaque absorbante et la structure en bois à travers l'isolation est pris en considération.

Les hypothèses suivantes sont considérées pour simplifier le modèle :

- Les transferts de chaleur sont unidirectionnels;

- Les miroirs latéraux sont supposés adiabatiques;
- La vitesse du vent est constante;
- La température est uniforme dans chaque composant du cuiseur;
- Les propriétés thermo-physiques de la plaque, de l'air, et de la vitre sont considérées constantes dans la marge des températures du fonctionnement du cuiseur.

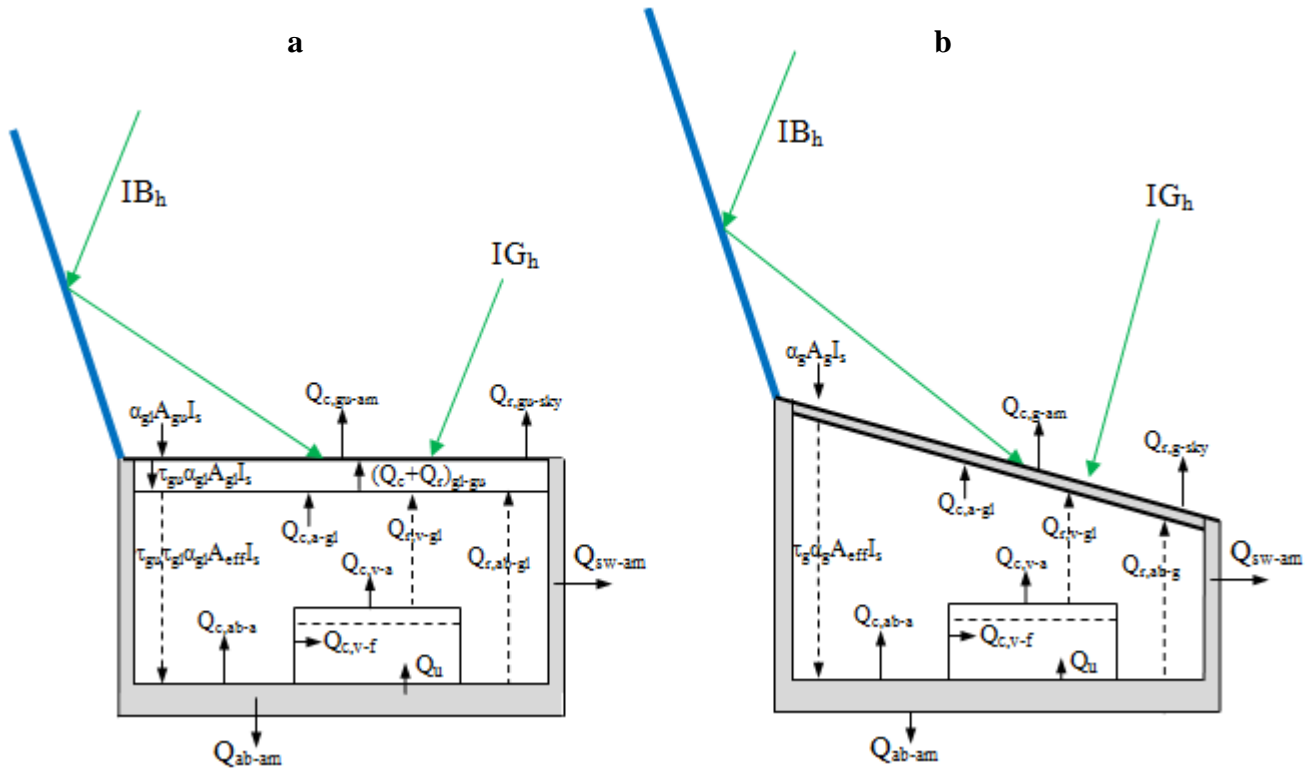


Fig 4.16: Divers modes de transfert de chaleur dans un cuiseur solaire: (a) cuiseur boîte ordinaire; (b) cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée.

Si on considère le schéma de la figure (4.16a), on pourra dresser un bilan de la manière suivante :

- Bilan énergétique de la vitre supérieure:

$$(mc_p)_{gu} \frac{dT_{gu}}{dt} = \alpha_{gu} A_{gu} I_s + (Q_c + Q_r)_{gl \rightarrow gu} - Q_{c,gu \rightarrow o} - Q_{r,gu \rightarrow sky} \quad (4.2)$$

$$\text{Avec : } Q_{c,gl \rightarrow gu} = h_{c,gl-gu} A_{gu} (T_{gl} - T_{gu})$$

$$Q_{r,gl \rightarrow gu} = h_{r,gl-gu} A_{gu} (T_{gl} - T_{gu})$$

$$Q_{c,gu \rightarrow o} = h_{c,gu-am} A_{gu} (T_{gu} - T_o)$$

$$Q_{r,gu \rightarrow sky} = h_{r,gu-sky} A_{gu} (T_{gu} - T_{sky}) \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} (mc_p)_{gu} \frac{dT_{gu}}{dt} = & \alpha_{gu} A_{gu} I_s + (h_{r,gl-gu} + h_{c,gl-gu}) A_{gu} (T_{gl} - T_{gu}) - h_{c,gu-am} A_{gu} (T_{gu} - T_o) \\ & - h_{r,gu-sky} A_{gu} (T_{gu} - T_{sky}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

- Bilan énergétique de la vitre inférieure:

$$(mc_p)_{gl} \frac{dT_{gl}}{dt} = \tau_{gu} \alpha_{gl} A_{gl} I_s + Q_{c,a \rightarrow gl} + Q_{r,v \rightarrow gl} + Q_{r,ab \rightarrow gl} - (Q_c + Q_r)_{gl \rightarrow gu} \quad (4.5)$$

$$\text{Avec : } Q_{c,a \rightarrow gl} = h_{c,a-gl} A_{gl} (T_a - T_{gl})$$

$$Q_{r,v \rightarrow gl} = h_{r,v-gl} n A_{vb} (T_v - T_{gl})$$

$$Q_{r,ab \rightarrow gl} = h_{r,ab-gl} (A_{gl} - n A_{vb}) (T_{ab} - T_{gl}) \quad (4.6)$$

$$Q_{c,gl \rightarrow gu} = h_{c,gl-gu} A_{gl} (T_{gl} - T_{gu})$$

$$Q_{r,gl \rightarrow gu} = h_{r,gl-gu} A_{gl} (T_{gl} - T_{gu})$$

$$\begin{aligned} (mc_p)_{gl} \frac{dT_{gl}}{dt} = & \tau_{gu} \alpha_{gl} A_{gl} I_s + h_{c,a-gl} A_{gl} (T_a - T_{gl}) + h_{r,vc-gl} n A_{vb} (T_v - T_{gl}) \\ & + h_{r,ab-gl} (A_{gl} - n A_{vb}) (T_{ab} - T_{gl}) - (h_{r,gl-gu} + h_{c,gl-gu}) A_{gl} (T_{gl} - T_{gu}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

- Bilan énergétique de l'air intérieur du cuiseur:

$$(mc_p)_a \frac{dT_a}{dt} = Q_{c,ab \rightarrow a} + Q_{c,v \rightarrow a} - Q_{c,a \rightarrow gl} \quad (4.8)$$

$$\text{Avec : } Q_{c,ab \rightarrow a} = h_{c,ab-a} (A_{ab} - n A_{vb}) (T_{ab} - T_a)$$

$$Q_{c,v \rightarrow a} = h_{c,v-a} n A_v (T_v - T_a) \quad (4.9)$$

$$Q_{c,a \rightarrow gl} = h_{c,a-gl} A_{gl} (T_a - T_{gl})$$

$$(mc_p)_a \frac{dT_a}{dt} = h_{c,ab-a} (A_{ab} - n A_{vb}) (T_{ab} - T_a) + h_{c,vc-a} n A_v (T_v - T_a) - h_{c,a-gl} A_{gl} (T_a - T_{gl}) \quad (4.10)$$

- Bilan énergétique de l'absorbeur:

$$(mc_p)_{ab} \frac{dT_{ab}}{dt} = \tau_{gu} \tau_{gl} \alpha_{ab} A_{eff} I_s - Q_{r,ab \rightarrow gl} - Q_{c,ab \rightarrow a} - Q_{ab \rightarrow o} - Q_{sw \rightarrow o} - Q_u \quad (4.11)$$

$$\text{Avec : } Q_{r,ab \rightarrow gl} = h_{r,ab-gl} (A_{ab} - n A_{vb}) (T_{ab} - T_{gl})$$

$$Q_{c,ab \rightarrow a} = h_{c,ab-a} (A_{ab} - n A_{vb}) (T_{ab} - T_a) \quad (4.12)$$

$$Q_{ab \rightarrow o} = U_{ab} A_{ab} (T_{ab} - T_o)$$

$$Q_{sw \rightarrow o} = U_{sw} A_{ab} (T_{ab} - T_o)$$

$$Q_u = U_{vb} n A_{vb} (T_{ab} - T_v)$$

$$\begin{aligned} (mc_p)_{ab} \frac{dT_{ab}}{dt} = & \tau_{gu} \tau_{gl} \alpha_{ab} A_{eff} I_s - h_{r,ab-gl} (A_{ab} - n A_{vb}) (T_{ab} - T_{gl}) - h_{c,ab-a} (A_{ab} - n A_{vb}) (T_{ab} - T_a) \\ & - U_{ab} A_{ab} (T_{ab} - T_o) - U_{sw} A_{ab} (T_{ab} - T_o) - U_{vb} n A_{vb} (T_{ab} - T_v) \end{aligned} \quad (4.13)$$

- Bilan énergétique du fluide dans l'ustensile:

$$(mc_p)_f \frac{dT_f}{dt} = Q_{c,v \rightarrow f} = h_{c,v \rightarrow f} n A_{vf} (T_v - T_f) \quad (4.14)$$

- Bilan énergétique de l'ustensile:

$$(mc_p)_v \frac{dT_v}{dt} = \tau_{gu} \tau_{gl} \alpha_v n A_{vb} I_s + Q_u - Q_{c,v \rightarrow f} - Q_{r,v \rightarrow gl} - Q_{c,v \rightarrow a} \quad (4.15)$$

$$\text{Avec : } Q_u = U_{vb} n A_{vb} (T_{ab} - T_v)$$

$$Q_{c,v \rightarrow f} = h_{c,v \rightarrow f} n A_{vb} (T_v - T_f)$$

$$Q_{r,v \rightarrow gl} = h_{r,v \rightarrow gl} n A_{vb} (T_v - T_{gl}) \quad (4.16)$$

$$Q_{c,v \rightarrow a} = h_{c,v \rightarrow a} n A_v (T_v - T_a)$$

$$\begin{aligned} (mc_p)_v \frac{dT_v}{dt} = & \tau_{gu} \tau_{gl} \alpha_v n A_{vb} I_s + U_{vb} n A_{vb} (T_{ab} - T_v) - h_{c,v \rightarrow f} n A_{vb} (T_v - T_f) - h_{r,v \rightarrow gl} n A_{vb} (T_v - T_{gl}) \\ & - h_{c,v \rightarrow a} n A_v (T_v - T_a) \end{aligned} \quad (4.17)$$

Considérons maintenant le schéma de la figure (4.16b), Le bilan énergétique du cuiseur s'écrit de la manière suivante :

- Bilan énergétique de la vitre:

$$(mc_p)_g \frac{dT_g}{dt} = \alpha_g A_g I_s - Q_{c,g \rightarrow o} - Q_{r,g \rightarrow sky} \quad (4.18)$$

- Bilan énergétique de l'air intérieur du cuiseur:

$$(mc_p)_a \frac{dT_a}{dt} = Q_{c,ab \rightarrow a} + Q_{c,v \rightarrow a} - Q_{c,a \rightarrow g} \quad (4.19)$$

- Bilan énergétique de l'absorbeur:

$$(mc_p)_{ab} \frac{dT_{ab}}{dt} = \tau_g \alpha_{ab} A_{eff} I_s - Q_{r,ab \rightarrow g} - Q_{c,ab \rightarrow a} - Q_{ab \rightarrow o} - Q_{sw \rightarrow o} - Q_u \quad (4.20)$$

- Bilan énergétique du fluide dans l'ustensile:

$$(mc_p)_f \frac{dT_f}{dt} = Q_{c,v \rightarrow f} = h_{c,v \rightarrow f} n A_{vf} (T_v - T_f) \quad (4.21)$$

- Bilan énergétique de l'ustensile:

$$(mc_p)_v \frac{dT_v}{dt} = \tau_g \alpha_v n A_{vb} I_s + Q_u - Q_{c,v \rightarrow f} - Q_{r,v \rightarrow g} - Q_{c,v \rightarrow a} \quad (4.22)$$

L'éclairement solaire total I_s incident sur le cuiseur est calculé d'après l'expression (3.36) du chapitre précédent. On obtient donc cinq équations avec cinq variables inconnues, les équations du bilan énergétique obtenues sont non-linéaires. A cet effet, nous avons développé un programme sous Matlab [16], utilisant un processus itératif pour résoudre ces équations et obtenir les valeurs des températures T_p , T_r , T_v , T_g , T_w .

4.3.2. Validation expérimentale des résultats du modèle mathématique sur le site de Ghardaïa

Pour la validation de notre modèle, nous avons réalisé une comparaison des valeurs de la température de l'absorbeur théoriques obtenues du modèle mathématique et les données expérimentales issues de divers tests effectués.

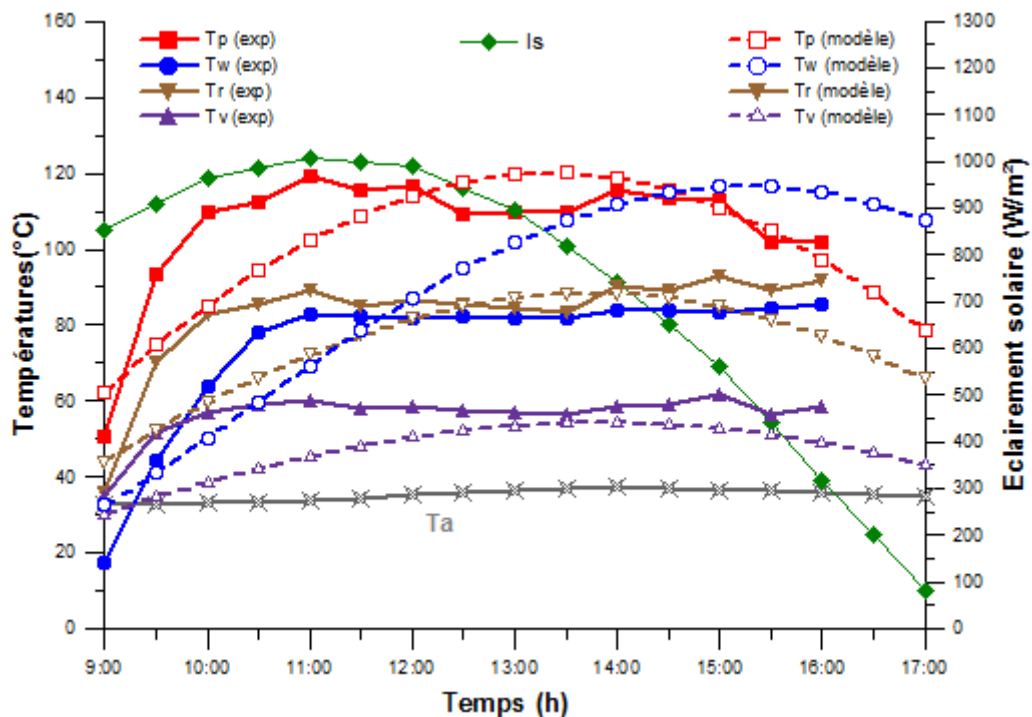


Fig 4.17: Comparaison entre les valeurs théoriques et expérimentales des différents éléments du cuiseur réalisé pour un jour type du mois de Mai 2013.

La figure (4.17) est un exemple de validation de nos résultats pour un jour type du mois de Mai 2013 sur le site de Ghardaïa. La température ambiante varie entre 32.8 et 37.4 °C, alors que l'intensité de l'éclairement solaire varie entre 83 et 1005 W/m². La température de l'absorbeur augmente progressivement avec le temps jusqu'à atteindre la stagnation autour midi, les valeurs expérimentales fluctuent autour des valeurs théoriques et représentent une moyenne de 106.14 °C par rapport aux valeurs calculées (108 °C). La température expérimentale de l'eau dans l'ustensile augmente avec l'éclairement solaire jusqu'à atteindre son maximum 82.5 °C à 11:30 h, alors que la valeur prédite est de 78.4 °C, avec une différence de 4.1 °C par rapport à la valeur expérimentée. Nous pouvons conclure que notre modèle développé est capable de prédire les températures des éléments du cuiseur avec des valeurs très proches des données expérimentales.

4.3.3. Mapping des cartes des températures du cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée suivant la deuxième approche

4.3.3.1. Mapping des cartes de l'irradiation solaire

Sur la figure (4.18a) et figure (4.18b), on donne les tracés des résultats obtenus pour les valeurs mensuelles moyennes du facteur de trouble de Linke pour chaque combinaison (Lat, Lon, Alt) de l'Algérie, utilisées pour calculer et générer les cartes de l'éclairement solaire direct et global incident sur le plan récepteur du cuiseur solaire. La figure (4.19a) et figure (4.19b) représentent les cartographies de l'éclairement global instantané incident sur le cuiseur boîte sans réflecteur pour un jour type du mois de Décembre et de Juin, respectivement. On donne également sur la figure (4.20a) et figure (4.20b) les cartographies de l'éclairement total I_s instantané incident sur le cuiseur boîte avec réflecteur pour un jour type du mois de Décembre et de Juin, respectivement.

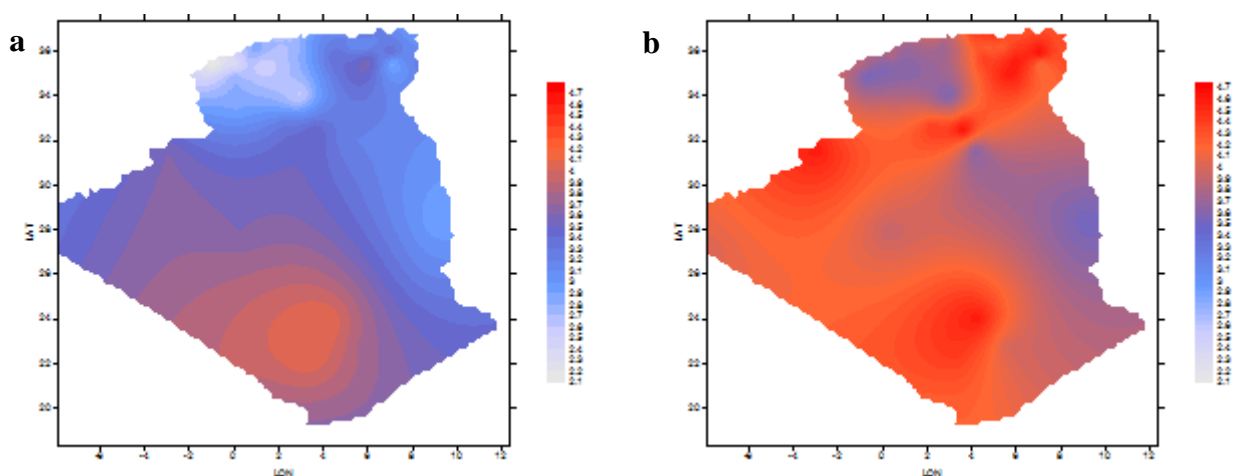


Fig 4.18: Cartes du facteur de trouble de Linke pour ciel clair en Algérie: (a) pour le mois de Décembre; (b) pour le mois de Juin.

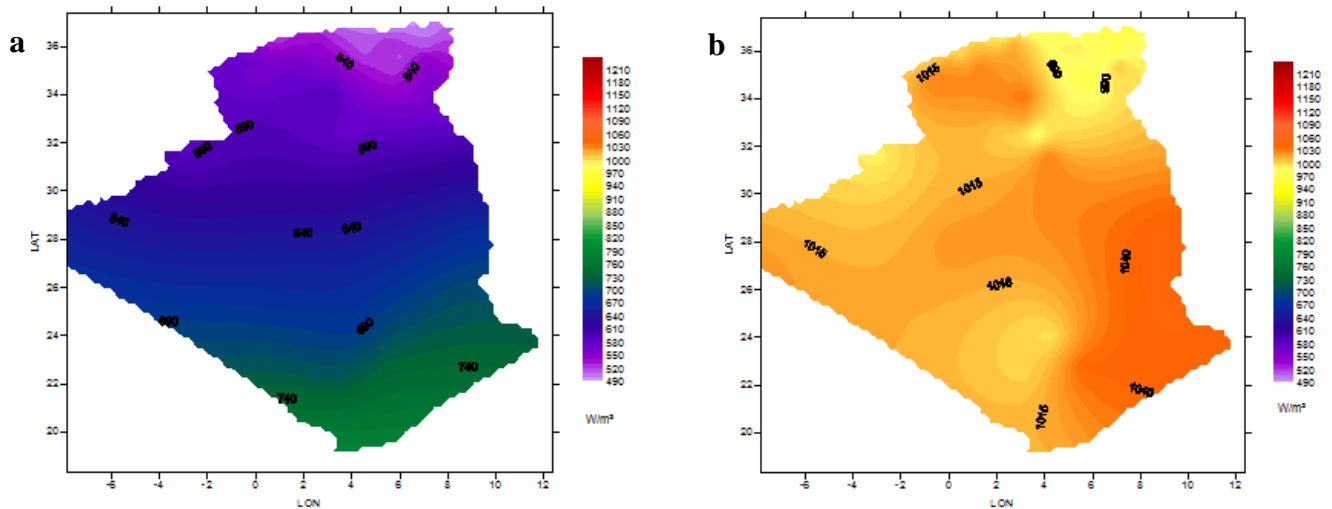


Fig 4.19: Cartes de l'éclairement solaire instantané (à midi) incident sur l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteur additionnel pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.

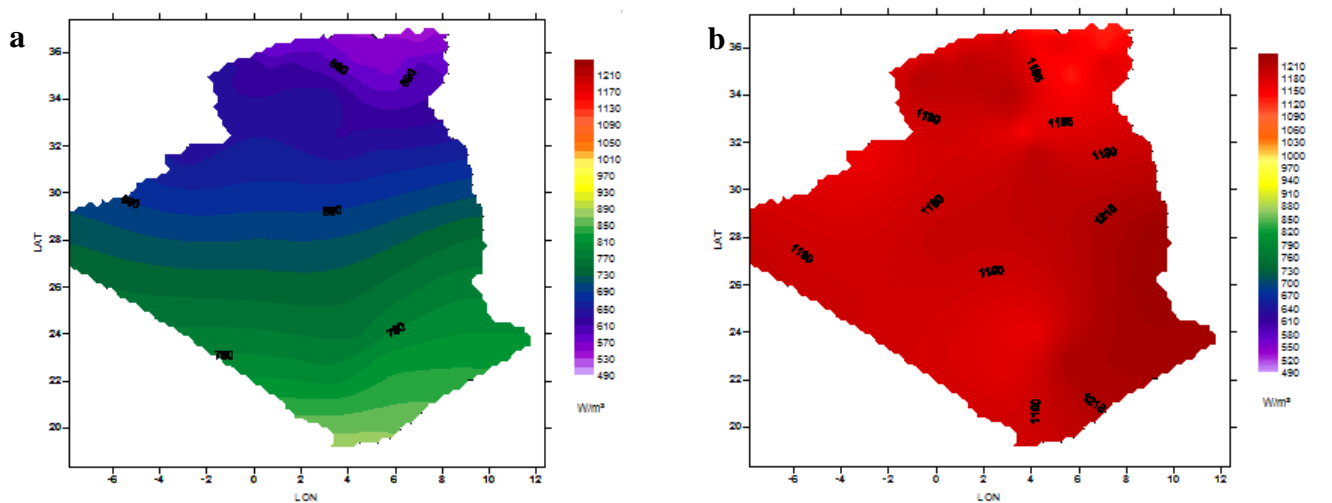


Fig 4.20: Cartes de l'éclairement solaire instantané (à midi) incident sur l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec réflecteur additionnel pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.

4.3.3.2. Mapping des cartes du cuiseur sans réflecteur (approche thermique)

La figure (4.21a) et la figure (4.21b) représentent la cartographie des températures atteintes par la plaque absorbante du cuiseur boîte sans l'ajout du réflecteur additionnel obtenues par ciel clair pour un jour type de la saison hivernale et estivale, respectivement. On donne également la représentation des températures de l'absorbeur sur la figure (4.22a) et figure (4.22b) pour le mois de Mars et le mois de Septembre, respectivement.

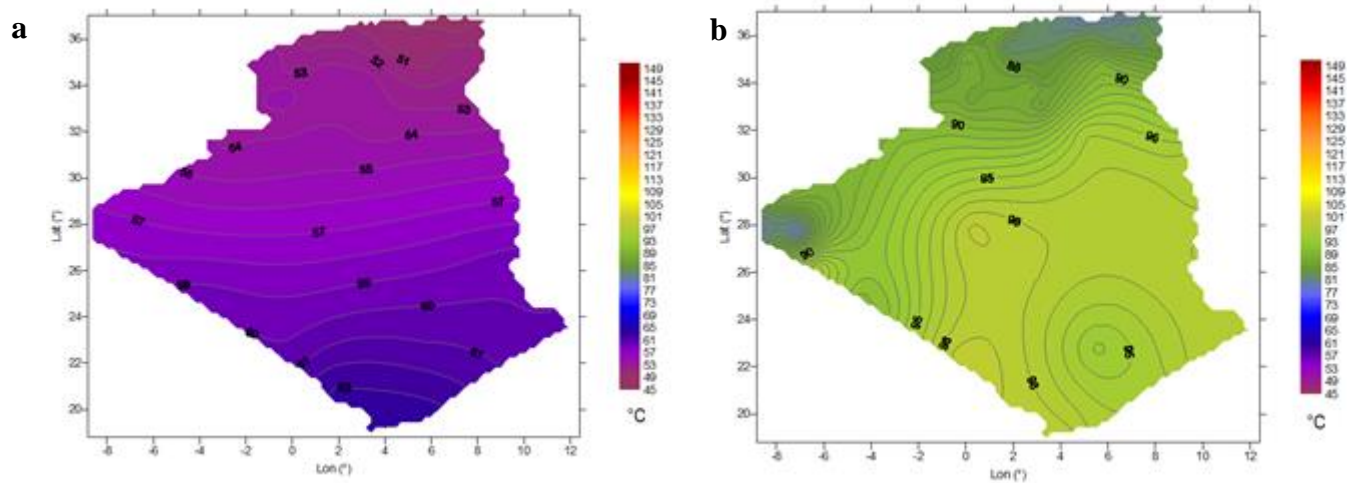


Fig 4.21: Cartes des températures du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteur additionnel pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.

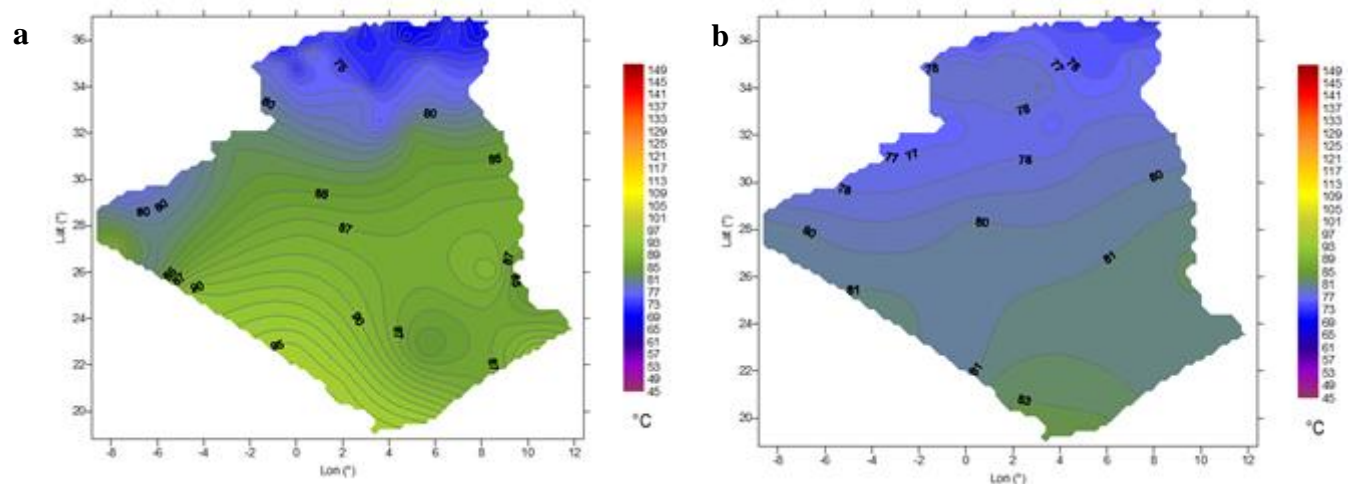


Fig 4.22: Cartes des températures du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteur additionnel pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Mars; (b) au mois de Septembre.

4.3.3.3. Mapping des cartes du cuiseur avec réflecteur (approche thermique)

La figure (4.23a) et la figure (4.23b) représentent la cartographie des températures atteintes par la plaque absorbante du cuiseur boîte avec l'ajout du réflecteur additionnel obtenues par ciel clair pour un jour type du mois de Décembre et de Juin, respectivement. On donne également la représentation des températures de l'absorbeur sur la figure (4.24a) et figure (4.24b) pour la saison printanière et pour la saison automnale, respectivement. D'une manière générale, on pourra dire que les cartes de distributions des iso-températures obtenues (dans les deux cas, sans et avec réflecteur) sont nettement plus visibles en appliquant cette approche (approche thermique), on pourra obtenir les valeurs des températures de l'absorbeur pour n'importe quel site, à différents moment de l'année avec une précision remarquable. Sur le graphique de la figure (4.25), on donne un récapitulatif des températures

atteintes par l'absorbeur du cuiseur boîte avec réflecteur pour certains sites de l'Algérie à quelques mois de l'année.

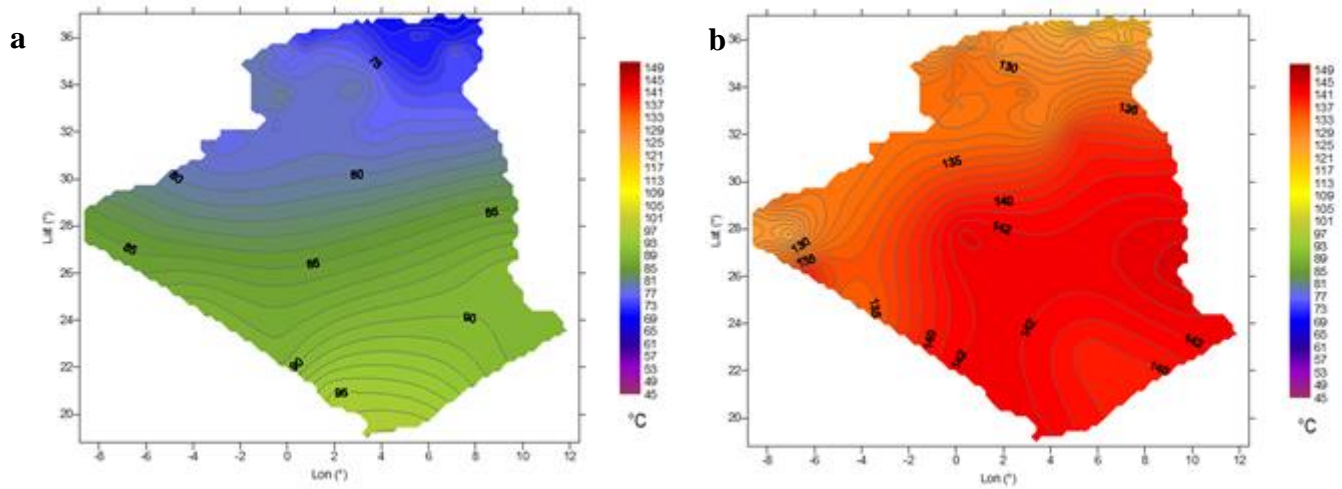


Fig 4.23: Cartes des températures du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec réflecteur additionnel principal pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Décembre; (b) au mois de Juin.

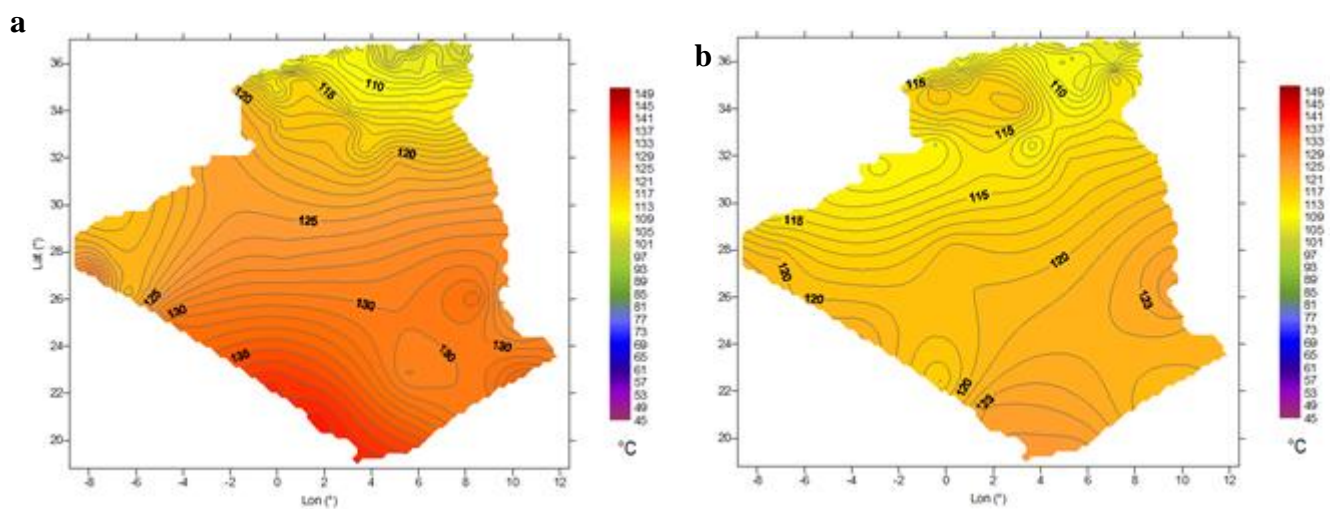


Fig 4.24: Cartes des températures du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec réflecteur additionnel principal pour ciel clair en Algérie: (a) au mois de Mars; (b) au mois de Septembre.

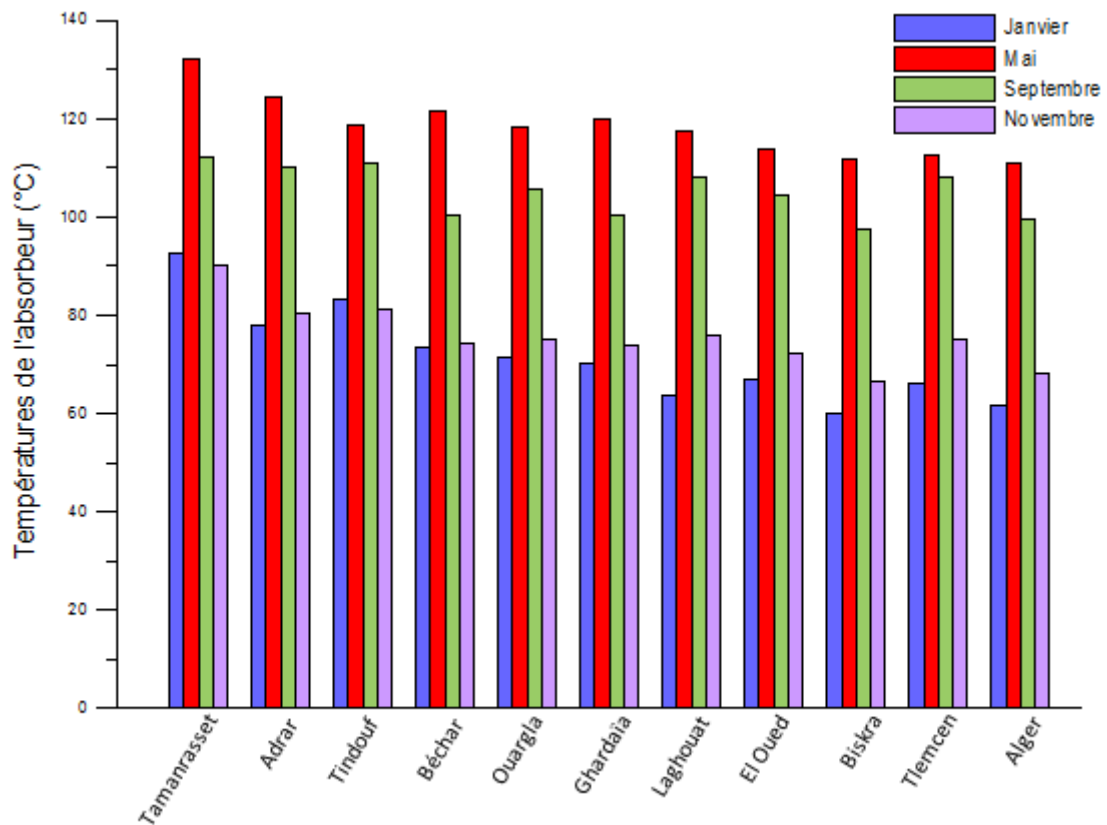


Fig 4.25: Représentation des températures atteintes par l'absorbeur du cuiseur boîte avec réflecteur pour certains sites de l'Algérie à quelques mois de l'année.

4.3.3.4. Mapping des cartes de l'efficacité du cuiseur solaire réalisé suivant l'approche thermique

La figure (4.26) représente la cartographie de l'efficacité du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteur sur l'ensemble du territoire Algérien durant l'année et la figure (4.27) illustre la cartographie de l'efficacité du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec réflecteur additionnel sur l'ensemble du territoire Algérien durant l'année. On remarquera; d'une manière générale, que les cartes d'efficacité obtenues avec cette approche sont plus précises, on pourra donc déterminer avec précision la faisabilité et la rentabilité d'utilisation du cuiseur à surface inclinée à n'importe quel endroit (lieu) et durant la période appropriée (mois) de l'année.

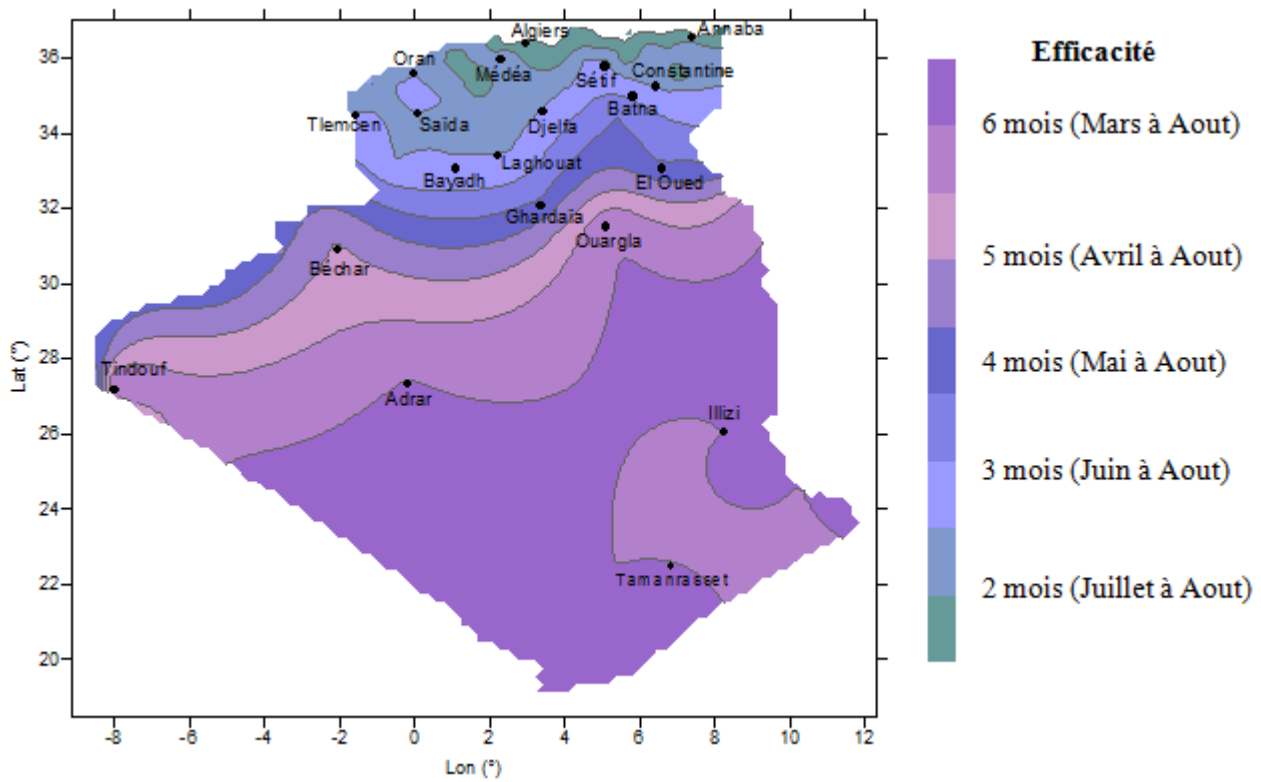


Fig 4.26: Carte de l'efficacité du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée sans réflecteur additionnel sur l'ensemble du territoire Algérien durant l'année.

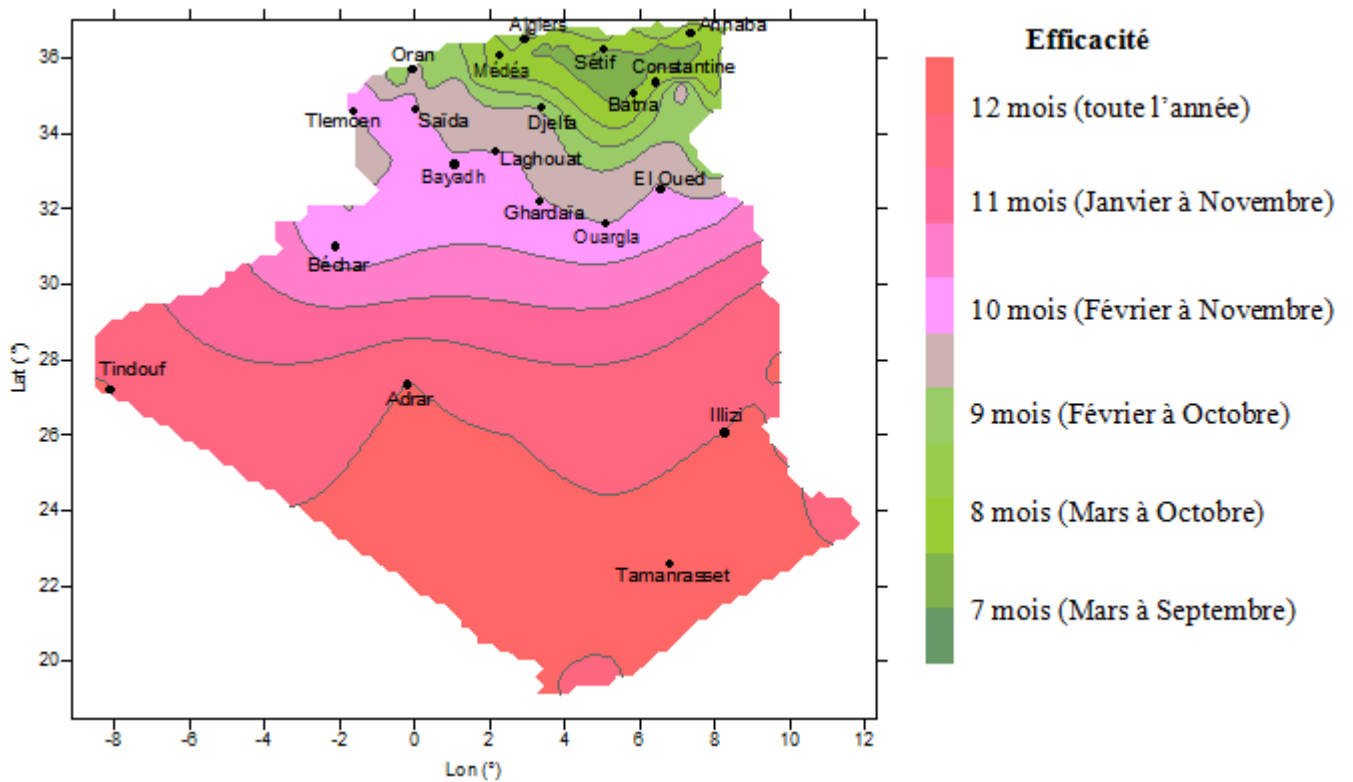


Fig 4.27: Carte de l'efficacité du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée avec un réflecteur additionnel sur l'ensemble du territoire Algérien durant l'année.

On cite par exemple le cas de l'utilisation du cuiseur avec réflecteur sur la ville de Ghardaïa, ce dernier est exploitable sur site durant la période allant du mois de Février au mois de Novembre (10 mois). Le cuiseur est également efficace sans son réflecteur durant 4 mois entre Mai et Aout. Cette information précise ne peut être obtenue suivant la première approche qui prédit; en général, que le cuiseur est efficace du mois de Février à Octobre. La durée d'utilisation du cuiseur se trouve réduite en se dirigeant vers le Nord, on pourra par exemple utiliser notre cuiseur avec son réflecteur pendant 8 mois (de Mars à Octobre) sur la ville de Batna et uniquement pendant 3 mois (de Juin à Aout) si on supprimait le réflecteur. A Alger; par exemple, le cuiseur est efficace durant la saison estivale, du mois de Mars à Septembre (7 mois) avec son réflecteur additionnel et pendant seulement 2 mois (Juillet et Aout) sans réflecteur.

4.4. ETUDE ECONOMIQUE DU CSB_{SRI} REALISE A GHARDAÏA

Finalelement, une évaluation du coût du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée réalisé à Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa est représentée sur le tableau 4.1.

N° d'ordre	Désignations	Prix unitaire	Quantités	PRIX
1	Ustensile de cuisson	940	1	940
2	Scie Sauteuse électrique	1800	1	1800
3	Lames Scie Sauteuse	135	1	135
4	Vise 3x25	1	30	30
5	Printe	10	1	10
6	Plateau en aluminium (tôle)	1000	1	1000
7	Barrette Gaulette 25x40	940	1	250
8	Pâte a collé	195	1	195
9	Roues 75 avec frein	220	2	440
10	Roues 75 sans frein	120	2	240
11	Tête vissage	220	1	220
12	Vise 5x30	2,5	16	40
13	Colle à bois	280	1	280
14	Vise à bois	3	4	12
15	Vise à penkin	3	10	30
16	Paumelle	15	6	90
17	Vise à penkin	3	6	18
18	Poignés métalliques	35	4	140
19	Poignés en bois	18	4	72
20	Support en petit L	15	6	90
21	Baguettes à colle	8	10	80
22	Petites paumelles	18	10	180
23	Vises diverses	1	60	60
24	Scotch double face 48 mm	220	1	220
25	Scotch double face 24 mm	115	1	115
26	Peinture Spray blanche	200	2	400
27	Joint porte sans colle	105	1	105
28	Joint porte avec colle	130	1	130
29	Support pour miroir	320	1	320

30	Vises	1	48	48
31	Scotch	50	1	50
32	Ecartis	18	12	216
33	Miroir boîte latérale (12.5 x 44 x 49 x 57)	300	2	600
34	Miroir boîte avant (12.5 x 40)	350	1	350
35	Miroir boîte arrière (44 x 40)	350	1	350
36	Miroir réflecteur principale (45 x 64)	650	1	650
37	Verre simple vitrage (45 x 64)	650	1	650
38	Miroir réflecteur secondaire (45 x 64)	1000	1	1000
39	Isolant (laine de verre)	1000	1	1000
40	Bois	1000	1	1000

Somme Totale 13556 DA

Tab 4.1: Evaluation économique du cuiseur boîte réalisé à l'URAER, Ghardaïa.

4.5. CONCLUSION

Dans ce dernier chapitre, deux méthodologies dédiées à l'estimation et la cartographie des températures atteintes par l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée ont été appliquées sur les données des irradiations solaires pour plusieurs sites de différentes coordonnées géographiques dans le but de déterminer l'efficacité du cuiseur sur l'ensemble du territoire Algérien. Les cartes sont générées pour le cuiseur sans et avec réflecteur, pour connaître l'effet du réflecteur sur le comportement du cuiseur et établir une éventuelle comparaison en différentes saisons de l'année.

L'analyse des résultats obtenus par la présente étude; par application de la méthode optique, ont permis la distinction de quatre zones du territoire national, en allant du grand Sud aux régions côtières; à forte étendue géographique, permettant l'exploitation du cuiseur réalisé à des durée relativement différente durant l'année, ce qui est en relation directe avec la quantité d'énergie reçue par le cuiseur. Sur la base de la méthode thermique, une plus large applicabilité; en terme de températures des éléments du cuiseur, est obtenue. Nous avons pu déterminer avec précision la faisabilité et la rentabilité d'utilisation du cuiseur à surface inclinée à n'importe quel endroit et durant la période la plus appropriée de l'année.

CONCLUSION GENERALE

L'énergie est considérée comme le facteur le plus important dans le développement économique des nations. La demande mondiale en énergie est prévue d'augmenter rapidement au cours des prochaines années avec l'augmentation de la population humaine, l'urbanisation et la modernisation. Actuellement, l'utilisation des sources d'énergies fossiles dominant encore le secteur résidentiel, considéré comme le secteur principal; du point de vue besoins énergétiques, dans le monde. La demande d'énergie pour la cuisson est comptée comme la plus importante dans le secteur. En Algérie, pour les citoyens qui sont installés dans plusieurs régions isolées du pays, la cuisson des aliments revient très onéreuse, quand on exploite les sources énergétiques conventionnelles et induit des conséquences désastreuses sur l'écosystème en exploitant le bois des quelques arbustes restants dans ces régions. La cuisson solaire constitue une réelle solution pour limiter la déforestation et l'utilisation abusive des énergies fossiles qui contribuent à l'aggravation des problèmes des émissions des GES.

Dans ce contexte et dans le cadre de ce travail, on s'est proposé de faire la conception et la réalisation pratique d'un nouveau design de cuiseur solaire de type boîte avec surface réceptrice inclinée muni de réflecteurs à concentration d'énergie. Cette nouvelle configuration permet d'améliorer les performances du cuiseur et résoudre quelques problèmes liés à la cuisson solaire à savoir; les rendements minimes à cause des faibles températures. Après une étude bibliographique et un état de l'art sur les systèmes à cuisson solaire, leur développement et leur utilisation à travers le monde, nous avons commencé par l'étude détaillée de notre problématique. Une conception mécanique du cuiseur proposé à l'aide du logiciel SolidWorks est ensuite présentée, puis une simulation optique de la répartition des rayons solaires sur l'absorbeur du cuiseur pour diverses saisons de l'année est effectuée en utilisant le logiciel TracePro, les configurations de l'ajout des réflecteurs associés au cuiseur sont également étudiées à travers des simulations interprétées. Dans la partie principale de ce travail, nous avons procédé à la réalisation du cuiseur solaire avec ses réflecteurs additionnels. Le cuiseur est ensuite testé; selon les Normes et Standards Internationaux, au site de Ghardaïa sous différentes conditions climatiques avec un ajustement adéquat du cuiseur et une chaîne d'acquisition de données est installée pour le contrôle du système. L'évaluation des performances thermiques du cuiseur est analysée en détail et les caractéristiques du design proposé ainsi que son rendement thermique sont aussi comparés à celles d'un cuiseur ordinaire, réalisé également à cet effet. Une validation des résultats obtenus à partir du système de cuisson par comparaison avec diverses réalisations à travers le monde est effectuée. Les tests entrepris pour vérifier aussi bien la faisabilité et le bon fonctionnement du cuiseur réalisé, montrent que le programme de travail défini initialement a été réalisé dans son ensemble et les résultats obtenus sont très satisfaisants par rapport à un climat hostile, celui du Sud de l'Algérie.

Cette nouvelle idée, réalisée et concrétisée à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, nous a incités à étudier la faisabilité de la cuisson solaire en Algérie à fin de permettre la vulgarisation de ces dispositifs sur l'ensemble du territoire national. Pour cela, deux méthodologies dédiées à l'estimation et la cartographie des températures atteintes par l'absorbeur du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée ont été appliquées sur les données des irradiances solaires; modélisées par Matlab, pour plusieurs sites de différentes coordonnées géographiques dans le but de déterminer l'efficacité du cuiseur sur l'ensemble du territoire Algérien. Les cartes sont générées; à l'aide du logiciel Surfer, pour le cuiseur sans et avec réflecteur, pour connaître l'effet du réflecteur sur le comportement du cuiseur et établir une éventuelle comparaison en différentes saisons de l'année. L'analyse des résultats obtenus ont permis la classification des zones du territoire national les mieux appropriées à l'exploitation de ce type de cuiseur. Nous avons pu; par la présente étude, faire la distinction de quatre zones du territoire national, en allant du grand Sud aux régions côtières; à forte étendue géographique, permettant l'utilisation du cuiseur réalisé à des durées relativement différentes durant l'année, ce qui est en relation directe avec la quantité de l'éclairement solaire reçu par le cuiseur. Par application de la deuxième méthode, nous pouvons estimer l'efficacité du cuiseur, sujet de l'étude; avec une grande précision. Les zones du territoire national les mieux appropriées à l'exploitation de ce type de cuiseur; à des durées relativement différentes, sont bien déterminées. Néanmoins, L'approche que nous avons présentée dans cette thèse montre la faisabilité de ce genre de projet en Algérie. La cuisson solaire reste une réalité, qui permet un mode de cuisson sain aux aliments avec des économies d'énergie et un respect à l'environnement; dont il faut extraire les moindres avantages et essayer d'apporter de probables améliorations dans l'avenir.

Et comme perspective, nous comptons réaliser; dans une prochaine étape, un second système de cuisson permettant l'exploitation de ces technologies dans les zones ayant un éclairement solaire faible (villes côtières), ce système étant "le cuiseur solaire parabolique" fonctionnant avec le principe de concentration d'énergie et permettant d'atteindre des températures plus élevées. Une étude détaillée est aussi envisagée dans le but d'apporter des améliorations sur les designs actuels à fin surmonter leurs inconvénients. L'Algérie a commencé dernièrement à s'introduire dans le solaire thermique à plusieurs échelles en coopération avec des sociétés étrangères, mais l'investissement reste encore minime par rapport à son potentiel énorme en énergie solaire. Pour cela, il est important que le pays commence à maîtriser cette technologie pour pouvoir à terme, équilibrer sa consommation en introduisant de plus en plus l'énergie solaire thermique et des énergies renouvelables en terme général. Un pays comme l'Algérie pourra donc dégager d'énormes quantités de gaz naturel pour l'exportation du faite de l'intégration et de l'investissement dans ce genre de projet.

Bibliographie

- [1] Q.Sylvain, *Les Centrales Solaires à Concentration*, France: Université de Liège, Faculté des sciences appliquées, 2007.
- [2] A. Dizier, F. Pignon, «Manuel de cuisson solaire,» Edition commune SCI / iD COOK, Paris, France, 2005.
- [3] M. Hardy, «Du soleil dans les pays du sud : Entre autonomie et dépendance de développement ?,» Institut d'études politiques de Lyon, Lyon, France, 2005.
- [4] A. Ferriere, G. Flamant, «Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration,» IMP-CNRS, Centre du Four Solaire, France, 2004.
- [5] Nahar NM, «Design, development and testing of a double reflector hot box solar cooker with a transparent insulation material,» *Renewable Energy*, vol. 23, p. 167–179, 2001.
- [6] Nahar NM, Marshall RH, Brinkworth BJ, «Studies on a hot box solar cooker with transparent insulation materials,» *Energy Convers Manag*, vol. 35, p. 787–791, 1994.
- [7] Amer EH, «Theoretical and experimental assessment of a double exposure solar cooker,» *Energy Conversion and Management*, vol. 44, pp. 2651-2663, 2003.
- [8] A. Harmim, M. Belhamel, M. Boukar, M. Amar, «Experimental investigation of a box-type solar cooker with a finned absorber plate,» *Energy*, vol. 35, p. 3799–3802, 2010.
- [9] Mullick SC, Kandpal TC, Kumar S, «Top heat-loss factor of double-glazed box type solar cooker from indoor experiments,» *Energy*, vol. 22, p. 559–565, 1997.
- [10] Deubener J, Hensch G, Moiseev A, Bornhöft H, «Glasses for solar energy conversion systems,» *J Eur Ceram Soc*, vol. 29, p. 1203–1210, 2009.
- [11] Harmim A, Boukar M, Amar M, «Experimental study of a double exposure solar cooker with finned cooking vessel,» *Solar Energy*, vol. 82, p. 287–289, 2008.
- [12] Srinivasan Rao KVN, «Innovative solar cooking vessel design,» chez *Fifth international energy conversion engineering conference and exhibit*, St. Louis, Missouri, USA, 25–27 June 2007.
- [13] Logiciel, *SolidWorks*, 300 Baker Avenue, Concord, MA 01742: SolidWorks Corporation, <http://www.solidworks.com/>.
- [14] Manuel, «TracePro software for opto-mechanical modeling,» Lambda Research Corporation, USA, 2010.

- [15] J. Hofierka and M. Sári, «The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications,» chez *Open source GIS - GRASS users conference*, Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [16] Manuel, *Matlab/Simulink Tutorial*, School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, 2010.
- [17] B. Gschwind, L. Ménard, M. Albuisson and L. Wald, «Converting a Successful Research Project into a Sustainable Service: The Case of the SoDa Web Service,» *Environmental Modelling and Software*, vol. 21, n° 111, pp. 1555 - 1561, 2006.
- [18] «34972A LXI Data Acquisition,» keysight, 2000-2014. [En ligne]. Available: <http://www.keysight.com/ja/pd-1756491-pn-34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unit?&cc=DZ&lc=eng>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [19] Manuel, *Surfer User's guide*, Golden Software Inc, 1999.
- [20] P. Bessemoulin, J.Olivieri, Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, France: Document Meteo-France (Service central d'exploitation de la meteorology and Centre radiométrique de Carpentras), 2000.
- [21] B. Sørensen, *Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects*, Berlin: Ed. Elsevier Science, 2003.
- [22] «U.R.A.E.R,» 13 Novembre 2014. [En ligne]. Available: <http://uraer.cder.dz/>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [23] K. Ogilvie, «L'abc des technologies de l'énergie renouvelable, Pollution Probe,» Canada, 2003.
- [24] S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz and A. Cheknane, «A Modelling Approach of Thermal Insulation Applied to a Saharan Building,» *Thermal Science*, vol. 13, n° 14, pp. 233-244, 2009.
- [25] «Université Hadj Lakhdar BATNA,» 2012. [En ligne]. Available: <http://www.univ-batna.dz/index.php/fr/>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [26] A. Labouret, *Energie solaire photovoltaïque*, France: Ed. Dunod, 2003.
- [27] «CDER,» 2013. [En ligne]. Available: <http://www.cder.dz/>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [28] «Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region,» German Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics, Section Systems Analysis and Technology Assessment, Germany, 2005.
- [29] M.Geyer, «Report on the SolarPaces, Start Mission to Algeria,» IEA SolarPACES, USA, 2003.

- [30] F. Morse, «Global Initiative for Concentrating Solar Power (CSP), Global market initiative,» Washington, USA, 2004.
- [31] A. Ferriere, «Les centrales solaires thermodynamiques: l'état de l'art et les perspectives mondiales,» chez *Colloque de l'Institut ENSAM de Corse*, Bastia, 2005.
- [32] «SOLARPACES,» solarpaces, 2013. [En ligne]. Available: <http://www.solarpaces.org/>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [33] Document, «Cuiseurs solaires: comment construire, employer et apprécier,» Solar Cooker International (SCI), California, USA, 2004.
- [34] «Solarcooker at Cantinawest,» 2008-2014. [En ligne]. Available: <http://www.solarcooker-at-cantinawest.com/solarcooking-history>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [35] «Solar Cookers International,» SCI, [En ligne]. Available: <http://www.solarcookers.org/>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [36] «ID Cook, le spécialiste de la cuisson solaire,» IDCOOK, 2011. [En ligne]. Available: <http://www.iDCOOK.com>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [37] «Solar Cooking,» SCInet, [En ligne]. Available: <http://solarcooking.org/>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [38] «C fait maison,» 2014. [En ligne]. Available: <http://www.cfaitmaison.com>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [39] Thirugnanasambandam M, Iniyan S, Goic R, «A review of solar thermal technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 312-322, 2010.
- [40] Yettou F, Azoui B, Malek A, Gama A, Panwar NL, «Solar cooker realizations in actual use: An overview,» *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 37, pp. 288-306, 2014.
- [41] Purohit I, Purohit P, «Instrumentation error analysis of a box-type solar cooker,» *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 365-375, 2009.
- [42] Kumar BC, Mullick SC, «Study of second figure of merit of box type solar cookers by semi-log plot method using instantaneous and averaged values of climatic variables,» *ISES Solar World Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement*, pp. 1947-1950, 2007.
- [43] Kumar S, «Estimation of design parameters for thermal performance evaluation of box-type solar cooker,» *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1117-1126, 2005.
- [44] Kurt H, Atik K, Özkaymak M, Recebli Z, «Thermal performance parameters estimation of hot box type solar cooker by using artificial neural network,» *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 47, pp. 192-200, 2008.

- [45] Algifri AH, Al-Towaie HA, «Efficient orientation impacts of box-type solar cooker on the cooker performance,» *Solar Energy*, vol. 70, n° 12, pp. 165-170, 2001.
- [46] Schwarzer K, Vieira da Silva ME, «Characterisation and design methods of solar cookers,» *Solar Energy*, vol. 82, pp. 157-163, 2008.
- [47] Ekechukwu OV, Ugwuoke NT, «Design and measured performance of a plane reflector augmented box-type solar-energy cooker,» *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 1935-1952, 2003.
- [48] El-Sebaai AA, Ibrahim A, «Experimental testing of a box-type solar cooker using the standard procedure of cooking power,» *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1861-1871, 2005.
- [49] K. S, «Thermal performance study of box type solar cooker from heating characteristic curves,» *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 127-139, 2004.
- [50] Kumar S, «Natural convective heat transfer in trapezoidal enclosure of box type solar cooker,» *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 211-222, 2004.
- [51] Mohamad MA, El-Ghetany HH, Dayem AMA, «Design, construction and field test of hot -box solar cookers for African Sahel region,» *Renewable Energy*, vol. 14, n° 1-4, pp. 49-54, 1998.
- [52] Negi BS, Purohit I, «Experimental investigation of a box type solar cooker employing a non-tracking concentrator,» *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 577-604, 2005.
- [53] Kumar N, Agravat S, Chavda T, Mistry HN, «Design and development of efficient multipurpose domestic solar cookers/dryers,» *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2207-2011, 2008.
- [54] Kumar N, Chavda T, Mistry H.N, «A truncated pyramid non-tracking type multipurpose domestic solar cooker/hot water system,» *Applied Energy*, vol. 87, pp. 471-477, 2010.
- [55] Gaur A, Singh OP, Singh SK, Pandey GN, «Performance study of solar cooker with modified utensil,» *Renewable Energy*, vol. 18, pp. 121-129, 1999.
- [56] Rao AVN, Subramanyam S, «Solar cookers. Part I. Cooking vessel on lugs,» *Solar Energy*, vol. 75, pp. 181-185, 2003.
- [57] Rao AVN, Subramanyam S, «Solar cookers. Part II. Cooking vessel with central annular cavity,» *Solar Energy*, vol. 78, p. 19–22, 2005.
- [58] Reddy AR, Rao AVN, «Prediction and experimental verification of performance of box type solar cooker. Part I. Cooking vessel with central cylindrical cavity,» *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 2034-2043, 2007.
- [59] Reddy AR, Rao AVN, «Prediction and experimental verification of performance of box type

- solar cooker. Part II. Cooking vessel with depressed lid,» *Energy Conversion and Management*, vol. 49, p. 240–246, 2008.
- [60] Harmim A, Boukar M, Amar M, «Etude expérimentale d'un cuiseur solaire de type boîte à trois réflecteurs plans et une surface d'ouverture inclinée,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 10, n° 11, pp. 31-38, 2007.
- [61] Harmim A, Boukar M, Amar M, «Augmentation du gain énergétique d'un cuiseur solaire à double exposition,» chez *Colloque International sur les Energies Renouvelables (CER07)*, Ouajda - Maroc, 4-5 Mai 2007.
- [62] Harmim A, Belhamel M, Boukar M, Amar M, «Développement et expérimentation d'un cuiseur solaire à double exposition,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 11, n° 13, pp. 371-377, 2008.
- [63] Harmim A, Belhamel M, Boukar M, Amar M, «Contribution à l'amélioration des performances d'un cuiseur solaire boîte,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 12, n° 13, pp. 419 - 432, 2009.
- [64] Harmim A, Merzouk M, Boukar M, Amar M, «Mathematical modeling of a box-type solar cooker employing an asymmetric compound parabolic concentrator,» *Solar Energy*, vol. 86, p. 1673–1682, 2012.
- [65] Harmim A, Merzouk M, Boukar M, Amar M, «Performance study of a box-type solar cooker employing an asymmetric compound parabolic concentrator,» *Energy*, vol. 47, pp. 471-480, 2012.
- [66] Richard P, «Exergy analysis of the solar cylindrical-parabolic cooker,» *Solar Energy*, vol. 79, pp. 221-233, 2005.
- [67] Ozturk HH, «Experimental determination of energy and exergy efficiency of the solar parabolic-cooker,» *Solar Energy*, vol. 77, pp. 67-71, 2004.
- [68] Sharaf E, «A new design for an economical, efficient, conical solar cooker,» *Renewable Energy*, vol. 27, pp. 599-619, 2002.
- [69] Sonune AV, Philip SK, «Development of a domestic concentrating cooker,» *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 1225-1234, 2003.
- [70] Franco J, Cadena C, Saravia L, «Multiple use communal solar cookers,» *Solar Energy*, vol. 77, p. 217–223, 2004.
- [71] Arenas JM, «Design, development and testing of a portable parabolic solar kitchen,» *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 257-266, 2007.

- [72] Grupp M, Balmer M, Beall B, Bergler H, Cieslok J, Hancock D, Gerd Schroder, «On-line recording of solar cooker use rate by a novel metering device: Prototype description and experimental verification of output data,» *Solar Energy*, vol. 83, pp. 276-279, 2009.
- [73] Al-Soud MS, Abdallah E, Akayleh A, Abdallah S, Hrayshat ES, «A parabolic solar cooker with automatic two axes sun tracking system,» *Applied Energy*, vol. 87, p. 463–470, 2010.
- [74] Abu-Malouh R, Abdallah S, Muslih IM, «Design, construction and operation of spherical solar cooker with automatic sun tracking system,» *Energy Conversion and Management*, vol. 52, p. 615–620, 2011.
- [75] Nahar NM, «Performance and testing of a hot box storage solar cooker,» *Energy Conversion and Management*, vol. 44, pp. 1323-1331, 2003.
- [76] Sharma SD, Buddhi D, Sawhney RL, Sharma A, «Design, development and performance evaluation of a latent heat storage unit for evening cooking in a solar cooker,» *Energy Conversion & Management*, vol. 41, pp. 1497-1508, 2000.
- [77] Buddhi D, Sharma SD, Sharma A, «Thermal performance evaluation of a latent heat storage unit for late evening cooking in a solar cooker having three reflectors,» *Energy Conversion and Management*, vol. 44, pp. 809-817, 2003.
- [78] Mawire A, McPherson M, van den Heetkamp R.R.J, «Simulated energy and exergy analyses of the charging of an oil-pebble bed thermal energy storage system for a solar cooker,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 92, pp. 1668-1676, 2008.
- [79] Mawire A, McPherson M, van den Heetkamp R.R.J, «Discharging simulations of a thermal energy storage (TES) system for an indirect solar cooker,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 94, pp. 1100-1106, 2010.
- [80] Muthusivagami R.M, Velraj R, Sethumadhavan R, «Solar cookers with and without thermal storage—A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, p. 691–701, 2010.
- [81] Esen M, «Thermal performance of a solar cooker integrated vacuum-tube collector with heat pipes containing different refrigerants,» *Solar Energy*, vol. 76, pp. 751-757, 2004.
- [82] Sharma SD, Iwata T, Kitano H, Sagara K, «Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit,» *Solar Energy*, vol. 78, pp. 416-426, 2005.
- [83] Hussein HMS, El-Ghetany HH, Nada SA, «Experimental investigation of novel indirect solar cooker with indoor PCM thermal storage and cooking unit,» *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 2237-2246, 2008.
- [84] Panwar NL, Kothari S, Kaushik SC, «Experimental investigation of energy and exergy

- efficiency of masonry-type solar cooker for animal feed,» *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 29, n° 13, pp. 178-184, 2010.
- [85] Shukla SK, «Comparison of energy and exergy efficiency of community and domestic type parabolic solar cookers,» *Int J Green Energy*, vol. 6, pp. 437-449, 2009.
- [86] Pandey AK, Tyagi VV, Park SR, Tyagi SK, «Comparative experimental study of solar cookers using exergy analysis,» *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 109, pp. 425-431, 2012.
- [87] S. REH, «Renewable energy: a response to climate change,» *Solar Energy*, vol. 76, pp. 9-17, 2004.
- [88] Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S, «Role of renewable energy sources in environmental protection: a review,» *Renew Sust Energy Rev*, vol. 15, pp. 1513-1524, 2011.
- [89] Nandwani SS, «Solar cookers – cheap technology with high ecological benefits,» *Ecol Econ*, vol. 17, pp. 73-81, 1996.
- [90] Nahar NM, «Design, development and testing of a novel non-tracking solar cooker,» *Int J Energy Res*, vol. 22, pp. 1191-1198, 1998.
- [91] Nahar NM, «Solar cooking – an appropriate technology for development countries,» *World Renew Energy Cong VI*, p. 2245–2248, 2000.
- [92] Nahar NM, «Design and development of a large size non-tracking solar cooker,» *J Eng Sci Technol*, vol. 4, pp. 264-271, 2009.
- [93] «PROMES,» CNRS, [En ligne]. Available: <http://www.promes.cnrs.fr>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [94] A. Mefti, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf, «Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 2, n° 12, pp. 69-85, 1999.
- [95] J.K. Page, Prediction of solar radiation on inclined surfaces, Solar Energy R & D in the European Community, Series F Solar Radiation Data: Dordrecht: Reidel Publishing Company, 1986.
- [96] M. Katz, A. Baille and M. Mermier, «Atmospheric turbidity in a semi rural site I,» *Solar Energy*, vol. 28, pp. 323-327, 1982.
- [97] M. Katz, A. Baille and M. Mermier, «Atmospheric turbidity in a semi rural site III,» *Solar Energy*, vol. 28, pp. 329-334, 1982.
- [98] F. Linke, «Transmissions - Koeffizient und Trübungsfaktor,» *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, vol. 10, pp. 91-103, 1922.

- [99] F. Kasten, «The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness,» *Solar Energy*, vol. 56, n° 13, pp. 239-244, 1996.
- [100] C. P. Jacovides, «Model comparison for the calculation of Linke's turbidity factor,» *International Journal of climatology*, vol. 17, n° 15, p. 551 – 563, 1997.
- [101] C. Gueymard and F. Vignola, «Determination of atmospheric turbidity from the diffuse-beam broadband irradiance ratio,» *Solar Energy*, vol. 63, n° 13, pp. 135-146, 1998.
- [102] C.A. Gueymard and J.D. Garrison, «Critical evaluation of precipitable water and atmospheric turbidity in Canada using measured hourly solar irradiance,» *Solar Energy*, vol. 62, n° 14, pp. 291-307, 1998.
- [103] M. Cucumo, D. Kaliakatsos and V. Marinelli, «A calculation method for the estimation of the Linke turbidity factor,» *Renewable Energy*, vol. 19, n° 11-2, pp. 249-258, 2000.
- [104] R. Pedros, J.A Utrillas, J.A Martinez-Lozano and F. Tena, «Values of Broad Band Turbidity Coefficients in a Mediterranean Coastal Site,» *Solar Energy*, vol. 66, n° 11, pp. 11-20, 1999.
- [105] A.S. Rapti, «Atmospheric transparency, atmospheric turbidity and climatic parameters,» *Solar Energy*, vol. 69, n° 12, pp. 99-111, 2000.
- [106] M. Diouri, L. El Amraoui, R. Jaenicke and L. Schutz, «Atmospheric turbidity over the Angad area of Morocco,» *Journal of Aerosol Science*, vol. 31, n° 11, pp. 279-280, 2000.
- [107] M. Chaâbane, «Analysis of the atmospheric turbidity levels at two Tunisian sites,» *Atmospheric Research*, vol. 87, pp. 136-146, 2008.
- [108] M. Chaâbane, M. Masmoudi and F. Elleuch, «Determination of Linke turbidity factor from solar radiation measurement in Northern Tunisia,» *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 2065-2076, 2004.
- [109] El-Hussainy and Omran, «Analysis and trends of atmospheric turbidity parameters over Cairo,» *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 66, n° 11-2, pp. 113-121, 1998.
- [110] A.S. Zakey, M.M. Abdelwahab and P.A. Makar, «Atmospheric turbidity over Egypt,» *Atmospheric Environment*, vol. 38, pp. 1579-1591, 2004.
- [111] L. Diabaté, J. Remund and L. Wald, «Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa,» *Solar Energy*, vol. 75, n° 12, pp. 111-119, 2003.
- [112] J. Remund, L. Wald, M. Lefevre, T. Ranchin and J. Page, «Worldwide Linke turbidity information,» chez *ISES Solar World Congress 2003*, Goeteborg, Sweden, 16–19 June 2003.
- [113] Yettou F, Gama A, Malek A, Haddadi M, Azoui B, «Linke and Angstrom turbidity determinations from solar radiation measurements in Algeria,» chez *Séminaire International*

sur les Energies Nouvelles et Renouvelables (SIENR10), Ghardaia - Algérie, 11-12 Octobre 2010.

- [114] Gama A, Yettou F, Malek A, Larbès C, Azoui B, «Determination of atmospheric turbidity using solar radiation measurements for two Algerian sites,» chez *2nd International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources (NURER10)*, Ankara - Turquie, 04 - 07 Juillet 2010.
- [115] C. Rigollier, O. Bauer and L. Wald, «On the Clear Sky Model of the 4th European Solar Radiation Atlas With Respect to the Heliosat Method,» *Solar Energy*, vol. 68, n° 11, pp. 33-48, 2000.
- [116] Manuel, *METEONORM version 6.0, Handbook part II: Theory*, Technical Documentation, 2007.
- [117] R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, *Le rayonnement solaire, Conversion thermique et applications*, France: Technique & documentation, Ed. Lavoisier, 1983.
- [118] J.M. Chasseriau, *Conversion thermique du rayonnement solaire*, France: Ed. Dunod, 1984.
- [119] A. Khedim, *L'énergie Solaire utilisation thermique et photovoltaïque*, ANEP, 2005.
- [120] A. Labouret, *Energie solaire photovoltaïque*, France: Ed. Dunod, 2003.
- [121] F. Kasten and A.T. Young, «Revised optical air mass tables and approximation formula,» *Applied Optics*, vol. 28, n° 12, p. 4735 – 4738, 1989.
- [122] F. Kasten, «A Simple Parameterization of Two Pyrheliometric formulae for determining the Linke Turbidity Factor,» *Meteorology Rdsch*, vol. 33, pp. 124-127, 1980.
- [123] K. Feussner and P. Dubois, «Trübungsfaktor, Precipitable Water,» *Staub. Gerlands Beitr., Geophysical*, vol. 27, pp. 132 - 175, 1930.
- [124] A. Louche, G. Peri and M. Iqbal, «An analysis of Linke Turbidity Factor,» *Solar Energy*, vol. 37, n° 16, pp. 393-396, 1986.
- [125] F. Yettou, A. Gama, A. Malek, B. Azoui, C. Larbes, «Etude et conception d'un logiciel de calcul de l'éclairement solaire en Algérie destiné aux systèmes à concentration,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 14, n° 11, pp. 27-46, 2011.
- [126] M. Lefèvre, M. Albuisson and L. Wald, *Description of the software HELIOSAT-II for the conversion of images acquired by METEOSAT satellites in the visible band into maps of solar radiation available at ground level*, Paris, France: Groupe Télédétection & Modélisation, Centre d'Energétique, Armines, Ecole des Mines, 2004.
- [127] F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi et A. Gama, «Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 12,

n° 12, pp. 331-346, 2009.

- [128] T. Muneer, «Solar radiation model for Europe,» *Building services engineering research and technology*, vol. 11, pp. 153-163, 1990.
- [129] Yettou F, Azoui B, Malek A, Gama A, «Conception et réalisation d'un cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée,» chez *2nd International Conference on Energy and Sustainable Development (ICESD'13)*, Adrar - Algérie, 19-20 Février 2013.
- [130] Ibrahim SMA, El-Reidy MK, «The performance of solar cooker in Egypt,» *Renewable Energy*, Vols. 1 sur 26-8, pp. 1041-1050, 1995.
- [131] 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.
- [132] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek. A. Gama, «Study and simulation of concentrating irradiance in box solar cooker with tracking reflectors,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 15, n° 14, pp. 661-670, 2012.
- [133] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek. A. Gama, M.A Rouissa, O Benzeggouta, «Réalisation et expérimentation d'un cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée muni d'un réflecteur plan,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 16, n° 14, pp. 629-640, 2013.
- [134] F. Yettou, B. Azoui et A. Malek, «Determination of adjustment tracking time in two types of solar cookers by ray-tracing method,» chez *Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, (POWERENG), 2013. DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635716, 2013, Page(s): 822- 827, 2013.
- [135] Duffie J, Beckman W, *Solar engineering of thermal processes*, USA: John Wiley & Sons, 1991.
- [136] Mullick SC, Kandpal TC, Sexena AK, «Thermal test procedure for box type solar cooker,» *Solar Energy*, vol. 39, n° 14, pp. 353-360, 1987.
- [137] Document, *BIS. Indian standards IS 13429: solar cooker - box type, first revision. Manak Bhawan*, New Delhi: Bureau of Indian Standards (BIS), 2000.
- [138] Document, *Solar cooker specifications: Part 1-3 of IS 13429, Bureau of Indian Standards*, New Delhi, India: Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg, 2000.
- [139] Funk PA, «Evaluating the international standard procedures for testing solar cookers and reporting performance,» *Solar Energy*, vol. 68, n° 11, pp. 1-7, 2000.
- [140] Funk PA, Larson DL, «Parametric model of solar cooker performance,» *Solar Energy*, vol. 62, n° 11, pp. 63-68, 1998.
- [141] Cuce, E. and Cuce, P.M., «A comprehensive review on solar cookers,» *Appl. Energy*, vol. 87,

pp. 399-421, 2013.

- [142] Bejan, A, Entropy generation through heat and fluid flow, NewYork USA: Wiley, 1982.
- [143] Bejan, A, «Unification of three different theories concerning the ideal conversion of enclosed radiation,» *Trans ASME J Solar Energy Engineering*, vol. 109, pp. 46-51, 1987.
- [144] Petela, R, «Exergy of undiluted thermal radiation,» *Solar Energy*, vol. 74, pp. 469-488, 2003.
- [145] Ozturk, H.H, «Comparison of energy and exergy efficiency for solar box and parabolic cookers,» *J. Energy Eng*, vol. 133, pp. 53-62, 2007.
- [146] Panwar NL, «Thermal modeling, energy and exergy analysis of animal feed solar cooker,» *J. Renewable Sustainable Energy*, vol. 5, p. 043105, 2013.
- [147] Larson, D.L. and Cortez, L.A.B, «Exergy analysis: essential to effective energy management,» *Transactions of the ASAE*, vol. 38, n° 14, pp. 1173-1178, 1995.
- [148] Kaushik, S.C. and Gupta, M.K, «Energy and exergy efficiency comparison of communitysize and domestic-size paraboloidal solar cooker performance,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 12, pp. 60-64, 2008.
- [149] Szargut, J., Morris, D.R. and Steward, F.R, Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes, New York USA: Hemisphere Publishing, 1998.
- [150] Kaushik, S.C., Mishra, R.D., and Singh, N, «Second law analysis of a solar thermal power system,» *International Journal of Solar Energy*, vol. 20, n° 14, pp. 239-253, 2000.
- [151] Kreith, F. and Kreider, J, Principles of Solar Engineering, New York, USA: Hemisphere-McGraw-Hill, 1978.
- [152] Kotas, T. J, The Exergy Method of Thermal Power Plants, Krieger, Malabar, FL, 1995.
- [153] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek, NL. Panwar, A. Gama, H. Merarda, «Comparative assessment of two different designs of box solar cookers under Algerien Sahara conditions,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 16, n° 14, pp. 629-640, 2013.
- [154] Yettou F, Azoui B, Malek A, Panwar NL, Gama A, Arrif T, «Performance parameters determination by experimental testing of box solar cooker with south tilted collecting surface,» chez *4th International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources (NURER2014)*, Antalya - Turkey, 26-29 Octobre 2014.
- [155] Yettou F, Azoui B, Malek A, Panwar NL, Gama A, Arrif T, Merarda H, «Second law experimental analysis of box type solar cooker',» chez *The International Energy Technologies Conference (ENTECH2013)*, Istanbul - Turquie, 26-28 Décembre 2013.

- [156] Yettou F., Azoui, B., Malek, A., Panwar, N.L. and Gama, A, «Energetic and exergetic evaluation of solar box cooker in Algerian climatic conditions,» *Int. J. Exergy*, vol. 16, n° 13, pp. xxx-xxx, <http://www.inderscience.com/info/ingeneral/forthcoming.php?jcode=ijex>.
- [157] Akpinar, E.K, «Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of aromatic plants,» *J. Food Eng*, vol. 77, p. 864–870, 2006.
- [158] Mullick SC, Kandpal TC, Kumar S, «Testing of box-type solar cooker: second figure of merit F2 and its variation with load and number of pots,» *Solar Energy*, vol. 57, n° 15, pp. 409-413, 1996.
- [159] Sethi VP , Pal DS, Sumathy K, «Performance evaluation and solar radiation capture of optimally inclined box type solar cooker with parallelepiped cooking vessel design,» *Energy Conversion and Management*, vol. 81, pp. 231-241, 2014.
- [160] Huseyin Ozturk H, «Energy and exergy efficiencies of a solar box-cooker,» *Int J Exergy*, vol. 1, n° 12, pp. 202-214, 2004.
- [161] Panwar NL, S. Kothari, and S. C. Kaushik, «Energetic and exergetic analysis of three different solar cookers,» *J. Renewable Sustainable Energy*, vol. 5, p. 023102, 2013.
- [162] N. Kumar, G.Vishwanath, A.Gupta, «Effect of load variations on exergy performance of solar box type cooker,» *Journal of Renewable and Sustainable Energy Energy, American Institute of Physics (AIP)*, vol. 4, n° 1, doi: 10.1063/1.4763566, p. 053125, 2012.
- [163] Kumar N, Vishwanath G, Gupta A, «An exergy based test protocol for truncated pyramid type solar box cooker,» *Energy*, vol. 36, pp. 5710-5715, 2011.
- [164] Todd, J. J., and Miller, S, «Performance testing of cardboard solar box cookers,» *Women Leaders on the Uptake of Renewable Energy Seminar, Perth*, pp. 111-118, 2001.
- [165] Vaishya, J.S., Tripathi, T.C., Singh, D., Bhawalkar, B.H., Hegde, M.S, «A hot box solar cooker: performance analysis and testing,» *Energy Conversion and Management*, vol. 25, pp. 373-379, 1985.
- [166] Nahar,N.M, «Performance and Testing of an Improved Hot Box Solar Cooker,» *Energy Conversion and Management*, vol. 30, n° 11, pp. 9-16, 1990.
- [167] Harmim A, Merzouk M, Boukar M, Amar M, «Design and experimental testing of an innovative building-integrated box type solar cooker,» *Solar Energy*, vol. 98, p. 422433, 2013.
- [168] Mahavar S, Sengar N, Rajawat P, Verma M, Dashora P, «Design development and performance studies of a novel single family solar cooker,» *Renewable Energy*, vol. 47, pp. 67-76, 2012.

- [169] S. Mahavar , M. Verma , P. Rajawat , N. Sengar & P. Dashora, «Novel solar cookers: suitable for small families,» *International Journal of Sustainable Energy*, p. DOI:10.1080/14786451.2012.734824, 2012.
- [170] Rohit Misra & Tarun Kumar Aseri, «Thermal performance enhancement of box-type solar cooker: a new approach,» *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 31, n° %12, pp. 107-118, 2012.
- [171] Farooqui SZ, «A gravity based tracking system for box type solar cookers,» *Solar Energy*, vol. 92, pp. 62-68, 2013.
- [172] Abed, Fayadh M, «Experimental Investigation of Thermal Performance of Solar Cooker with Reflector,» *European Journal of Scientific Research*, vol. 56, n° %11, p. 112, 2011.
- [173] Funk, P.A, «Evaluation the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance,» *Solar Energy*, vol. 68, n° %11, pp. 1-7, 2000.
- [174] Kumar N, Vishwanath G, Gupta A, «An exergy based unified test protocol for solar cookers of different geometries,» *Renewable Energy*, vol. 44, p. 457–462, 2012.
- [175] Kumar N, Vishwanath G, Gupta A, «An exergy based test protocol for truncated pyramid type solar box cooker,» *Energy*, vol. 36, pp. 5710-5715, 2011.
- [176] Harmim A, Merzouk M, Boukar M, Amar M, «Solar cooking development in Algerian Sahara: Towards a socially suitable solar cooker.,» *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 37, pp. 207-214, 2014.
- [177] Muneer T, Asif M, Munawwar S, «Sustainable production of solar electricity with particular reference to the Indian economy,» *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 9, p. 444–473, 2005.
- [178] Boudghene Stambouli A, «Promotion of renewable energies in Algeria: Strategies and perspectives,» *Renew Sust Energy Rev*, vol. 15, pp. 1169-1181, 2011.
- [179] «Solar Household Energy,» SHE Inc, 2014. [En ligne]. Available: <http://www.SHE-inc.org/>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [180] Ministère de l'Énergie et des Mines, *Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables. Guide des Energies Renouvelables*, info@nakheeldz.com, 2007.
- [181] «Atlas de la Cuisine Solaire,» 2014. [En ligne]. Available: <http://www.atlascuisinesolaire.com/>. [Accès le 13 Décembre 2014].
- [182] Yettou F, Azoui B, Malek A, Gama A, Arrif T, Merarda H, Khelifi R, «Contribution à la cartographie de l'efficacité d'un cuiseur solaire de type boîte en Algérie – Résultats préliminaires –,» chez *1ière Conférence Nationale sur les Energies Renouvelables et leurs*

Applications (CNERA'14), Adrar - Algérie, 18-19 Février 2014.

- [183] Chong KK, Lim CY, Hiew W, «Cost-effective solar furnace system using fixed geometry Non-Imaging Focusing Heliostat and secondary parabolic concentrator,» *Renew Energy*, vol. 36, p. 1595–1602, 2011.
- [184] Yettou F, Azoui B, Malek A, Gama A, Panwar NL, «Estimation et cartographie des températures d'un cuiseur solaire boîte avec et sans réflecteur en Algérie,» chez *3eme Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables (SIENR14)*, Ghardaia - Algérie, 13-14 Octobre 2014.
- [185] El-Sebaï AA, Aboul-Enein S, «A box-type solar cooker with one-step outer reflector,» *Energy*, vol. 22, n° 15, pp. 515-524, 1997.
- [186] El-Sebaï AA, «Thermal performance of a box-type solar cooker with outerinner reflectors,» *Energy*, vol. 22, n° 10, pp. 969-978, 1997.
- [187] Bidotnark AK, Turkmen N, «Modelling of a hot box solar cooker,» *Energy Convers Manage*, vol. 37, n° 13, pp. 303-310, 1996.
- [188] Pejack ER, «Mathematical model of the thermal performance of box-type solar cookers,» *Renew Energy*, vol. 1, n° 15/6, pp. 609-615, 1991.
- [189] G. n. Tiwari , kailash Thakur, y. p. Yadav, «Evaluation of a solar cooker design with reflectors,» *International Journal of Solar Energy*, vol. 9, n° 12, pp. 93-99, 1990.

TRAVAUX REALISES DURANT LA THESE

▪ Publications Internationales

1. Yettou F, Azoui B, Malek A, Gama A, Panwar NL. *Solar cooker realizations in actual use: An overview*. Renew Sustain Energy Rev 2014;37:288–306.
2. Yettou F., Azoui, B., Malek, A., Panwar, N.L. and Gama, A. (2015). ‘*Energetic and exergetic evaluation of solar box cooker in Algerian climatic conditions*’, Int. J. Exergy, Vol. 16, No. 3, pp.xxx–xxx.
Le résumé de l’article est actuellement disponible online à l’adresse :
<http://www.inderscience.com/info/ingeneral/forthcoming.php?jcode=ijex>
3. Yettou F, Azoui B, Malek A, Panwar NL, Gama A, Arrif T, Merarda H. ‘*Second law experimental analysis of box type solar cooker*’, Renewable Energy Sources Energy Policy and Energy Management, Volume III, 2014, pp 82 – 92.
4. F. Yettou, B. Azoui et A. Malek, ‘*Determination of adjustment tracking time in two types of solar cookers by ray-tracing method*’, Power Engineering, Energy and Electrical Drives’ (POWERENG), 2013. DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635716, 2013, Page(s): 822- 827.

▪ Publications Nationales

1. F. Yettou, B. Azoui, A. Malek. A. Gama, M.A Rouissa, O Benzeggouta, ‘*Réalisation et expérimentation d’un cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée muni d’un réflecteur plan*’, Revue des Energies Renouvelables CDER, Volume 16, Numéro 4, pages 629-640, Décembre 2013.
2. F. Yettou, B. Azoui, A. Malek. A. Gama, ‘*Study and simulation of concentrating irradiance in box solar cooker with tracking reflectors*’, Revue des Energies Renouvelables CDER, Volume 15, Numéro 4, pages 661-670, Décembre 2012.
3. 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, Numéro spécial SIENR’12, pp. 233 – 245, 2012.
4. F. Yettou, A. Gama, A. Malek, B. Azoui, C. Larbes, ‘*Etude et conception d’un logiciel de calcul de l’éclairage solaire en Algérie destiné aux systèmes à concentration*’, Revue des Energies Renouvelables CDER, Volume 14, Numéro 1, pages 27-46, Mars 2011.

5. F.Yettou, A.Malek, M.Haddadi et A.Gama, '*Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie*', Revue des Energies Renouvelables CDER, Volume 12, Numéro 2, pages 331-346, Juin 2009.

▪ **Communications Internationales**

1. Yettou F, Azoui B, Malek A, Panwar NL, Gama A, Arrif T. '*Performance parameters determination by experimental testing of box solar cooker with south tilted collecting surface*', 4th International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources (NURER14), 26 - 29 October 2014, Antalya - Turkey.
2. Yettou F, Azoui B, Malek A, Gama A, Panwar NL. '*Estimation et cartographie des températures d'un cuiseur solaire boîte avec et sans réflecteur en Algérie*', 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables (SIENR14), 13-14 Octobre 2014, Ghardaïa - Algérie.
3. Yettou F, Azoui B, Malek A, Gama A. '*Conception et réalisation d'un cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée*', 2nd International Conference on Energy and Sustainable Development (ICESD'13), 19-20 Février 2013, Adrar - Algérie.
4. Yettou F, Gama A, Malek A, Haddadi M, Azoui B. '*Linke and Angstrom turbidity determinations from solar radiation measurements in Algeria*', Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables (SIENR10), 11-12 Octobre 2010, Ghardaia - Algérie.
5. Gama A, Yettou F, Malek A, Larbes C, Azoui B. '*Determination of atmospheric turbidity using solar radiation measurements for two Algerian sites*', 2th International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources (NURER10), 04 - 07 Juillet 2010, Ankara - Turkey.

▪ **Communications Nationales**

1. Yettou F, Azoui B, Malek A, Gama A, Arrif T, Merarda H, Khelifi R. '*Contribution à la cartographie de l'efficacité d'un cuiseur solaire de type boîte en Algérie – Résultats préliminaires –*', 1^{ière} Conférence Nationale sur les Energies Renouvelables et leurs Applications (CNERA'14), 18-19 Février 2014, Adrar - Algérie.