

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département d'Automatique et Electromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologie*

Filière : *Energies Renouvelables*

Spécialité : *Energies Renouvelables en Electrotechnique*

Par : MEHAIA Aida et RAOUDI Mustapha

Thème

**Simulation du Comportement Thermique d'un
Cuiseur Solaire Boîte Utilisant COMSOL et
Validation Expérimentale sur le Site de Ghardaïa**

Soutenu publiquement le : 18/09/2019

Devant le jury :

AKERMI Faouzi	M A A	Université Ghardaïa	Président
MEDOUKALI Hemza	M A B	Université Ghardaïa	Examineur
YETTOU Fatiha	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	Encadreur
BEN CHEIKH EL HOCINE Hanane	Maître de Recherche B	URAER. Ghardaïa	Co-encadreur

Année Universitaire : 2018/2019

REMERCIEMENTS

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à notre Dieu pour nous avoir donné l'esprit et les moyens pour arriver à ce stade de connaissance, nous prions pour que nous restions fidèles à lui.

Nous tenons à exprimer toute reconnaissance à nos Encadreur de mémoire Dr. YETTOU Fatiha, Maitre de Recherche A, à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, pour sa patience, sa disponibilité et surtout son aide et ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion"

"Nous voudrions tout d'abord adresser toute nos gratitude à Dr.BEN CHEIKH EL HOCINE, Maitre de Recherche A, à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa

"On tiens à remercier Dr. GAMA Amor, Maitre de Recherche A, à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, pour sa gentillesse et pour tous l'aide qu'il a fournis et les connaissances qu'il a su nous transmettre. Nous le remercierons également pour sa disponibilité et la qualité de ces conseils"

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

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

"Nos profonds remerciements aux membres du jury et qui acceptés d'évaluer et d'enrichir ce travail"

"Nous tenons à saisir cette occasion pour adresser nos profonds remerciements à nos enseignants Universitaire en Energies Renouvelables, qui ; on espère trouver dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis"

"Nous voudrions exprimer nos reconnaissance envers nos amis et collègues, qui nous ont apportés leur soutien moral et intellectuel tout au long de nos démarche ".

UN GRAND MERCI A TOUS

DEDICACES

*Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soit-vous ne sauraient exprimer ma gratitude, ma reconnaissance et montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour vous
Je dédie ce mémoire*

A MES TRÈS CHÈRS PARENTS

Mon PÈRE, qui peut être fière et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi. Je t'aime papa

Ma MÈRE, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. Je t'aime maman

A Ma petite famille mon mari je vous dédie à ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter. Que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, qui étudie de l'esprit et te protège de tout mal. Merci beaucoup.

A mon filial Ademabdelbasette et mon fille Rofaïda . Que Dieu te protège

A Maître Azawi MOHAMED et Maître CHRIFE SALEH. Maîtres en université Ghardaïa

A mes SŒURS Zineb, Zohra qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, et pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, merci beaucoup à vous.

A toutes mes amies, Et mon binôme Maître Raoudi .

A tous les étudiants de master 2.

Aïda

DEDICACE

Pour ces encouragements durant mes études, pour leurs conseils fructueux, pour leur tendresse, pour leur énorme tendresse, je dédie ce modeste travail A ma mère et mon père ;

A ma femme qui m'a beaucoup soutenu pendant l'accomplissement de cette étude ;

A mes filles Oum romane, Souhila et surtout la petite Fadila ;

A mes frères et mes sœurs qui m'ont beaucoup aidées.

*A mes oncles et toute les familles **RAOUDI** et **BOUABDELLI** surtout ma mère Ouled Laid FADILA ;*

A ma collègue d'étude : A MEHAIA ;

A tous mes amis : Ahmed, Zoubir, Ismail, Abdraouf, Salah, Boubakre ,Chelhi , Tayeb, et Dine ;

A tous mes collègues de département surtout les étudiants du master II ;

A tous personnes qui méritent mes respects et gratitudees ;

A tous ceux qui me sont chères.

Mustapha.

Résumé

Afin d'étudier les performances thermiques d'un cuiseur solaire destiné à la cuisson des aliments, nous avons mené une étude expérimentale et numérique pour examiner les profils des températures d'un prototype de cuiseur solaire de type boîte réalisé par l'équipe Mini Centrales Thermodynamiques (MCT) de Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa). La simulation numérique prend en compte les conditions initiales, les conditions météorologiques et les conditions aux limites. Les valeurs des températures de l'eau dans l'ustensile et sur la plaque absorbante ont été obtenues par le logiciel Comsol. Les tests expérimentaux (tests de stagnation et de chauffage sensible) ont été réalisés sous les conditions climatiques de la ville de Ghardaïa (située à une latitude de 32.39° , une longitude de 3.78° et une altitude de 463 m au niveau de la mer). Les essais ont été effectués pendant une journée claire du mois d'été sous un éclairage solaire global reçu sur un plan horizontal du cuiseur variant entre 800 et 1000 W/m² et une température ambiante variant de 28 à 30 °C. Les résultats expérimentaux et ceux de la simulation numérique sont comparés et analysés.

Mots-clés : Eclairage solaire, cuiseur solaire boîte, Logiciel Comsol, simulation numérique, profils thermiques.

الملخص

من أجل دراسة الأداء الحراري للطباخ الشمسي المخصص لطهي الطعام ، أجرينا دراسة تجريبية وعددية لفحص تغيرات درجة الحرارة لنموذج للطباخ الشمسي النموذجي من إنتاج فريق Thermodynamics Mini Centrales (MCT) لوحدة البحث التطبيقي في الطاقات المتجددة (URAER ، غرداية). تأخذ المحاكاة العددية في الاعتبار الظروف الأولية ، وظروف الأرصاد الجوية وظروف الحدود. تم الحصول على قيم درجات حرارة الماء في الإناء وعلى لوحة الامتصاص بواسطة برنامج Comsol. أجريت الاختبارات التجريبية (الركود واختبارات التدفئة المعقولة) في ظل الظروف المناخية لمدينة غرداية (تقع على خط عرض 32.39 درجة، خط الطول 3.78 درجة وارتفاع 463 م على مستوى سطح البحر). تم إجراء الاختبارات خلال يوم صافٍ في أشهر الصيف تحت إشعاع شمسي عام تم استلامه على مستوى أفقي للطباخ يتراوح بين 800 و 1000 واط / متر مربع ودرجة الحرارة المحيطة تتراوح من 28 إلى 30 درجة مئوية. تتم مقارنة نتائج المحاكاة التجريبية والعددية وتحليلها.

كلمات مفتاحية : الإشعاع الشمسي ، طباخ الطاقة الشمسية علبية ، برنامج Comsol ، المحاكاة العددية ، التغيرات الحرارية.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Analyse spectrale du rayonnement solaire	05
Figure I.2	Instruments de mesure du rayonnement solaire	06
Figure I.3	Variation de l'équation du temps en fonction du jour	07
Figure I.4	Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour	09
Figure I.5	Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre	09
Figure I.6	Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour	10
Figure I.7	Variation de l'azimut solaire en fonction du temps	11
Figure I.8	Variation de la hauteur du soleil en fonction de l'azimut solaire	12
Figure I.9	Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil	13
Figure I.10	Composition du rayonnement solaire	15
Figure I.11	Eclairement solaire extraterrestre	16
Figure I.12	Variation du rayonnement solaire extraterrestre en fonction du jour	16
Figure I.13	Variations du rayonnement direct horizontal	17
Figure I.14	Variations du rayonnement diffus horizontal	17
Figure I.15	Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire	18
Figure I.16	Variations de l'éclairement direct incident sur un plan d'inclinaison β	19
Figure I.17	Variations de l'éclairement diffus incident sur un plan d'inclinaison β	21
Figure II.1	Barbara Kerr avec Sherry Cole qui est une des fondateurs de cuiseurs solaires	24
Figure II.2	Utilisation d'un modèle de cuiseurs solaires au Sénégal	24
Figure II.3	Héliodyne : premier four solaire mondial 1950 – CDER, Bouzaréah, Algérie	25
Figure II.4	Deux prototypes de cuiseurs solaires réalisés et testés à l'URER/MS – Adrar	26
Figure II.5	Deux prototypes de cuiseurs solaires réalisés et testés à l'URAER – Ghardaïa	26
Figure II.6	Schéma de principe d'effet de serre	28
Figure II.7	Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs	29
Figure II.8	Cuisson alimentaire en fonction des températures	31
Figure II.9	Classification des cuiseurs solaires sans et avec stockage thermique	33
Figure II.10	Cuiseurs solaires boîtes	34
Figure II.11	Cuiseurs à concentration	35
Figure II.12	Cuiseurs solaires du type indirect	36
Figure II.13	Stockage par chaleur sensible	36
Figure II.14	Stockage par chaleur latente en utilisant $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	37
Figure II.15	Cuiseurs solaires boîte fabriqué et testé par Nahar (a) et par Mohamed (b)	38
Figure II.16	Schéma du cuiseur boîte avec double exposition étudié par Amer	38
Figure II.17	Schéma du cuiseur boîte avec stockage testé par Buddhi et al	39

Figure II.18	Schéma du cuiseur solaire et unité de stockage de chaleur latente réalisé par Sharma	40
Figure II.19	Schéma du cuiseur Cylindro-parabolique testé par Ozturk	40
Figure III.1	Site de Ghardaïa en Algérie.	45
Figure III.2	Quelques réalisations expérimentales de l'équipe Mini Centrales Thermodynamiques (MCT).	46
Figure III.3	Transfert de chaleur par convection.	49
Figure III.4	Schéma représentant le mécanisme de transfert de chaleur vers l'alimentation.	50
Figure III.5	Logo du logiciel COMSOL Multiphysics 5.3.	51
Figure III.6	Type de géométrie à simuler.	52
Figure III.7	Fenêtre du navigateur de modèles : choix de la physique.	53
Figure III.8	Choix du régime d'étude.	53
Figure III.9	La constitution du modèle.	54
Figure III.10	Dessin de la géométrie.	55
Figure III.11	Vue en trois dimensions de la géométrie étudiée sous COMSOL.	55
Figure III.12	Choix des matériaux.	56
Figure III.13	Sélection de transfert thermique radiatif.	57
Figure III.14	Maillage de la structure.	57
Figure III.15	Répartition de la température de la géométrie étudiée sous COMSOL: (a) en deux dimensions (2D), (b) en trois dimensions (3D).	58
Figure III.16	Répartition de la température de la géométrie étudiée sous COMSOL en deux dimensions (2D) en fonction du temps.	59
Figure III.17	Evolution de température en fonction de l'éclairement solaire: (a) de l'eau dans le récipient, (b) de la plaque absorbante.	60
Figure III.18	Station radiométrique de l'URAER (Ghardaïa).	62
Figure III.19	Schéma de conception du cuiseur boîte et une vue prise lors du test à l'URAER.	63
Figure III.20	Illustration de l'effet du non-ajustement des cuiseurs boîtes : (a) ombrage exercé sur l'absorbeur ; (b) différentes positions par rapport au soleil.	64
Figure III.21	Schéma de la trajectoire des rayons solaires incidents sur le cuiseur dans cas d'une bonne orientation et d'une absence d'orientation (déviations des rayons).	64
Figure III.22	Schéma synoptique de l'installation des cuiseurs solaires.	65
Figure III.23	Visualisation des températures sur un micro-ordinateur connecté à une unité d'acquisition de donnée.	66
Figure III.24	Variations journalières de l'éclairement solaire et des profils des températures mesurées, sous des conditions de test de : (a) stagnation, (b) chaleur sensible, pour un jour d'été.	68

Figure III.25	Expérimentation de la puissance de cuisson du cuiseur solaire réalisé : (a) variations journalières de l'éclairement direct normal et des températures de l'eau mesurées ; (b) puissance de cuisson ajustée en fonction de la différence de température.	69
---------------	--	----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.01	Facteurs essentiels pour la cuisson solaire	29
Tableau II.02	Durée approximative de cuisson des aliments	31
Tableau III.01	Caractéristiques physiques des matériaux	54
Tableau III.02	Comparaison des résultats expérimentaux avec Comsol	70

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
λ	Longitude du lieu	[°]
φ	Latitude du lieu	[°]
TSV	Temps solaire vrai	[h]
TSM	Temps solaire moyen	[h]
t	Temps local	[h]
ET	Equation de temps	[h]
N'	Angle journalier	[°]
N	Numéro du jour	[-]
DE	Décalage horaire	[h]
δ	Déclinaison solaire	[°]
ω	Angle horaire	[°]
ID	Rayonnement diffus	[W/m ²]
IB	Rayonnement direct	[W/m ²]
IG	Rayonnement global	[W/m ²]
γ_s	Hauteur du soleil	[°]
χ_s	Azimut du soleil	[°]
θ_z	Angle zénithal	[°]
β	Inclinaison du plan	[°]
α	Orientation du plan	[°]
m_A	Masse d'air	[-]
Alt	Altitude du lieu	km
δ_R	Epaisseur totale optique de Rayleigh	[-]
T_L	Facteur de trouble total de Linke	[-]
T_0	Trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau	[-]
T_1	Trouble du à la diffusion moléculaire	[-]
T_2	Trouble relatif à la diffusion par les aérosols	[-]
G	Densité de flux d'énergie émise par une surface idéale	[W/m ²]
P	Puissance de cuisson	W
A_{he}	Alternance hiver été	[-]
G_0	Eclairement solaire extraterrestre	[W/m ²]
ε	Correction de distance terre soleil	[-]
I_0	Constante solaire	[W/m ²]
IB^h	Eclairement direct incident sur un plan horizontal par Capderou	[W/m ²]
T'_L	Facteur de trouble diffusif	[-]
α_z	Azimut de la normal du plan	[W/m ²]

IG_h	Eclairement global incident sur un plan horizontal par Capderou	$[W/m^2]$
IN	Eclairement direct normal incident sur un plan horizontal	$[W/m^2]$
δ_h	Composante du cercle de l'horizon donnée par Capderou	$[-]$
δ_a	Composante due à l'albédo donnée par Capderou	$[-]$
ρ	Albédo du sol	$[-]$
δ_d	Composante directe donnée par Capderou	$[-]$
δ_i	Composante isotrope du ciel donnée par Capderou	$[-]$
δ_r	Composante due à la rétrodiffusion donnée par Capderou	$[-]$
ID_a^i	Composante du diffus isotrope du sol donnée par Capderou	$[W/m^2]$
ID_i^i	Composante du diffus isotrope du ciel donnée par Capderou	$[W/m^2]$
ID^h	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	$[W/m^2]$
ID_d^i	Composante diffus directionnel donnée par Capderou	$[W/m^2]$
ID_h^i	Composante du diffus du cercle de l'horizon donnée par Capderou	$[W/m^2]$
ID_{ciel}^i	Composante du diffus du ciel donnée par Capderou	$[W/m^2]$
ID^i	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque par Capderou	$[W/m^2]$
IG_i	Eclairement global incident sur un plan quelconque par Capderou	$[W/m^2]$
IB^i	Eclairement direct incident sur un plan quelconque par Capderou	$[W/m^2]$

TABLE DES MATIERES
RESUME**LISTE DES FIGURES****LISTE DES TABLEAUX****NOMENCLATURE****INTRODUCTION GENERALE****01**

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

I.1.	Introduction	03
I.2.	Applications à énergies renouvelables	03
I.2.1.	Energie solaire photovoltaïque	03
I.2.2.	Energie solaire thermique	04
I.3.	Modélisation des paramètres géométriques et atmosphériques	04
I.3.1.	Rayonnement solaire	04
I.3.2.	Instruments de mesure du rayonnement solaire	05
I.3.2.1.	Mesure du rayonnement solaire direct	05
I.3.2.2.	Mesure du rayonnement solaire global et diffus	05
I.3.3.	Estimation des paramètres horaire	06
I.3.3.1.	Temps solaire	06
I.3.3.2.	Angle horaire	08
I.3.3.3.	Déclinaison solaire	08
I.3.4.	Estimation des paramètres géométriques	09
I.3.4.1.	Hauteur du soleil	10
I.3.4.2.	Azimut du soleil	10
I.3.5.	Estimation des paramètres atmosphériques	12
I.3.5.1.	Masse atmosphérique	12
I.3.5.2.	Epaisseur optique de l'atmosphère (Epaisseur de Rayleigh)	13
I.3.5.3.	Facteur de trouble atmosphérique de Linke	14
I.4.	Estimation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal par ciel clair	14
I.4.1.	Eclairement hors atmosphère	15
I.4.2.	Eclairement incident sur un plan horizontal	16
I.4.2.1.	Eclairement global incident sur un plan horizontal	16
I.4.2.2.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	16
I.4.2.3.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	17
I.5.	Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque par ciel clair	17
I.5.1.	Angle d'incidence	18
I.5.2.	Eclairement incident sur un plan quelconque	19
I.5.2.1.	Eclairement direct incident sur le plan	19
I.5.2.2.	Eclairement diffus incident sur le plan	19

I.6.	Conclusion	21
-------------	-------------------	-----------

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES A CUISSON SOLAIRES

II.1.	Introduction	23
II.2.	Historique de la cuisson solaire	23
II.3.	Principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire	27
II.3.1.	Principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire boîte	27
II.3.2.	Températures et temps de cuisson	28
II.4.	Classification des cuiseurs solaires	32
II.4.1.	Cuiseurs solaires sans stockage de chaleur	33
II.4.1.1.	Cuiseurs solaires type direct boîte	34
II.4.1.2.	Cuiseurs solaires type à concentration	35
II.4.1.3.	Cuiseurs solaires type indirect	35
II.4.2.	Cuiseurs solaires avec stockage de chaleur	36
II.4.2.1.	Stockage avec chaleur sensible	36
II.4.2.2.	Stockage par chaleur latente	37
II.5.	Etat de l'art des cuiseurs solaires	37
II.5.1.	Cuiseurs solaires dans le monde	37
II.5.1.1.	Cuiseurs solaires du type boîte	37
II.5.1.2.	Cuiseurs solaires du type boîte à double exposition	38
II.5.1.3.	Cuiseurs solaires du type boîte avec stockage de chaleur	38
II.5.1.4.	Cuiseurs solaires du type boîte indirect avec capteurs sous vide	39
II.5.1.5.	Cuiseurs solaires du type concentrateur	40
II.6.	Avantages et les inconvénients des cuiseurs solaires	41
II.6.1.	Avantages des cuiseurs solaires	41
II.6.1.1.	Cuiseurs solaires permettent de gagner du temps et de l'argent	41
II.6.1.2.	Cuiseurs solaires sont sûrs, pratiques et sains	41
II.6.1.3.	Cuiseurs solaires sont faciles d'emploi	41
II.6.1.4.	Cuisson solaire permet de sauver des vies dans les régions pauvres en énergie mais riches en soleil	42
II.6.1.5.	Cuisson solaire aide à préserver les forêts et les richesses de la terre	42
II.6.1.6.	Cuiseurs solaires aident à améliorer la qualité de l'air	42
II.6.2.	Inconvénients des cuiseurs solaires	43
II.7.	Conclusion	43

CHAPITRE 3 : ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1.	Introduction	44
III.2.	Présentation du lieu de stage	44
III.2.1.	Site de Ghardaïa	44
III.2.2.	Aperçu sur l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER)	45
III.2.3.	Equipe Mini Centrales Thermodynamiques	46

III.3.	Simulation numériques de cuiseur boîte à l'aide du logiciel COMSOL	47
III.3.1.	Paramètres et caractéristiques de fonctionnement du cuiseur solaire	47
III.3.1.1.	Paramètres externes	47
III.3.1.2.	Paramètres internes	47
III.3.2.	Les différentes modes de transfert de chaleur	47
III.3.2.1.	Transfert thermique par conduction	48
III.3.2.2.	Transfert thermique par convection	48
III.3.2.3.	Transfert par rayonnement	49
III.3.2.4.	Mécanisme de transfert de chaleur vers l'alimentation à cuire	50
III.3.3.	Simulation numériques du cuiseur	50
III.3.3.1.	Présentation de la plateforme de travail : COMSOL Multiphysics	51
III.3.3.2.	Méthodologie de conception et modélisation sous COMSOL	51
III.3.3.3.	Résultats obtenus après simulation	58
III.3.3.4.	Autres résultats obtenus de la simulation	59
III.4.	Evaluation des performances énergétiques du cuiseur boîte	60
III.4.1.	Méthodologies adoptées	60
III.4.1.1.	Méthode de tests suggérée par Mullick et al.	60
III.4.1.2.	Méthode de tests suggérée par Funk	61
III.4.2.	Matériel et expérimentation	62
III.4.2.1.	Données utilisées	62
III.4.2.2.	Description du cuiseur solaire boîte	63
III.4.2.3.	Ajustement du cuiseur	63
III.4.2.4.	Schéma synoptique de la chaîne de mesure	65
III.4.2.5.	Acquisition de données	66
III.5.	Résultats expérimentaux	66
III.5.1.	Description des tests effectués	66
III.5.2.	Graphes caractérisant les paramètres F1 et F2	67
III.5.3.	Graphes de la puissance de cuisson	68
III.6.	Comparaison des résultats expérimentaux avec Comsol	69
III.7.	Conclusion	70
CONCLUSION GENERALE		71
BIBLIOGRAPHIE		

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'épuisement des ressources énergétiques fossiles est inévitable compte tenu de la forte consommation mondiale d'énergie. D'où la nécessité de trouver de nouvelles sources d'énergie. Les principales sources d'énergie renouvelable sont le soleil, le vent, la biomasse, les marées, les vagues marines et océaniques et la chaleur des profondeurs de la terre.

L'énergie solaire est en tête de liste des sources en raison de son abondance, mais aussi en raison de sa distribution dans la nature plus que tout autre type d'énergie renouvelable. La terre reçoit de l'énergie du soleil équivalente à 5000 fois les besoins mondiaux, c'est donc un fort potentiel et une solution pratique aux défis toujours croissants dans le domaine énergétique et environnemental. Il s'agit d'un objectif principal, urgent et commun à toute l'humanité afin de préserver un environnement sacré pour les générations futures [1].

L'Algérie dispose d'un grand champ solaire où toutes les applications solaires peuvent être développées. L'une des applications les plus attrayantes est la cuisson solaire. Cette application est une solution pour limiter la déforestation et la mauvaise utilisation des combustibles fossiles, dont les émissions de gaz à effet de serre peuvent compromettre l'avenir de l'humanité. En effet, pour les citoyens qui vivent dans plusieurs régions isolées de notre territoire, la cuisson des aliments est très coûteuse, lorsque les sources d'énergie conventionnelles sont utilisées et a des conséquences désastreuses sur l'écosystème en exploitant le bois des quelques arbustes qui restent dans ces régions [2].

Les cuiseurs solaires sont les plus populaires au monde. En effet, elle est liée à une activité humaine fréquente et très régulière ; c'est la préparation d'une alimentation saine. Dans les régions isolées du Sahara où l'approvisionnement en gaz butane est très difficile, l'homme est contraint de compter sur l'exploitation du bois des quelques arbustes restants tels que les acacias et les palmiers pour cuire sa nourriture. L'utilisation de la cuisine solaire apparaît comme une alternative intéressante pour répondre à ce besoin vital sans compromettre la biodiversité végétale saharienne et en limitant les émissions de gaz à effet de serre [3].

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

permet, pour une surface de capteur donnée, de réduire la surface de réception effective et donc de minimiser l'influence des pertes de chaleur du récepteur. Ainsi, la température atteinte après la conversion en chaleur est plus élevée que pour les appareils avec capteurs sans concentration. Les principaux dispositifs optiques qui concentrent l'énergie solaire utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) [4].

De nombreuses études ont été réalisées sur le rayonnement solaire reçu au sol afin de développer des techniques de conversion et de minimiser le coût des équipements pour une utilisation optimale. Le développement des applications de l'énergie solaire nécessite des données à long terme sur l'irradiation solaire. La disponibilité et la qualité de ces données sont obtenues dans les régions dotées de stations radiométriques, qui mesurent les paramètres météorologiques, le temps d'exposition et le rayonnement solaire. Rayonnement solaire global direct et diffus, mesuré principalement dans un plan horizontal [1].

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire concerne la simulation et le test d'un cuiseur solaire de type boîte à surface réceptrice inclinée réalisé à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables, de Ghardaïa, Algérie. Le mémoire est présenté selon le plan suivant :

Le premier chapitre est consacré au gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire, et comprend les caractères du soleil qui affectée la terre et leurs influence sur la production de l'énergie solaire.

- Le deuxième chapitre présente l'état de l'art sur les systèmes à cuisson solaire ; une étude concernant des généralités sur les cuiseurs solaires et les différents types, suivi d'un bref historique et l'évolution le cuiseur solaire.

- Le troisième chapitre présente une étude théorique et expérimentale du cuiseur, l'évaluation des performances thermique à partir de la simulation par logiciel Comsol et des tests expérimentaux effectués sous les conditions climatiques de Ghardaïa.

Finalement une conclusion générale contenant les interprétations et les perspectives envisagées terminera ce mémoire.

CHAPITRE I

Gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire

I.1. Introduction

L'énergie solaire qui est l'objectif de notre étude, se caractérise par une absence de pollution et une disponibilité exceptionnelle. D'autre part, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie demandent une légère maintenance et présentent une bonne fiabilité de fonctionnement, une autonomie de plus en plus accrue, une résistance extrême aux conditions naturelles (température, humidité, vent, corrosion,...etc.), et donc une grande longévité, il apparaît dès lors que l'énergie solaire peut apporter de réelles solutions.

L'éclairement solaire arrivant à la surface de la terre n'est pas complètement celui émis par le soleil, à cause des différents phénomènes d'absorption, de diffusion et de filtrage au niveau des différentes couches atmosphériques, Ainsi, l'éclairement solaire varie à la fois périodiquement au rythme des saisons et aléatoirement causé par les troubles atmosphériques. L'évaluation à long terme des performances des systèmes de conversion de l'énergie solaire s'établit par l'intermédiaire de programmes de simulation numérique. Les équations présentées dans ce premier chapitre ; pour l'estimation des composantes directes et diffuse de l'éclairement solaire, ont été programmées sous environnement Matlab, les graphes illustrés sont issus de la programmation par Matlab du modèle Capderou.

I.2. Applications à énergies renouvelables

Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables : son rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie utilisable (directement ou indirectement).

Les différents types des énergies renouvelables sont notamment :

I.2.1.Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque se compose généralement de plusieurs panneaux qui forment un générateur photovoltaïque.

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques [1]:

- les modules solaires monocristallins

- les modules solaires polycristallins
- les modules solaires amorphes

I.2.2. Energie solaire thermique

Le rayonnement solaire augmente la température d'un corps en entrant en contact avec ce dernier, c'est le principe de l'énergie solaire thermique. Cette source d'énergie est utilisée par exemple, pour chauffer ou sécher des objets en les exposant au soleil. L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement [1]:

- Directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (cuisseurs solaires).
- Indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi, obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique : les centrales à tour, les systèmes à réflecteur parabolique, le système à réflecteur cylindro-parabolique, les systèmes à miroirs de Fresnel).

I.3. Modélisation des paramètres géométriques et atmosphériques

I.3.1. 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 I.1représente la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

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

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 kW/m^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 [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.

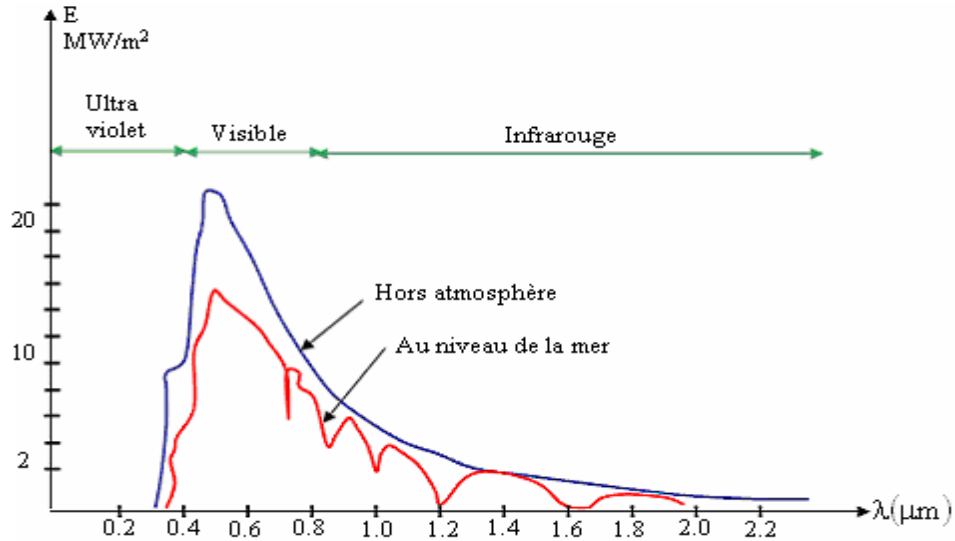


Figure I.1: Analyse spectrale du rayonnement solaire.

I.3.2. Instruments de mesure du rayonnement solaire

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

I.3.2.1. Mesure du rayonnement solaire direct

Au sol, la mesure du rayonnement solaire direct est faite à l'aide d'un pyrhéliomètre [2] (Fig I.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.

I.3.2.2. Mesure du rayonnement solaire global et diffus

La mesure du rayonnement solaire global est faite à l'aide d'un pyranomètre [2] (Fig I.2.b), cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie. Le domaine

spectral couvert s'étend de 0.3 à 3 μm . Le rayonnement reçu est converti en chaleur par la surface noircie. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global ; elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série.

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.



Figure I.2: Instruments de mesure du rayonnement solaire.(a):Pyrhéliomètre (mesure du rayonnement direct normal),(b): Pyranomètre (mesure du rayonnement global et diffus).
(Photo de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – URAER, Ghardaïa)

I.3.3. Estimation des paramètres horaire

I.3.3.1. Temps solaire

- **Temps solaire moyen**

La rotation de la terre autour de l'axe des pôles introduit la notion de temps solaire moyen *TSM*. La journée solaire moyenne est le temps qui sépare, en moyenne, deux passages successifs du soleil au méridien d'un lieu, la journée solaire moyenne a une durée de: 1 jour = 24h 00m 00s.

• **Temps solaire Vrai**

En astronomie on appelle temps solaire vrai *TSV* en un lieu et à un instant donné, l'angle horaire du soleil en ce lieu et à cet instant. C'est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la terre et son mouvement de translation. Son introduction est naturelle, car il est lié à l'alternance des jours et de nuits. La variation de la durée du jour solaire vrai (intervalle séparant deux midi consécutifs) est comprise entre : 23h 59m 39s et 24h 00m 30s.

• **Equation du temps**

La vitesse de la terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année, la somme des inégalités du temps solaire vrai *TSV* porte le nom de équation de temps *ET* avec: $ET=TSV-TSM$. L'écart entre *TSV* et *TSM* varie selon la date, mais est nul en moyen. L'équation du temps est donnée en fonction du jour de l'année *N* avec une bonne précision par la formule suivante [3] :

$$ET = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot N') - 7.53 \cdot \cos(N') - 1.5 \cdot \sin(N') \tag{I.1}$$

Avec : $N' = \frac{360}{365} \cdot (N - 81)$ (I.2)

L'équation du temps peut atteindre 16 minutes (fin Octobre, début Novembre), la variation de l'équation du temps en fonction du jour de l'année est donnée sur la figure I.3 :

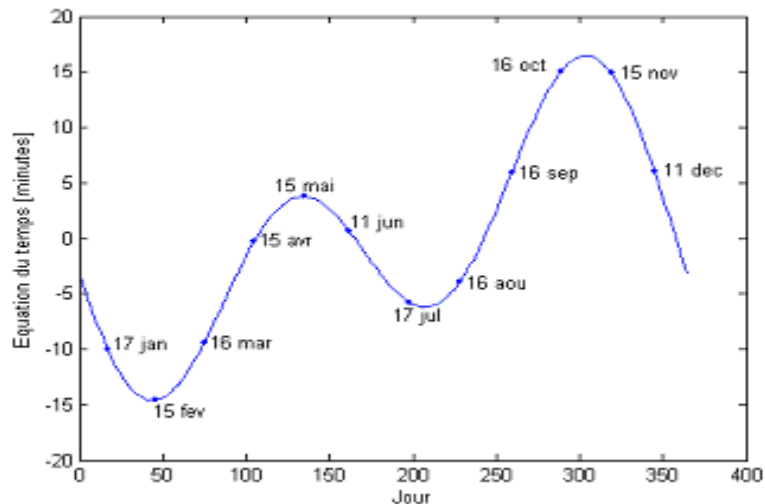


Figure I.3: Variation de l'équation du temps en fonction du jour.

I.3.3.2. 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 [04], 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 24h. ω sera compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir [5]. L'angle horaire est donné par l'équation suivante :

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (I.3)$$

Pour calculer l'angle horaire Capderou; dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, a utilisé la formule suivante :

$$\omega = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (I.4)$$

Le temps solaire vrai TSV est donné par l'équation (I.05), avec DE est le décalage horaire, il est égale à 1 pour l'Algérie.

$$TSV = t - DE + (ET + 4 \cdot \lambda) / 60 \quad (I.5)$$

I.3.3.3. Déclinaison solaire

La déclinaison du soleil δ est l'angle de la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre [6], la déclinaison varie de $-23^\circ 27'$ au solstice d'hiver à $+23^\circ 27'$ au solstice d'été, elle est nulle aux équinoxes [5]. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante :

$$\sin(\delta) = 0.3978 \cdot \sin\left[N_p - 1.4 + 0.0355 \cdot \sin(N_p - 0.0489)\right] \quad (I.6)$$

Avec : $N_p = 2 \cdot \pi \cdot N / 365.25 \quad (I.7)$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule (I.08) pour calculer la déclinaison qui donnerait le même résultat que l'équation précédente :

$$\sin(\delta) = 0.398 \cdot \sin\left\{\frac{360}{365} \cdot (N - 82) + 2 \cdot \sin\left[\frac{360}{365} \cdot (N - 2)\right]\right\} \quad (I.8)$$

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 (I.4) :

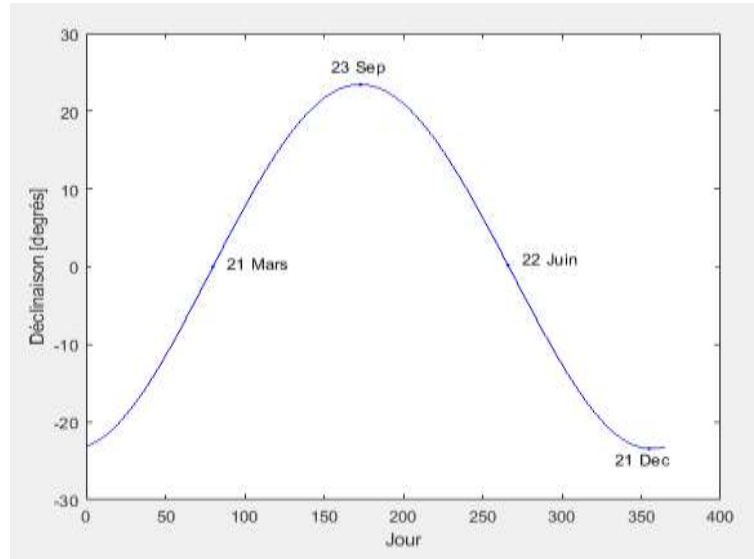


Figure I.4: Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.

I.3.4. Estimation des paramètres géométriques

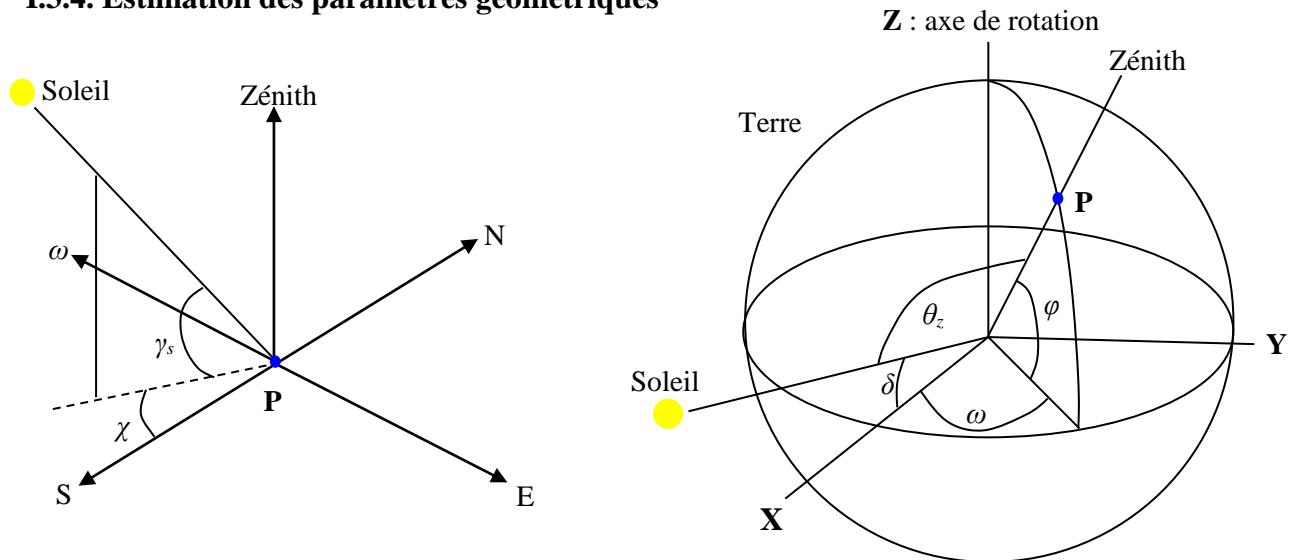


Figure I.5: Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil).

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 (FigI.5), 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 χ) [7]. Le complément de γ_s ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelée angle zénithal θ_z .

I.3.4.1. 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[8], qui à été également adopter par Capderou:

$$\sin(\gamma_s) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (I.9)$$

La figure I.6 représente la variation de la hauteur γ_s à midi sur le site de Ghardaïa durant une année.

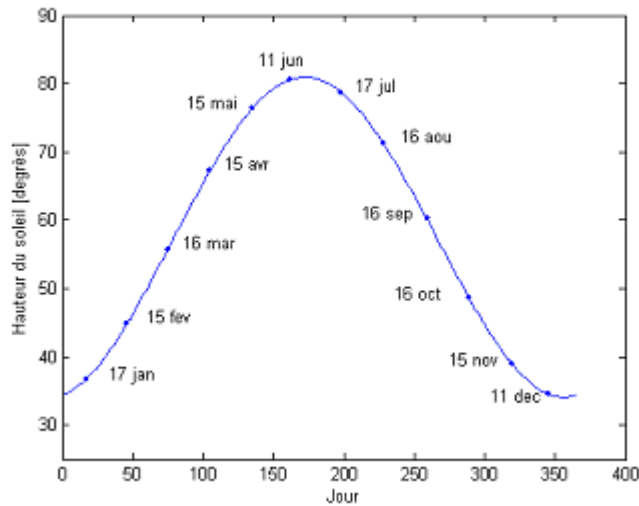


Figure I.6: Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.

I.3.4.2. Azimut du soleil

L'azimut du soleil χ est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut est compté positivement vers l'Ouest $\chi>0$ et négativement vers l'Est $\chi<0$, à midi $\chi=0$. L'azimut est compris entre $-180^\circ \leq \chi \leq 180^\circ$ [5]. 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 :

$$\cos(\chi) = \frac{\sin(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\delta)}{\left\{ [\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)]^2 + [\sin(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\delta)]^2 \right\}^{0.5}} \quad (\text{I.10})$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule (I.15) pour calculer l'azimut du soleil qui donnerait le même résultat que l'équation (I.14).

$$\cos(\chi) = \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi)}{\cos(\gamma_s)} \quad (\text{I.11})$$

La variation de l'azimut du soleil en fonction du temps pour les mois d'Avril, Juillet et Décembre sur le site de Ghardaïa est représentée sur la figure I.7. Sur la figure I.8 on représente la variation de la hauteur du soleil en fonction de l'azimut solaire :

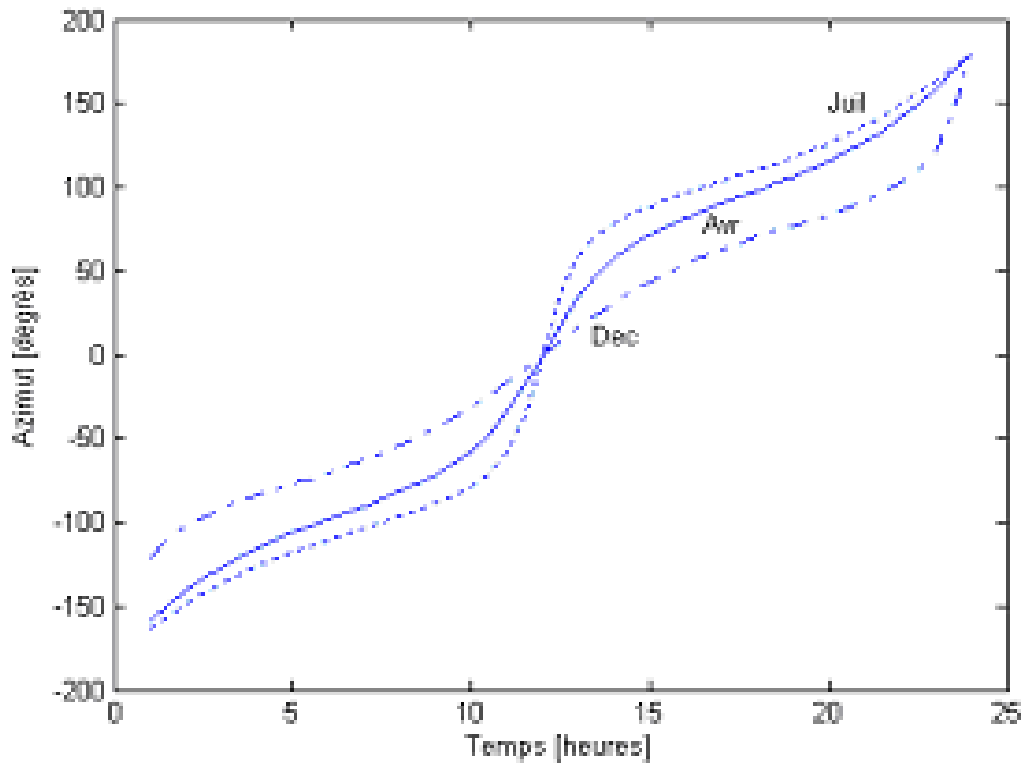


Figure I.7: Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.

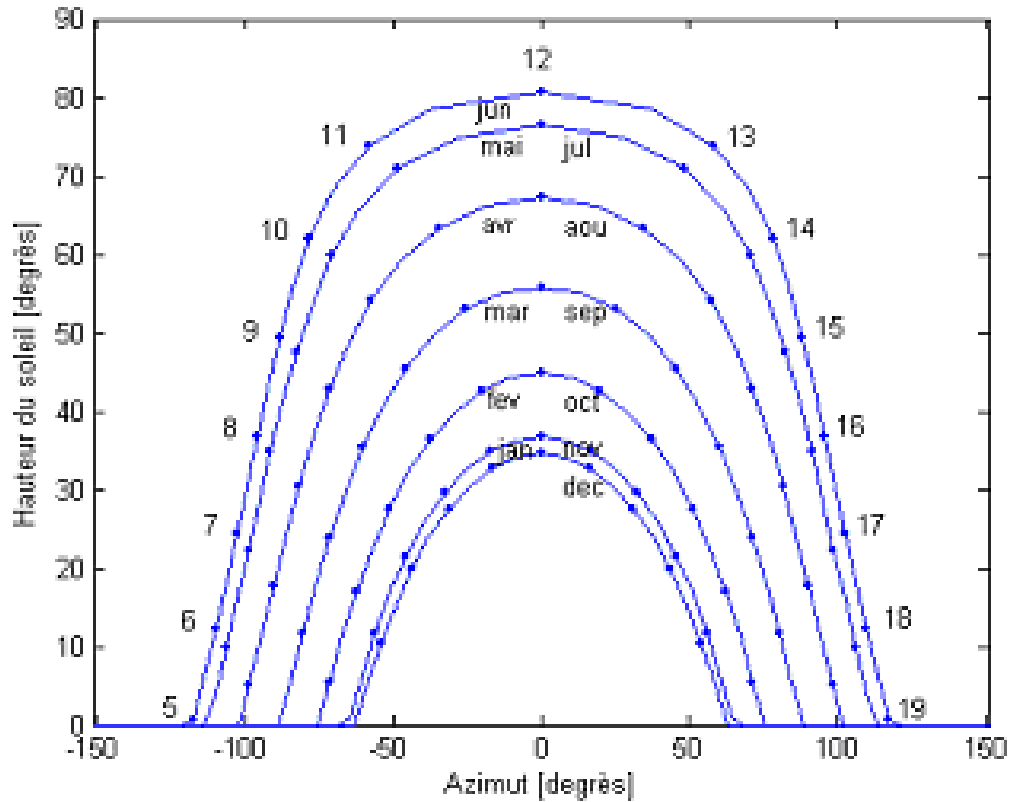


Figure I.8: Variation de la hauteur du soleil en fonction de l'azimut solaire.

I.3.5. Estimation des paramètres atmosphériques

I.3.5.1. Masse atmosphérique

On appelle masse d'air m_A la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer [7]. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. La masse atmosphérique relative est donnée par la relation, très simple :

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma_s)} \quad (I.12)$$

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

$$m_A = \frac{I}{\sin(\gamma_s) + 9.40 \cdot 10^{-4} \cdot [\sin(\gamma_s) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (\text{I.13})$$

La figure I.9 représente la variation de la masse d'air atmosphérique en fonction de la hauteur du soleil, formule de Capderou (EqI.17).

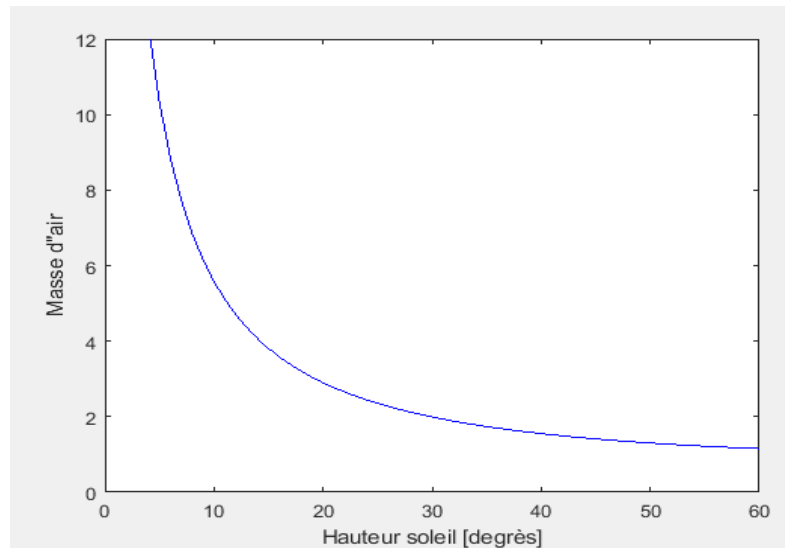


Figure I.9: Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil.

I.3.5.2. Epaisseur optique de l'atmosphère (Epaisseur de Rayleigh)

En 1922 Linke [9] 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 [10] utilisa les données spectrales publiées par Feussner et Dubois en 1930 [11] et proposa la formule (1.14) pour δ_R ; connue sous le nom: formule pyrhéliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte.

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \cdot m_A) \quad (\text{I.14})$$

Dans cette formule utilisé depuis fort longtemps l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que: CO_2 , O_2 , NO_2 et le CO n'est prise en compte. Capderou dans l'Atlas Solaire utilisa la formule pyrhéliométrique de Kasten pour calculer le rayonnement direct incident sur un

plan par ciel clair. En 1986 Louche [12] ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4^{ème} ordre de la masse d'air.

$$(\delta_R)^{-1} = 6.5567 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (I.15)$$

I.3.5.3. Facteur de trouble atmosphérique de Linke

En 1987 Capderou [3]; dans l'Atlas Solaire (A.S.A.), proposa un modèle pour calculer le facteur de Linke en Algérie par ciel clair. Le coefficient de trouble atmosphérique total a été décomposé en trois facteurs de trouble auxiliaires : le trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau T_0 , le trouble du à la diffusion moléculaire de Rayleigh T_1 et le trouble relatif à la diffusion par les aérosols T_2 avec:

$$T_0 = (2,4 - 0,9 \cdot \sin \varphi) + 0,1 \cdot (2 + \sin \varphi) - (0,2 \cdot z) - (1,22 + 0,14 \cdot A_{he}) \cdot (1 - \sin \gamma_s) \quad (I.16)$$

$$T_1 = (0,89)^z \quad (I.17)$$

$$T_2 = [0,9 + (0,4 \cdot A_{he})] \cdot (0,63)^z \quad (I.18)$$

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

$$A_{he} = \sin \left(\frac{360}{365} \cdot (N - 121) \right) \quad (I.19)$$

I.4. Estimation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal par ciel clair

Le rayonnement solaire provenant au sol peut se décomposer donc en deux parties (Fig I.10) :

- Le rayonnement direct provenant directement du soleil.
- Le rayonnement diffus, diffusé par les molécules, les poussières, les aérosols

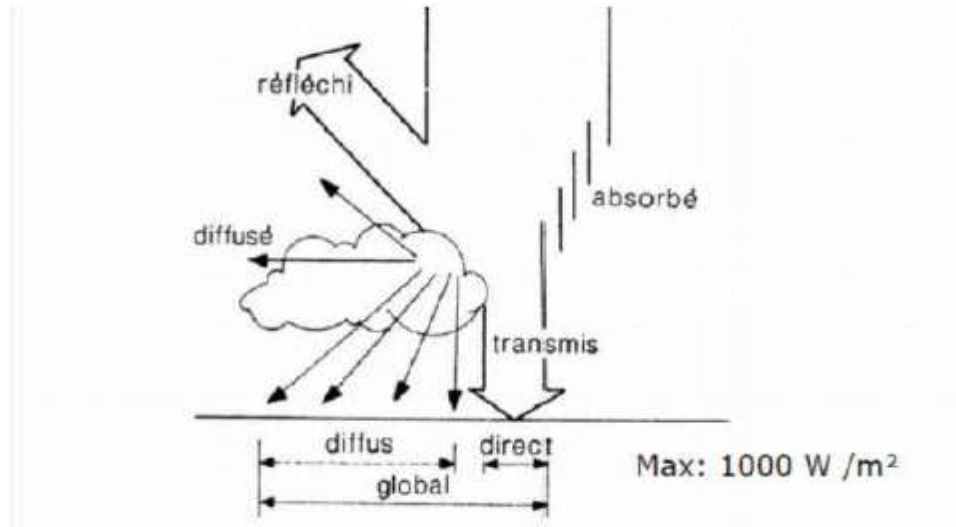


Figure I.10:Composition du rayonnement solaire

I.4.1. Eclairement hors atmosphère

En dehors de l'atmosphère l'éclairement solaire est d'intensité $I_o=1367 \text{ W/m}^2$. 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 (FigI.11).

L'éclairement solaire extraterrestre [13]; en fonction de la constante solaire et de la correction de distance entre la terre et le soleil, est donné par l'équation I.20 et sa variation en fonction du Jour de l'année est illustrée sur la figure I.12.

$$G_o = I_o \cdot \varepsilon \quad (\text{I.20})$$

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

$$\varepsilon = 1 + 0.03344 \cdot \text{Cos}(N_p - 0.048869) \quad (\text{I.21})$$

La correction de distance terre soleil est donnée par M.Capderou par l'équation (I.22) :

$$\varepsilon = 1 + 0.034 \cdot \text{Cos}\left[\frac{360}{365} \cdot (N - 2)\right] \quad (\text{I.22})$$

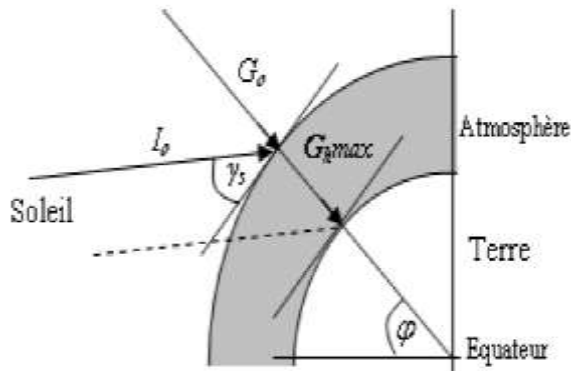


Figure I.11: Eclairement solaire extraterrestre

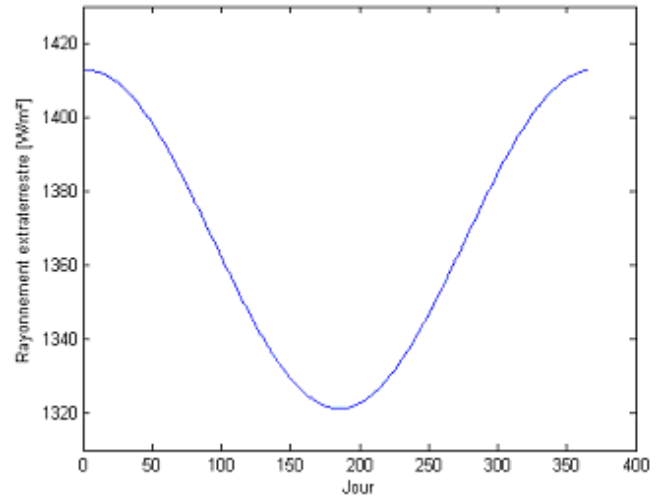


Figure I.12: Variation du rayonnement solaire extraterrestre en fonction du jour.

I.4.2. Eclairement incident sur un plan horizontal

I.4.2.1. Eclairement global incident sur un plan horizontal

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A) [3], Capderou; selon le préface de Chr. PERRIN de BRICHAMBAUT, donna un modèle mathématique pour calculer le rayonnement incident direct et diffus incident sur un plan horizontal, il reste le modèle le plus utilisé en Algérie. Selon ce modèle le rayonnement global modélisé par Capderou est la somme du rayonnement direct et diffus :

I.4.2.2. Eclairement direct incident sur un plan horizontal

Pour le rayonnement direct, Capderou utilisa la formule (I.13) pour la masse d'air m_A et la formule (I.15) pour l'épaisseur totale de l'atmosphère δ_R et donna l'équation (I.23) qui permet de calculer le rayonnement direct incident sur un plan horizontal $IB^h(\gamma_s, T_L)$ fonction de la hauteur du soleil γ_s , et du facteur de trouble total de Linke T_L :

$$IB^h(\gamma_s, T_L) = G_0 \cdot \sin(\gamma_s) \cdot \exp\left(\frac{-T_L}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} \cdot \sin(\gamma_s)}\right) \quad (I.23)$$

Les variations au niveau de la mer du rayonnement direct en fonction du temps (hauteur du soleil) pour un lieu de latitude 30° et pour différentes valeurs du facteur de trouble sont représentées sur la figure I.12.

I.4.2.3. Eclairement diffus incident sur un plan horizontal

Pour calculer le rayonnement diffus [3], Capderou utilisa le facteur de trouble diffusif T'_L et donna; en 1987, une équation I.28 en fonction de la hauteur du soleil γ_s :

$$ID^h(\gamma_s, T'_L) = G_o \cdot \exp \left\{ -1 + 1.06 \cdot \log[\text{Sin}(\gamma_s)] + a - \sqrt{b^2 + a^2} \right\} \quad (I.24)$$

Avec : $a = 1.1$ (I.25)

$$b = \log(T'_L) - 2.80 + 1.02 \cdot [1 - \text{Sin}(\gamma_s)]^2 \quad (I.26)$$

Les variations au niveau de la mer du rayonnement diffus en fonction du temps (hauteur du soleil) pour un lieu de latitude 30° et pour différentes valeurs du facteur de trouble sont représentées sur la figure (I.13).

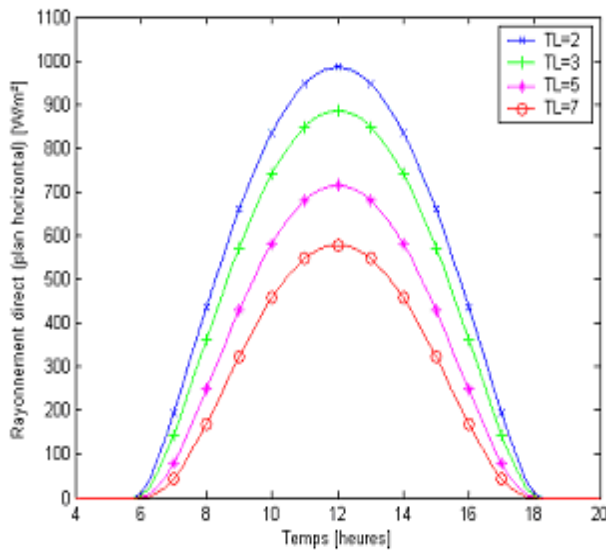


Figure I.13: Variations du rayonnement direct horizontal

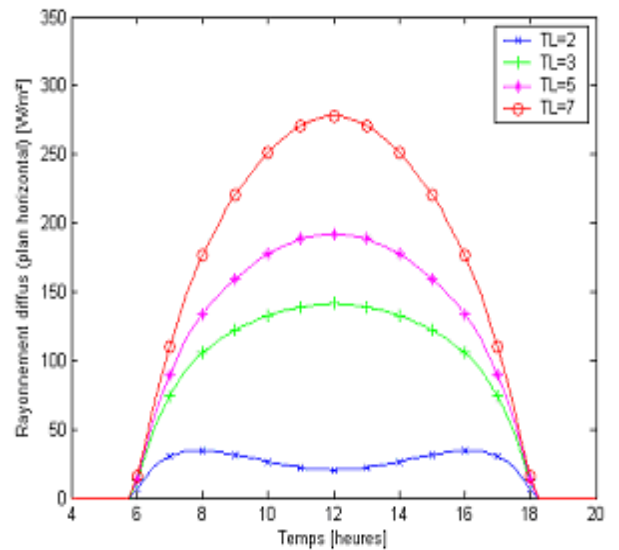


Figure I.14: Variations du rayonnement diffus horizontal

I.5. Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque par ciel clair

I.5.1. Angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle que fait les rayons du soleil avec la normale du plan considéré, elle est définie par l'inclinaison du plan β et l'Azimut de la normale du plan α_z (Orientation du plan), α_z est compté dans le sens rétrograde ($\alpha_z < 0$ vers l'Est, $\alpha_z > 0$ vers l'Ouest).

M. Capderou[3] utilise la hauteur de la normale du plan γ pour calculer $\text{Cos}(\delta^i)$ de l'angle d'incidence, γ est positive pour les plans tournés vers le haut et négative pour les plans tournés vers le bas, donc c'est les angles α_z et γ qui déterminent la position du plan. L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donné par Capderou par les formules suivantes :

$$\text{Cos}(\delta^i) = a' \cdot \text{Sin}(\omega) + b' \cdot \text{Cos}(\omega) + c' \quad (\text{I.27})$$

$$\text{Avec : } a' = \text{Cos}(\delta) \cdot [\text{Sin}(\alpha_z) \cdot \text{Cos}(\gamma)] \quad (\text{I.28})$$

$$b' = \text{Cos}(\delta) \cdot [\text{Cos}(\alpha_z) \cdot \text{Cos}(\gamma) \cdot \text{Sin}(\varphi) + \text{Sin}(\gamma) \cdot \text{Cos}(\varphi)] \quad (\text{I.29})$$

$$c' = \text{Sin}(\delta) \cdot [-\text{Cos}(\alpha_z) \cdot \text{Cos}(\gamma) \cdot \text{Cos}(\varphi) + \text{Sin}(\gamma) \cdot \text{Sin}(\varphi)] \quad (\text{I.30})$$

Les variations de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire pour une déclinaison de 20° en un lieu de latitude 30° , pour différentes valeurs de hauteur du plan γ (Modèle Capderou) sont représentées sur la figure I.14 :

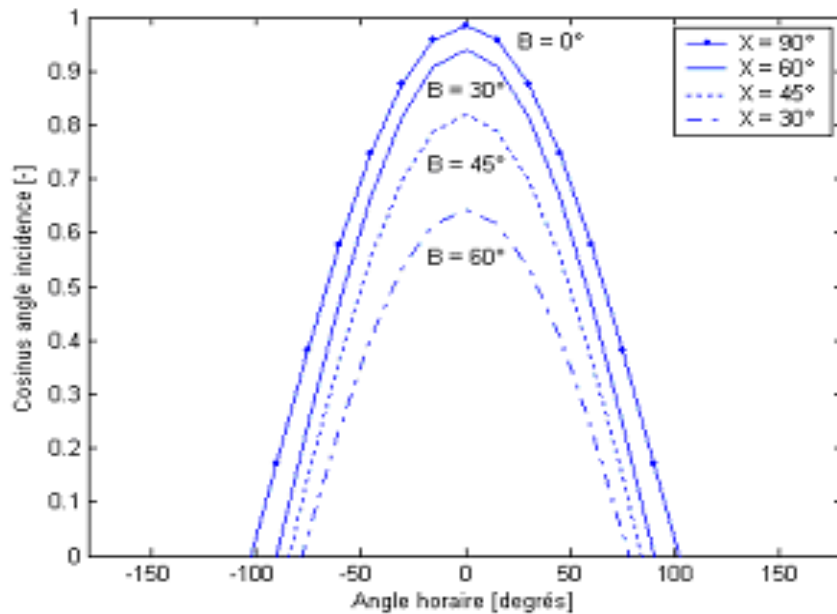


Figure I.15: Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.

I.5.2. Eclairement incident sur un plan quelconque

M. Capderou dans l'ASA [3], proposa un modèle pour calculer le rayonnement solaire incident sur un plan (α_s, γ) , le rayonnement global est la somme des deux composantes directe et diffuse.

I.5.2.1. Eclairement direct incident sur le plan

Capderou utilisa l'angle d'incidence donnée par l'équation I.31 pour calculer le rayonnement direct à l'aide de l'équation suivante :

$$IB^i(\gamma_s, T_L) = IN(\gamma_s, T_L) \cdot \text{Cos}(\delta') \quad (\text{I.31})$$

Les variations du rayonnement direct incident sur un plan d'inclinaison β (30 et 60°) pour un lieu de latitude 30° ($N = 91$) en fonction du temps pour différentes valeurs du facteur de trouble sont représentées sur la figure I.15 :

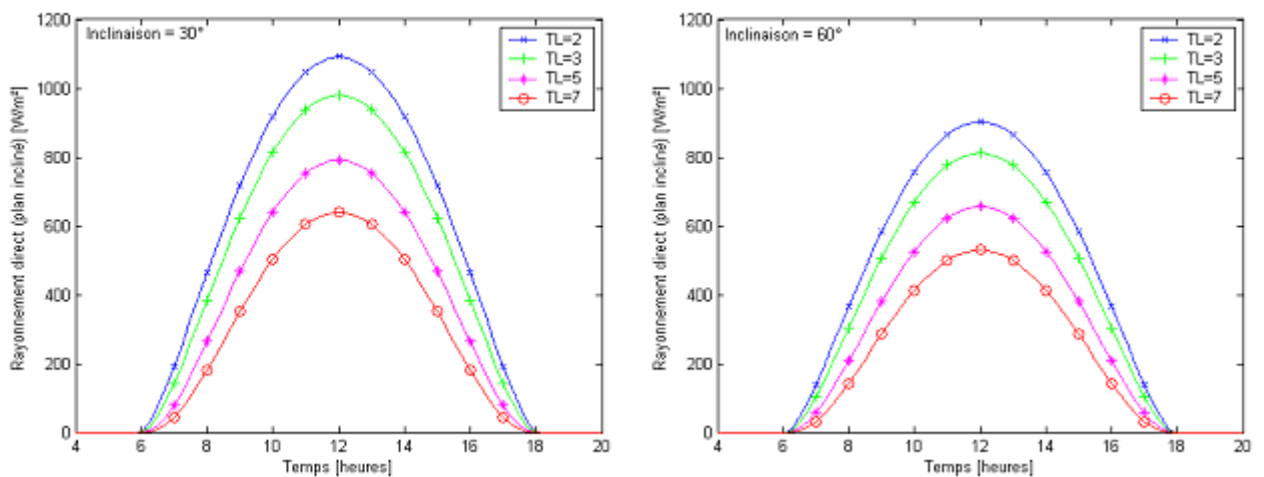


Figure I.16: Variations de l'éclairement direct incident sur un plan d'inclinaison β

I.5.2.2. Eclairement diffus incident sur le plan

L'éclairement diffus est lui-même décomposé en deux parties: l'éclairement diffus provenant du ciel et l'éclairement diffus provenant du sol :

- **Composante diffuse du sol**

La composante du diffus isotrope du sol est donnée par l'équation I.36 en fonction de δ_a qui est la composante due à l'albédo:

$$ID_a^i(\gamma_s, T_L) = \delta_a \cdot \frac{1 - \sin(\chi)}{2} \quad (I.32)$$

$$\text{Avec : } \delta_a = \rho_g \cdot IB^h(\gamma_s, T_L) \quad (I.33)$$

• **Composante diffuse du ciel**

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

Le diffus isotrope du ciel est donné par la formule suivante :

$$ID_i^i(\gamma_s, T_L) = (\delta_i + \delta_{i'}) \cdot \frac{1 + \sin(\chi)}{2} \quad (I.34)$$

$$\text{Avec : } \delta_i = ID^h(\gamma_s, T_L) - \delta_a \cdot \sin(\gamma_s) \quad (I.35)$$

δ_i est la composante isotrope, elle correspond à un ciel de luminance uniforme.

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

$$\text{Avec : } \delta_{i'} = 0.9 \cdot (\rho_g - 0.2) \cdot IB^h(\gamma_s, T_L) \cdot \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L}}\right) \quad (I.36)$$

Le diffus directionnel est donné en fonction de δ_a par la formule suivante :

$$ID_d^i(\gamma_s, T_L) = \delta_a \cdot \cos(\delta') \quad (I.37)$$

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

$$\delta_a = G_o \cdot \exp\left[-2.48 - \sin(\gamma_s) + a_1 - \sqrt{4 \cdot b_1^2 + a_1^2}\right] \quad (I.38)$$

$$\text{Avec : } b_1 = \log(T_L') - 2.28 - 0.5 \cdot \log[\sin(\gamma_s)] \quad (I.39)$$

$$a_1 = 3.1 - 0.4 \cdot b_1 \quad (I.40)$$

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

$$ID_h^i(\gamma_s, T_L) = \delta_h \cdot \cos(\chi) \quad (I.41)$$

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

$$\delta_h = G_o \cdot \frac{-0.02 \cdot a_2}{a_2^2 + a_2 \cdot b_2 + 1.8} \cdot \exp[\text{Sin}(\gamma_s)] \quad (\text{I.42})$$

Avec : $b_2 = \exp\{0.2 + 1.75 \cdot \log[\text{Sin}(\gamma_s)]\}$ (I.43)

$$a_2 = \log(T_L) - 3.1 - \log[\text{Sin}(\gamma_s)] \quad (\text{I.44})$$

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

$$ID_{ciel}^i(\gamma_s, T_L) = (\delta_i + \delta_{i'}) \cdot \frac{1 + \text{Sin}(\chi)}{2} + \delta_d \cdot \text{Cos}(\delta^i) + \delta_h \cdot \text{Cos}(\chi) \quad (\text{I.45})$$

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

$$ID^i(\gamma_s, T_L) = ID_i^i(\gamma_s, T_L) + ID_d^i(\gamma_s, T_L) + ID_h^i(\gamma_s, T_L) + ID_a^i(\gamma_s, T_L) \quad (\text{I.46})$$

Les variations de l'éclairement diffus incident sur un plan d'inclinaison β (30 et 60°) pour un lieu de latitude 30° ($N = 91$) en fonction du temps pour différentes valeurs du facteur de trouble sont représentées sur la figure I.16:

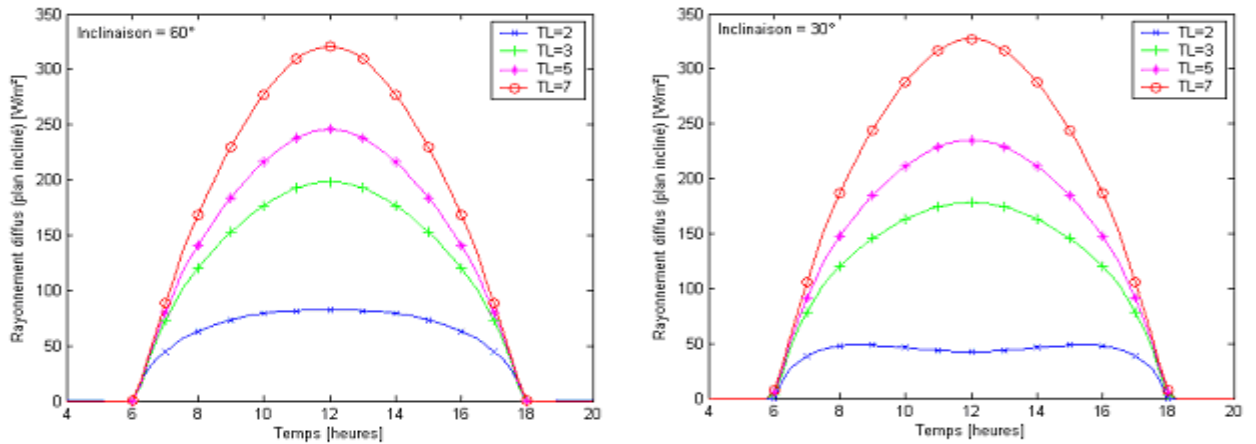


Figure I.17: Variations de l'éclairement diffus incident sur un plan d'inclinaison β

I.6. Conclusion

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 pyréliomètre que nous avons présenté dans ce chapitre. Dans ce premier chapitre, une modélisation de l'éclairement solaire par le modèle Capderou est présentée, les transmittances nécessaires pour le calcul des

CHAPITRE I : Gisement solaire et modélisation de l'éclairement solaire

composantes de l'éclairement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné sont programmées avec Matlab et leur variation sont illustrées sous formes graphiques. Le modèle Capderou utilise des équations propres pour déterminer les paramètres géométriques (déclinaison solaire, angle horaire, hauteur du soleil, azimuth et angle d'incidence) et les paramètres atmosphériques (masse et Epaisseur optique de l'atmosphère) nécessaires pour le calcul de l'éclairement solaire, ces équations ont été également programmées et représentées graphiquement.

CHAPITRE II

Etat de l'art sur les systèmes à cuisson solaires

II.1. Introduction

L'une des utilisations domestiques les plus simples de l'énergie solaire : la cuisson solaire. L'utilisation d'un cuiseur solaire peut s'avérer être la solution la plus écologique pour la cuisson des aliments. Parce qu'elles offrent une alternative écologique à l'utilisation des énergies fossiles. Elle est principalement utilisée dans l'hémisphère sud et se répand grâce à des associations humanitaires.

Dans ce deuxième 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.

II.2. Historique de la cuisson solaire

La cuisson solaire est loin d'être moderne. En effet le cuiseur solaire a été pour la première fois inventé par le chercheur Suisse Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) en 1767 sous le nom de "Héliothermometer", car il l'a utilisé pour mesurer le rayonnement solaire dans les Alpes selon la variation de l'altitude. Il a réussi à cuire des fruits dans ce boîtier vitré. Par la suite le premier cuiseur solaire parabolique a été inventé par l'Ingénieur Français Augustin Bernard Mouchot (1825-1911) en 1877.

L'idée du développement des cuiseurs solaires fut vite abandonnée pour des raisons d'encombrements et de faibles rendements. Dans les années cinquante du siècle passé et par nécessité, il y eut une reprise d'intérêt pour la cuisson solaire en Inde et en Chine. En Inde, le développement de la cuisson solaire continuait pendant une longue période. La construction de cuiseurs solaires était même subventionnée par l'état pendant un certain temps. Après la crise du pétrole des années 70, les pays industrialisés s'intéressaient de nouveau à la cuisson solaire. Les investigations fondamentales pour l'amélioration et le développement effectif de la cuisson solaire ont été intensifiées [2].

En 1980, un mouvement s'est formé aux Etats Unis autour de Barbara Kerr (Fig II.1) qui est un pionnier de la cuisson solaire en Arizona qui a développé un kit facilitant aux gens la construction de leur propre cuiseur solaire. Ce mouvement s'est soldé par la création de

l'organisation internationale 'Solar Cookers International (SCI)' qui est devenu un forum pour les promoteurs de la cuisson solaire dans le monde. Actuellement, la cuisson solaire est très répandue à travers le monde, surtout dans les régions isolées, pauvres et en voie de développement où plusieurs organisations internationales entretiennent des programmes d'aide et de promotion de la cuisson solaire au profit des populations locales.



Figure II.1: Barbara Kerr avec Sherry Cole qui est une des fondateurs de cuiseurs solaires [14].

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



Figure II.2: Utilisation d'un modèle de cuiseurs solaires au Sénégal [15].

C'est en 1952 et sous l'égide du Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique Appliquée en Algérie que la Commission locale de l'Energie Solaire, animée par l'ingénieur Général des Mines Bélier, confia à M.Frixon, Directeur de la Production à Électricité et Gaz d'Algérie, et M. Guillemonat, professeur à la Faculté des Sciences de Marseille, le soin d'établir les caractéristiques du four solaire de Bouzaréah baptisé "Héliodyne" (Fig II.3). M. Touchais, ingénieur conseil à Alger, a eu la charge de concrétiser les données proposées et de procéder aux études initiales qui, par étapes successives engendrèrent l'Héliodyne actuel. La Société des Anciens Etablissements Sautter-Harlé assumait l'étude générale et l'exécution particulièrement délicate de ce prototype [16].



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

Actuellement, en Algérie ; la cuisson solaire reste toujours méconnue par le grand public. Dans ce cadre, l'équipe du chauffage solaire de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar (URER/MS) a lancé un projet en 2004 qui porte sur l'introduction et le développement de la cuisson solaire en milieu saharien. Le projet a abouti à la construction de plusieurs prototypes adaptés au milieu saharien (Fig II.4) et a permis d'introduire cette activité et de s'inscrire dans le répertoire international des promoteurs de la cuisson solaire ('International Directory of Solar Cooking Promoters' [16]).



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

En 2010, l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa) a également portée un grand intérêt au développement et à la vulgarisation des cuiseurs solaires, en lançant un programme ambitieux, s'inscrivant dans le cadre de ces activités; qui porte sur la conception et la réalisation de nouveaux designs de cuiseurs solaires, qui a abouti à la proposition d'un cuiseur solaire de type boîte avec une surface réceptrice inclinée [17,18,19] (Fig II.5) et la réalisation du fameux design du cuiseur solaire parabolique avec une nouvelle structure porteuse [20], des cartes des efficacités des cuiseurs à travers le territoire national ont été proposées à cet effet [21, 22]. Beaucoup d'efforts restent à fournir et un projet de grande envergure est nécessaire pour développer et vulgariser cette application en Algérie, qui peut être très bénéfique au niveau des régions isolées.

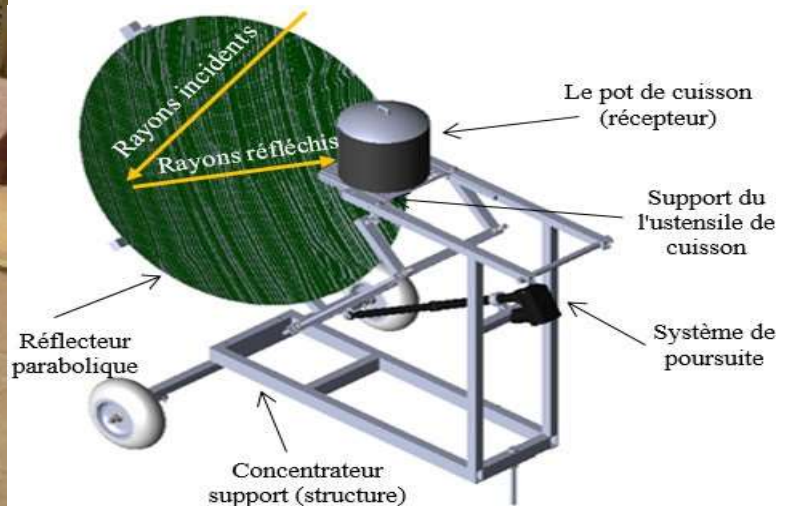


Figure II.5: Deux prototypes de cuiseurs solaires réalisés et testés à l'URAER – Ghardaïa.

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

La cuisson solaire permet de cuire les aliments grâce à l'énergie solaire. La nourriture placée dans une marmite ou un plat à four va profiter de la chaleur des rayonnements lumineux du soleil pour cuire. Tout ceci est possible grâce au soleil bien sûr et à un système (four ou cuiseur, acheté ou bricolé "maison") capable d'amplifier le rayonnement du soleil et de transformer en chaleur ces rayonnements lumineux.

Les cuiseurs et fours solaires capturent les rayons solaires extérieurs au moyen de surfaces brillantes, miroirs, alu... qui réfléchissent les rayons du soleil et les concentrent sur la cocotte ou le plat. A cette concentration de rayons lumineux, s'ajoute un effet de serre dans le cas des fours solaires : la chaleur est retenue par un couvercle transparent ou une vitre (en plastique résistant à la chaleur ou en verre). Ce qui compte pour la cuisson solaire, c'est la luminosité et le rayonnement direct du soleil. Difficile d'utiliser l'énergie solaire pour une cuisson lorsque le ciel est nuageux [23].

Dans un souci d'efficacité, la chaleur doit être conservée au maximum. Les cuiseurs solaires de type "boîte" utilise un vitrage pour garder la chaleur à l'intérieur de la boîte par effet de serre. Au niveau des autres parois, l'ajout d'une isolation classique améliore la conservation de la chaleur.

Enfin, les rayons solaires peuvent être déviés par des miroirs et permettre l'apport d'énergie supplémentaire vers le foyer du cuiseur solaire [24].

II.3.1. Principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire boîte

Le four solaire (Fig II.6) est une boîte bien isolée thermiquement au couvercle transparent et aux faces intérieures réfléchissantes : les rayons du soleil entrent par la vitre et se réfléchissent sur les bords de la boîte jusqu'à heurter la surface sombre de la marmite. L'énergie de ces rayons est alors transformée en chaleur, chaleur qui est emprisonnée dans la boîte [25].

Pour augmenter le flux solaire capté, deux oreillettes recouvertes d'aluminium sont fixées de part et d'autre de la boîte afin de réfléchir la lumière sur la vitre qui doit être la plus perpendiculaire possible aux rayons du soleil.

Sous les latitudes de la France métropolitaine, l'inclinaison du soleil par rapport à l'horizon est d'environ 60° l'été et de 30° l'hiver. Ainsi l'inclinaison optimale de la vitre en été sera de 30 °

et en hiver de 60° . Le four solaire ne fonctionne qu'avec le rayonnement direct du soleil : nuages, brumes, poussière réduisent donc le rayonnement et prolonge le temps de cuisson[25].

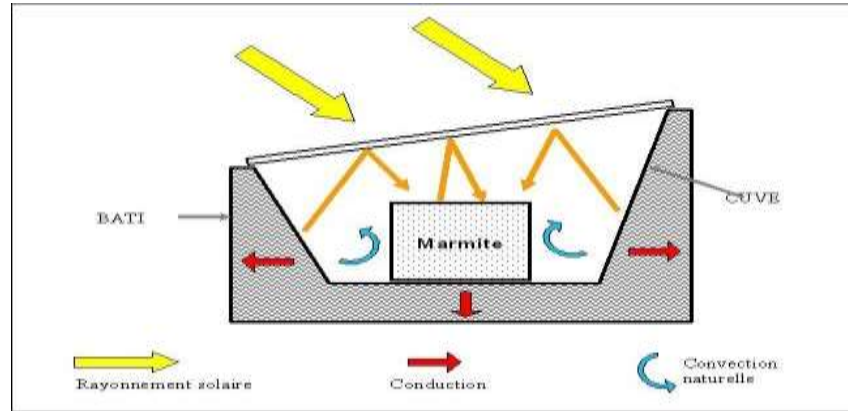


Figure II.6: schéma de principe d'effet de serre [10].

II.3.2. 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 [26]. 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 [27]. Cependant, des températures comprises entre 80 et 90°C suffisent pour cuire les nourritures et gardent leur goût, humidité et éléments nutritifs (Fig II.7) [26].

Les temps de cuisson sont très variables, ils varient considérablement en fonction de divers facteurs [28] notamment la période de l'année, le moment de la journée, le degré l'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 [29].

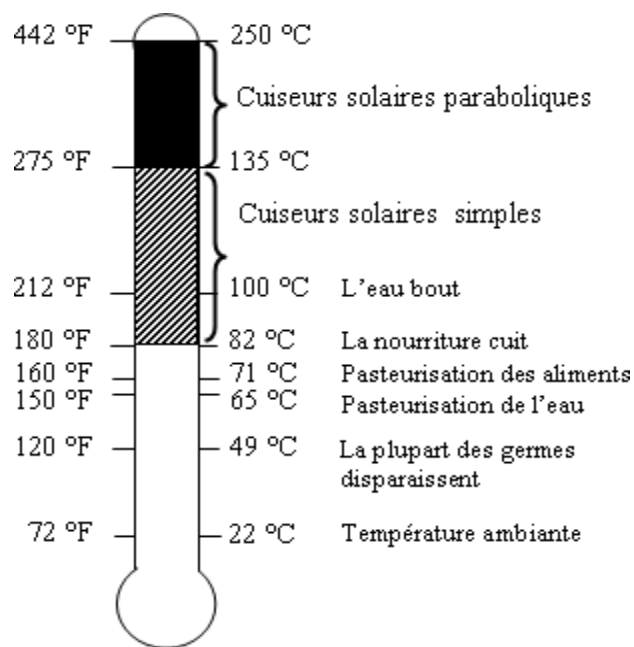








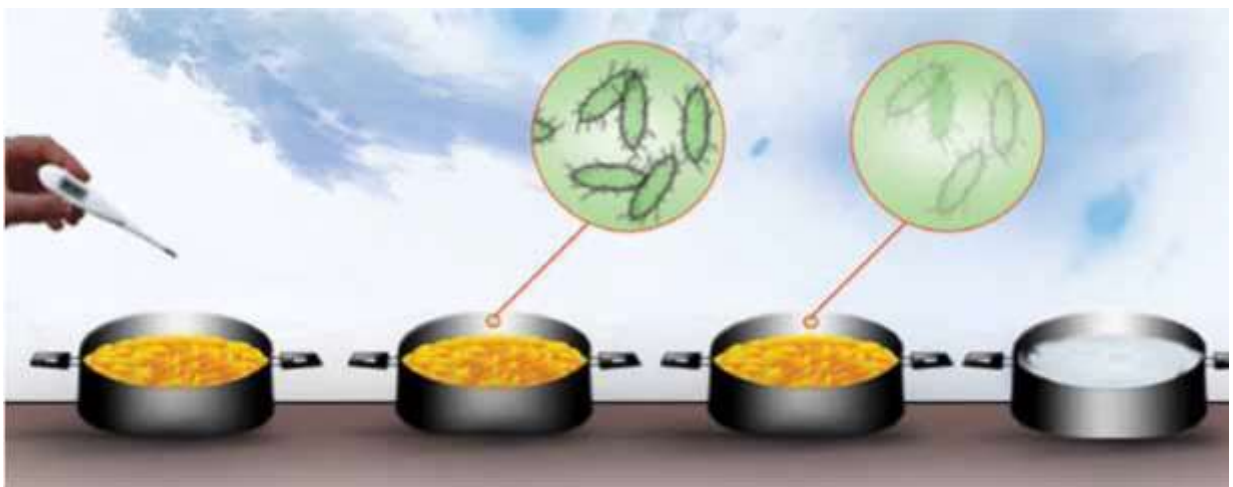
Figure II.7: Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs [29].

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

	Cuisson rapide	Cuisson lente
Période de la journée		
Intensité de soleil		
Force de vent		

Epaisseur du récipient		
Quantité d'eau		
Quantité et taille de la nourriture		

La cuisson solaire ne convient pas aux préparations qui doivent être remuées de temps en temps (Fig II.8). L'idéal est de mettre tous les ingrédients nécessaires dès le début. Les cuiseurs solaires simples, utilisés dans des conditions normales, atteignent des températures allant de 82°C à 121°C, voire plus. Les aliments commencent à cuire entre 82°C et 91°C, ce qui est suffisant mais pas assez pour qu'ils ne brûlent ou perdent leurs nutriments. C'est pourquoi l'utilisation de ces types de cuiseur ne demande aucune surveillance : vous pouvez préparer le repas tôt le matin, le placer dans le cuiseur et l'y laisser jusqu'au moment du repas sans vous en soucier [30].



22°C	22°C à 49°C	60°C	65°C
------	-------------	------	------

Température ambiante	Présence des bactéries dans les aliments	Disparition des bactéries dans les aliments	Pasteurisation de l'eau
----------------------	--	---	-------------------------
















71°C	82°C	100°C	100°C - 130°C
Pasteurisation des aliments	Cuisson	Ébullition de l'eau	Cuisson solaire simple

Figure II.8: Cuisson alimentaire en fonction des températures.

En général, la cuisson solaire dure deux fois plus longtemps que la cuisson traditionnelle. Les durées approximatives de cuisson solaire par temps ensoleillé sont présentées dans le tableau suivant. Ces durées sont données pour deux kilos de nourriture [30].

Table II.2: Durée approximative de cuisson des aliments.

1 à 2 heures	3 à 4 heures	5 à 6 heures
 œufs	 Pommes de terre	 Roti de viande
		

Riz	Haricots	
		
Fruits	Manioc	Soupe
		
Légumes	Viande	
		
Poisson	Pain	
		
Poulet		

II.4. Classification des cuiseurs solaires

Les cuiseurs solaires sont classifiés globalement en deux catégories : les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur et, les cuiseurs solaires avec stockage de chaleur, cette classification est illustrée en détail sur la figure II.9 [31]:

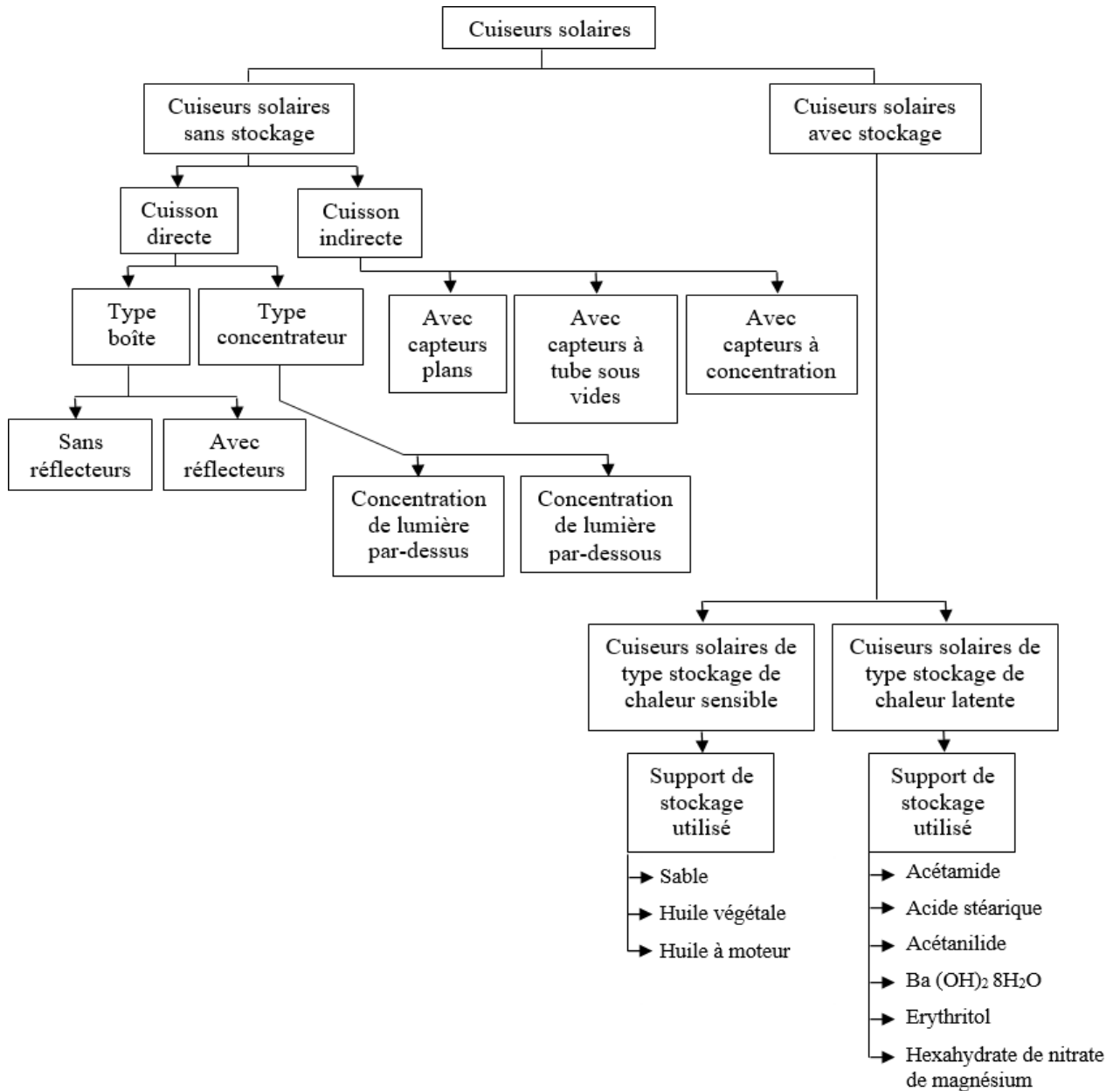


Figure II.9: Classification des ciseurs solaires sans et avec stockage thermique[31].

II.4.1. Ciseurs solaires sans stockage de chaleur

Les ciseurs solaires sans stockage se divisent entre : ciseurs avec cuisson direct et, cuisson indirect, cette catégorisation est effectuée suivant le mécanisme de transfert de chaleur vers l'ustensile. Le type direct utilise directement le rayonnement solaire pour cuire, par contre le type indirect utilise un fluide caloporteur pour transférer la chaleur du collecteur vers l'ustensile de cuisine [2].

II.4.1.1. Cuiseurs solaires type direct (boîte)

Il y a le cuiseur solaire boîte et le cuiseur solaire concentrateur.

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

La figure II.10 illustre plusieurs configurations du cuiseur solaire boîte [2]:

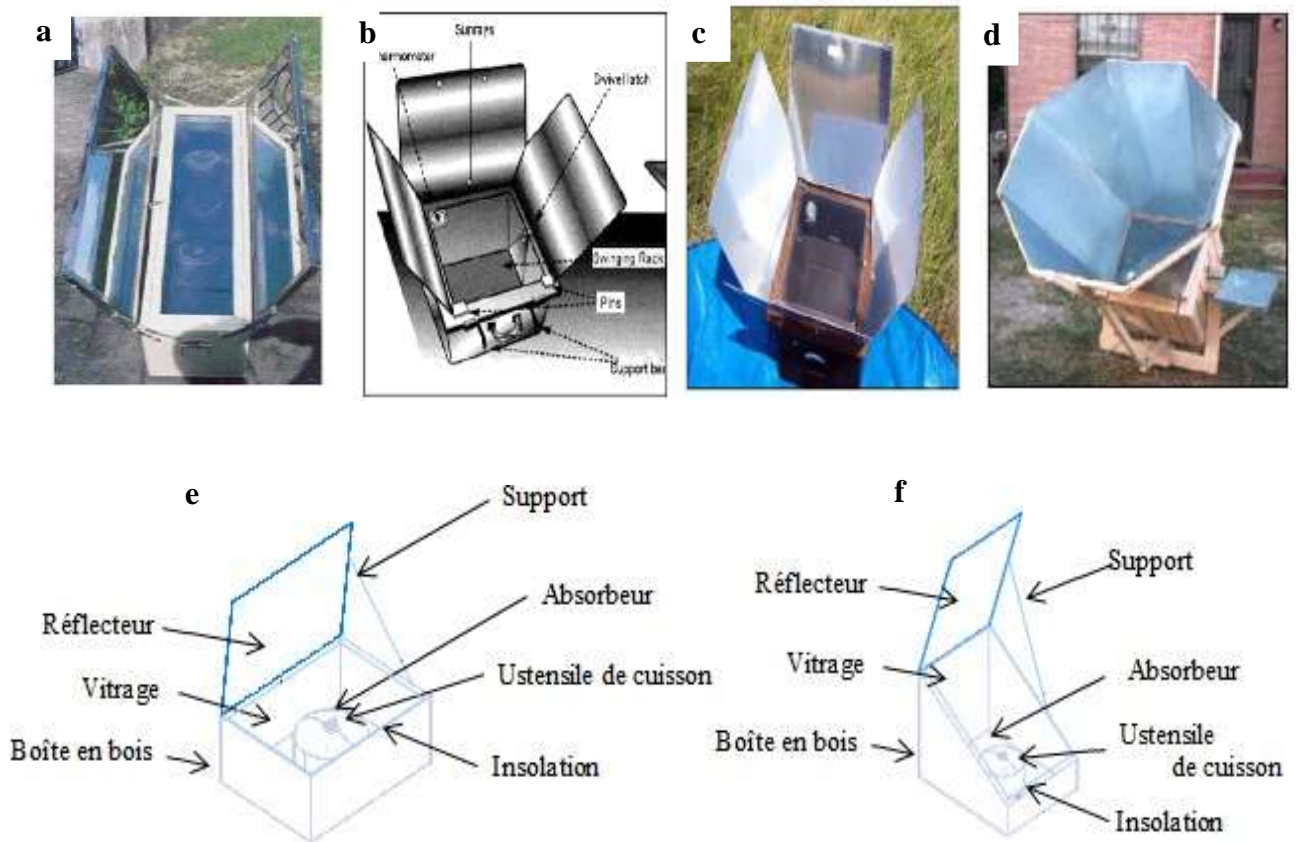


Figure II.10: Cuiseurs solaires boîtes : (a) avec deux réflecteur, (b) avec trois réflecteur, (c) avec quatre réflecteurs, (d) avec huit réflecteurs, (e) avec réflecteur à surface horizontale, (f) à surface réceptrice inclinée.

II.4.1.2. Cuiseurs solaires type direct (à concentration)

Dans les cuiseurs à concentration l'ustensile est placé au point de concentration d'un miroir parabolique. Ce type de cuiseur fonctionne sur deux axes pour capturer les rayons solaires, le rapport de concentration peut atteindre 50, et la température dépasse les 300 °C, ce qui suffit assez largement pour cuire tout type d'aliment.

Les cuiseurs à concentration utilisent des miroirs multi face, concentrateur Fresnel ou des concentrateurs parabolique pour atteindre une telle haute température. Plusieurs configurations des cuiseurs solaires à concentration sont illustrées sur la figure (II.11) [2]:



Figure II.11: Cuiseurs à concentration : (a) cuiseur a panneaux, (b) cuiseur entonnoir, (c) réflecteur sphérique, (d) réflecteur parabolique, (e) concentrateur Fresnel, et (f) concentrateur cylindro- parabolique.

Les hautes températures atteintes par les cuiseurs solaires à concentration permettent de cuire tous les types des aliments dans des courtes durées. Les inconvénients des cuiseurs à concentration sont ; le volume excessif, le cout, le risque de bruler les aliments et surtout, les ajustements fréquent [2].

II.4.1.3. Cuiseurs solaires type indirect

Dans les cuiseurs solaires indirects l'ustensile de cuisine est mis hors du collecteur, un dispositif pour transférer la chaleur vers l'ustensile de cuisine est requis. Les cuiseurs solaires avec capteur plan, les cuiseurs solaires avec capteur à tubes sous vide et, les cuiseurs solaires à concentrations sont les principaux cuiseurs solaires indirects comme montré sur la figure II.12:

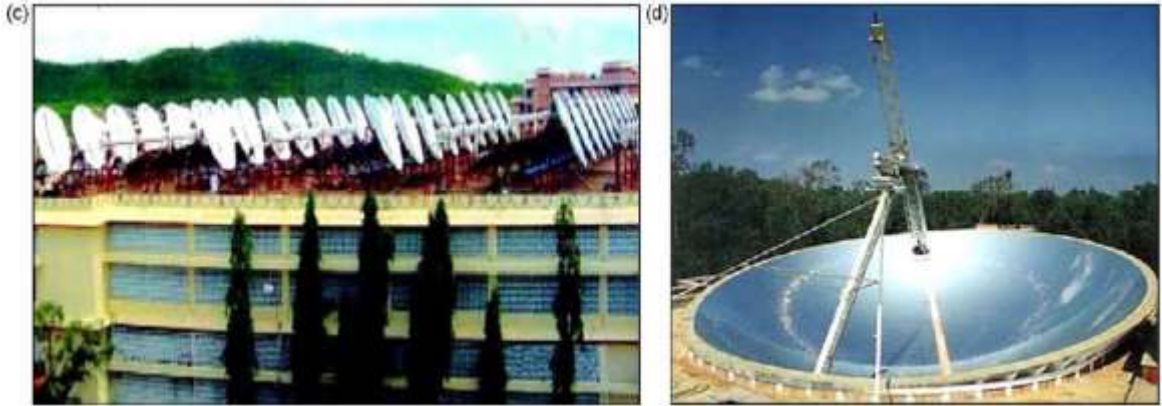


Figure II.12: Cuisers solaires du type indirect, (a) avec capteur plan, (b) avec capteurs sous vides,(c) avec concentrateur parabolique, (d) avec concentrateur sphérique [2].

II.4.2. Les cuisers solaires avec stockage de chaleur

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

II.4.2.1. Stockage avec chaleur sensible

Dans ce cas l'énergie calorifique est stockée en augmentant la température d'un solide ou un liquide (Fig II.13) [2].

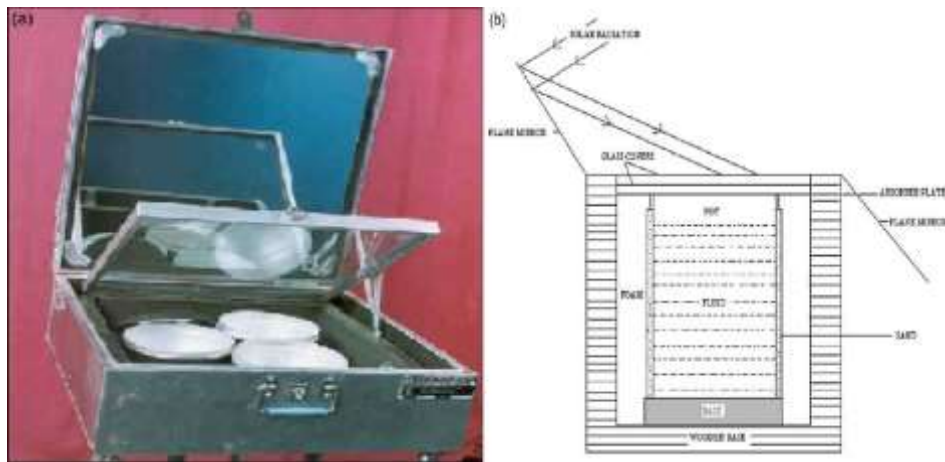


Figure II.13: Stockage par chaleur sensible :(a) avec l'huile des moteurs, (b) avec le sable.

II.4.2.2. Stockage par chaleur latente

Dans le stockage par chaleur latente on utilise l'énergie stockée lors d'un changement de phase d'une substance (Fig II.14) [2]:

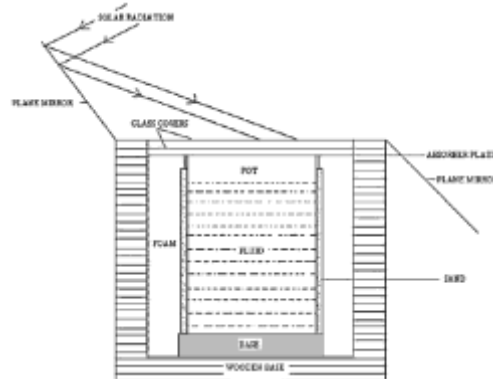


Figure II.14: Stockage par chaleur latente en utilisant $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$.

II.5. Etat de l'art des cuiseurs solaires

Divers prototypes de cuiseurs solaires ont été réalisés ces dernières années à travers le monde dont les plus répandus sont les cuiseurs de types boîtes et les cuiseurs paraboliques [32]:

II.5.1. Cuiseurs solaires dans le monde

II.5.1.1. Cuiseurs solaires du type boîte

M. Nahar [33] a conçu, réalisé et testé un cuiseur solaire boîte à deux réflecteurs avec une matière d'isolation transparente (Fig II.15a) qui remplit le volume entre les deux vitres du cuiseur afin de minimiser les pertes par convection sur la vitre extérieure.

La comparaison de ce nouveau concept du cuiseur avec le cuiseur boîte ordinaire avec un seul réflecteur a montré que l'utilisation d'une matière d'isolation transparente avec deux réflecteurs avait augmenté le rendement du cuiseur à 30.5% par rapport à 24.5% d'un cuiseur ordinaire.

M. A. Mohamad et al [34] ont réalisés plusieurs prototypes d'un modèle d'un cuiseur solaire boîte (Fig II.15b) facile à construire, simple à utiliser et à entretenir ; destiné à l'utilisation dans la région du sahel africain. Les unités fabriquées ont été testées sur terrain et ils ont montrés une performance acceptable, les températures maximales atteintes à l'intérieure de ces cuiseurs étaient 160 °C.

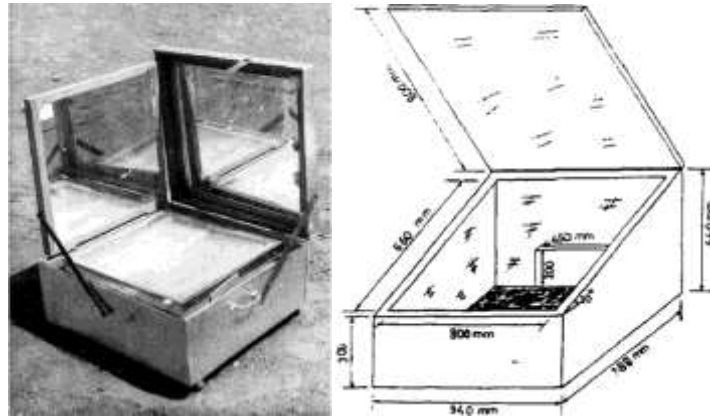


Figure II.15: Cuiseurs solaires boîte fabriqué et testé par Nahar (a) et par Mohamed (b).

II.5.1.2. Cuiseurs solaires du type boîte à double exposition

Emad H. Amer [35] a présenté un nouveau design des cuiseurs solaires (Fig II.16) et l'as comparé avec un cuiseur boîte conventionnel. Dans le nouveau prototype, l'absorbeur est exposé au rayonnement solaire des deux côtés, par le haut et par le bas, un ensemble de réflecteurs plans est utilisé pour diriger les rayons du soleil vers le bas de l'absorbeur. Une série de tests a été réalisés et les résultats obtenus montrent que la température de l'absorbeur et de l'air à l'intérieur du cuiseur atteint 165°C et 155°C respectivement, et qui est supérieure à la température dans le cuiseur conventionnel (140°C et 132°C).

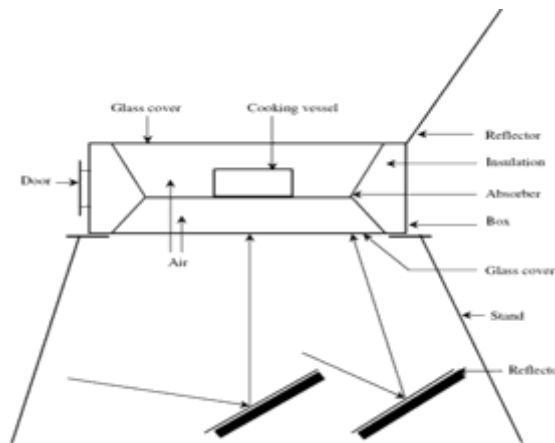


Figure II.16: Schéma du cuiseur boîte avec double exposition étudié par Amer.

II.5.1.3. Cuiseurs solaires du type boîte avec stockage de chaleur

D. Buddhi et L.K. Sahoo [36] ont fait la conception et la réalisation d'un cuiseur boîte avec stockage de chaleur latente d'une matière à changement de phase (Fig II.17). Cette étude de

faisabilité s'articule sur l'utilisation de l'acide stéarique comme milieu de stockage de chaleur dans les cuiseurs solaires. Les résultats obtenus ont été encourageants après comparaison avec celles obtenues des tests expérimentaux sur des cuiseurs conventionnels, et ils ont trouvés qu'il est possible de cuire les aliments même dans le soir en utilisant un cuiseur solaire avec système de stockage, et qui fournit une température de plaque presque constante.

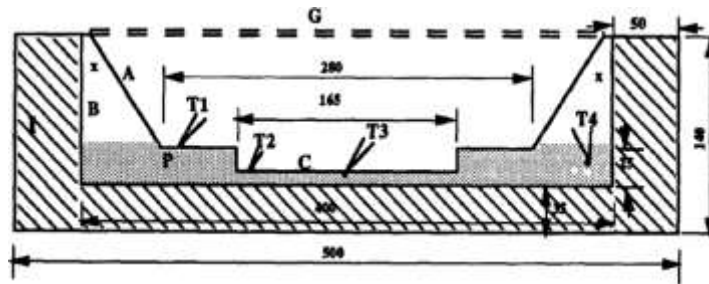


Figure II.17: Schéma du cuiseur boîte avec stockage testé par Buddhi et al [36].

II.5.1.4. Cuiseurs solaires du type boîte indirect avec capteurs sous vide

S.D. Sharma et al [37] ont testés les performances d'un cuiseur solaire (Fig II.18) attaché à une unité de stockage et à des tubes sous vides. Le prototype comprend trois parties essentielles : la première pour la collection d'énergie, la deuxième pour la cuisson, et les deux sont couplées à l'unité de stockage avec PCM (Erythritol commercial), des expériences à midi et dans le soir, avec différentes charges, ont été effectuées sous des conditions climatiques multiples. Les résultats obtenues ont montré que :

- Le système est capable de cuire dans la matinée et dans le soir, et l'utilisation du cuiseur au matin n'influe pas sur sa performance dans l'après-midi.
- La cuisson est plus rapide dans le soir qu'à midi avec utilisant le stockage à PCM.
- L'unité de stockage peut fournir la chaleur requise pour cuire les aliments à midi, dans le soir et aussi garder la température près de 75°C jusqu'au matin prochain.
- Malgré que le cuiseur est coûteux, il présente un bon potentiel pour ce genre d'applications domestiques, il peut fournir une température de 130°C sans poursuite et peut être utilisé à l'ombre.

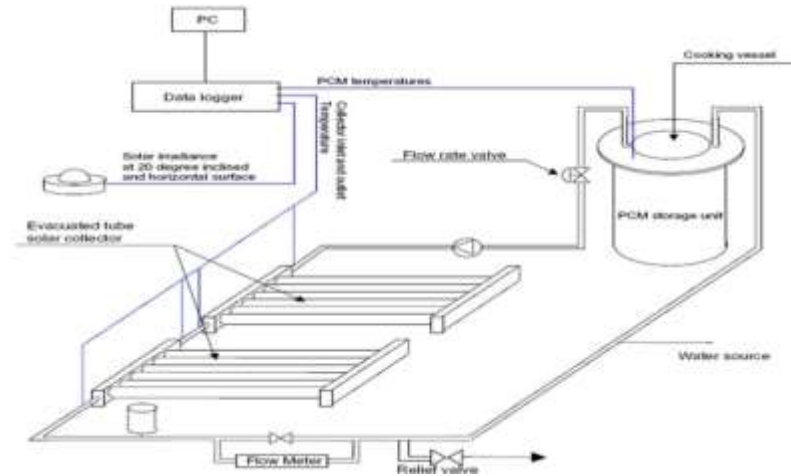


Figure II.18: Schéma du cuiseur solaire et unité de stockage de chaleur latente réalisé par sharma

II.5.1.5. Cuiseurs solaires du type concentrateur

Ozturk [38] a réalisé et testé un cuiseur solaire parabolique (Fig II.19) simple à concevoir, et pas coûteux, le standard « International standard for testing and reporting the solar cooker performance » a été appliqué pour déterminer expérimentalement les rendements énergétiques et exégétiques du cuiseur parabolique. Il a trouvé que la température moyenne journalière de l'eau est 333°K et la différence moyenne journalière entre la température de l'eau et la température de l'air ambiant est 31.6°K . Les valeurs trouvées des rendements énergétiques et exégétiques sont relativement très petites, en particulier le rendement exégétique (rendement énergétique : 2.8-15.7% ; rendement exégétique : 0.4-1.25%). Il a conclu que les pertes exégétiques peuvent être réduites avec augmentation de la réflectivité du réflecteur et augmentation de l'absorptivité de l'ustensile de cuisine.

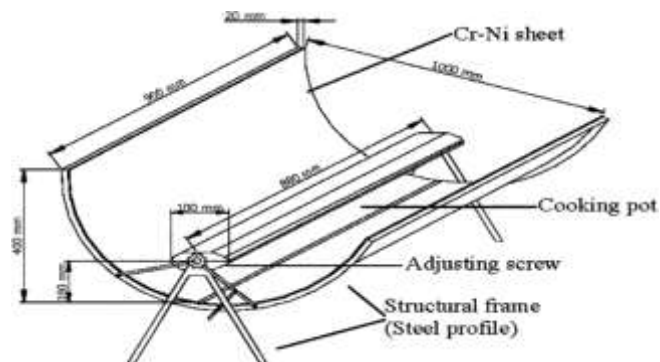


Figure II.19: Schéma du cuiseur Cylindro-parabolique testé par Ozturk.

II.6. Avantages et les inconvénients des cuiseurs solaires

II.6.1. Avantages des cuiseurs solaires [2]

II.6.1.1. Cuiseurs solaires permettent de gagner du temps et de l'argent

- ✓ La lumière du soleil est gratuite. La cuisson solaire permet de conserver une énergie précieuse pour le soir et les jours de mauvais temps.
- ✓ Les plats cuisent pendant que vous vous occupez d'autre chose, sans qu'il soit nécessaire d'y prêter attention.
- ✓ Les casseroles sont faciles à nettoyer, la nourriture n'accroche pas.
- ✓ Un cuiseur solaire est facile à construire à partir de matériaux divers et peu coûteux.

II.6.1.2. Cuiseurs solaires sont sûrs, pratiques et sains

- ✓ Ils ne causent aucun risqué d'incendie.
- ✓ Ils ne dégagent aucune fume lors de la cuisson, cela réduit ainsi les cas de maladies des yeux ou les problèmes pulmonaires. Les personnes allergiques à la fume peuvent désormais profiter d'un barbecue solaire sans fumée.
- ✓ La plupart des cuiseurs solaires cuisent à des températures comprises entre 82°C et 121°C, idéales pour préserver les nutriments, la saveur et le goût des aliments et éviter qu'ils ne brûlent. La cuisson au bois ou au gaz, au contraire, dépasse les 260°C.
- ✓ Vous pouvez faire cuire, bouillir, frire (légèrement) les aliments dans leur propre jus sans ajouter d'eau. Les viandes sont plus tendres.
- ✓ La pasteurisation de l'eau est aussi possible grâce au cuiseur solaire. C'est une technique que chacun devrait connaître en cas d'urgence.
- ✓ Quand vous cuisinez solaire, votre cuisiner est fraîche et aérée alors que dehors le temps est chaud et ensoleillé.

II.6.1.3. Cuiseurs solaires sont faciles d'emploi

- ✓ Les cuiseurs solaires peuvent être construits à partir de matériaux divers et s'adaptent aux différents climats et façons de cuisiner.

II.6.1.4. Cuisson solaire permet de sauver des vies dans les régions pauvres en énergie mais riches en soleil

✓ La cuisson solaire contribue à résoudre deux des problèmes majeurs dans le monde : l'aggravation du manque d'énergies 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. Selon l'ONU, deux tiers de la population mondiale, c'est-à-dire deux milliards de personnes, souffrent du manque de bois. Les femmes, et parfois les enfants, doivent aller chercher le bois de plus en plus loin, ce qui prend plus de temps que par le passé. Les familles vivant dans les villes dépensent 30 à 50% de leur revenu dans les énergies de cuisson, ou échangent une partie de leur nourriture contre du bois. Les familles délaissent les aliments riches en nutriments, qui nécessitent une cuisson lente, causant ainsi disette et malnutrition. De nombreux gouvernements importent et subventionnent des énergies fossiles. Grâce au cuiseur solaire, les familles réduisent de moitié leurs besoins en bois de cuisson.

✓ La pasteurisation de l'eau et du lait grâce au cuiseur solaire aide à réduire la contamination par le choléra et autres maladies liées à la consommation d'eau impropre, qui causent la mort de 50000 personnes par jour. L'OMS estime qu'environ 80% des maladies prolifèrent à cause d'une eau contaminée.

II.6.1.5. Cuisson solaire aide à préserver les forêts et les richesses de la terre

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. Comme le disait un ministre du Zimbabwe: «Quand les arbres sont disparu, l'érosion des sols suit...le fermier ne peut plus travailler la terre... La terre est lavée par la rivière. L'eau nécessaire à l'irrigation se raréfie. Alors le coton et le blé sont plus chers. C'est un cercle sans fin »

✓ Chaque cuiseur solaire peut sauver une tonne de bois par an dans les régions ensoleillées.

II.6.1.6. Cuiseurs solaires aident à améliorer la qualité de l'air

✓ Les énergies traditionnelles comme le bois et le gaz polluent l'air et contribuent au réchauffement de la planète. Les cuiseurs solaires offrent une alternative non polluante à l'utilisation des énergies fossiles.

II.6.2. Inconvénients des cuiseurs solaires [2]

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

II.7. Conclusion

Dans ce second chapitre, un aperçu sur l'utilisation de l'énergie solaire est illustré. Il a été constaté qu'un cuiseur solaire est un moyen écologique et économique de préparer les aliments.

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

Plusieurs prototypes de cuiseurs solaires ont été réalisés à travers le monde sans et avec stockage et les résultats s'avèrent relativement satisfaisants. Dans ce qui suit, nous avons présenté la partie pratique du travail, dont nous faisons une étude théorique et expérimentale d'un cuiseur solaire boîte, conçu et réalisé plutôt à l'URAER (URAER, Ghardaïa).

CHAPITRE III

Etude théorique et expérimentale, interprétation et discussion des résultats

III.1. Introduction

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

Dans ce troisième chapitre, une évaluation des performances thermiques du cuiseur solaire boîte est effectuée. Les températures mesurées au niveau du cuiseur à travers l'unité d'acquisition de donnée AGILENT 34972A; à savoir: température de l'eau à l'intérieur de l'ustensile, température de la plaque, de l'air et du vitrage seront visualisées numériquement et graphiquement sur l'écran d'un micro-ordinateur, les instruments de mesure utilisés pour collecter les diverses paramètres seront présentés. Par ailleurs, des tests sont réalisés durant plusieurs jours avec différentes conditions climatiques et le temps d'ajustement du cuiseur est effectué d'une manière bien étudiée. Les résultats issus des tests réalisés seront discutés, interprétés et comparés avec les résultats obtenus de la simulation. En effet, une modélisation du cuiseur en 2 et 3 dimensions sous logiciel COMSOL est effectuée afin de prédire les performances de ce système dans les conditions réelles.

III.2. Présentation du lieu de stage

III.2.1. Site de Ghardaïa

Le site de Ghardaïa (Fig III.1) est situé au centre de l'Algérie et distant de 600 km d'Alger à 32.39° de latitude Nord, de 3.78° de longitude Est, et à l'altitude de 463 mètres au niveau de la mer. Présentant un climat désertique, le site de Ghardaïa est limité du côté Nord par la Wilaya de Laghouat (200 km), à l'Est par la Wilaya de Ouargla (200 km), au Sud-Ouest par la Wilaya d'Adrar (800 km), à l'Ouest par la Wilaya d'El-Bayad (350 km). Le site est devenu une nouvelle structure scientifique, qui a été mise en place en 2002 par le ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, il s'agit de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER), affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) situé à Bouzaréah, Alger.

La caractérisation de sites se fait à travers l'analyse des paramètres météorologique et radiométrique, tel que : la précipitation, la température ambiante, l'humidité relative, le vent. En

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



Figure III.1 : Site de Ghardaïa en Algérie.

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

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

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

III.2.3. Equipe Mini Centrales Thermodynamiques

Les cuiseurs solaires existants au niveau de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables s'inscrivent dans le programme des projets de maîtrise et de développement des systèmes à cuisson solaire de l'équipe (MCSTH) Mini Centrales Solaire Thermodynamiques, dans laquelle nous avons exercé notre stage dont les objectifs de l'équipe sont principalement (Fig III.2):



Figure III.2 : Quelques réalisations expérimentales de l'équipe Mini Centrales Thermodynamiques (MCT).

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

III.3. Simulation numériques de cuiseur boîte à l'aide du logiciel COMSOL

Le cuiseur boîte est un système qui fait intervenir un couplage de transfert thermique entre les différents éléments qui le constituent. Afin de pouvoir prédire son comportement thermique, il est primordial de pouvoir caractériser les différentes excitations extérieures et les différents transferts d'énergie mis en jeu.

III.3.1. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement du cuiseur solaire

On peut les classer en deux catégories : paramètres externes et paramètres internes.

III.3.1.1. Paramètres externes

Les paramètres externes sont représentés par :

- Paramètre d'ensoleillement : éclairement énergétique du au rayonnement global, position du soleil, durée d'insolation.
- Température extérieure.

III.3.1.2. Paramètres internes

Les paramètres internes sont représentés par :

- Les paramètres géométriques :
 - Paramètres de position : inclinaison, orientation du cuiseur.
 - Dimension de différentes parties : épaisseur, longueur et largeur.
- Les paramètres de fonctionnement :
 - L'intensité du rayonnement solaire.
 - La température des différentes parties du cuiseur.

III.3.2. Les différentes modes de transfert de chaleur

L'existence d'une différence de température entre deux systèmes, quel que soit le milieu qui les sépare même le vide, fait intervenir un échange d'énergie connu généralement sous le nom de « transfert de chaleur ». Le calcul de l'échange est une étape essentielle de la modélisation et la conception thermique des différents capteurs,

Il existe trois modes de transfert de chaleur qui coexistent presque dans tous les systèmes.

III.3.2.1. Transfert thermique par conduction

La conduction est le mode de transmission de la chaleur provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu matériel.

La loi fondamentale de la conduction thermique, établie par Fourier, s'exprime mathématiquement par la proportionnalité, en tout point d'un corps isotrope, de la densité de flux au gradient de température :

$$\vec{G} = -k \cdot \vec{gr}(T) \quad (\text{III.1})$$

Cette loi traduit le fait que l'énergie thermique se propage des points les plus chauds vers les plus froids, et que le flux est d'autant plus intense que l'écart de température par unité de longueur est grand.

Le coefficient de proportionnalité k est la conductivité thermique du corps considéré, et s'exprime en $W/(m.K)$.

III.3.2.2. Transfert thermique par convection

Dans le mode d'échange par convection, le transfert de la chaleur se fait dans les fluides, les liquides ou les gaz en mouvement. Ce cas se rencontre souvent dans l'échange entre une paroi et un fluide (Fig III.3).

On distingue deux types de phénomènes convectifs :

La convection naturelle, ou libre, pour laquelle le mouvement provient de l'action simultanée de différences de température existant au sein du milieu, et d'un champ de force massique,

La convection forcée, pour laquelle le mouvement est imposé par une action extérieure (pompe, ventilateur, ...).

La représentation exacte des processus de transfert par convection pose des problèmes de mécanique des fluides souvent très difficiles à résoudre directement.

Cependant, comme on ne s'intéresse en général qu'à la quantité de chaleur échangée entre le fluide et une paroi solide, on introduit un coefficient d'échange superficiel h tel que la densité de flux de chaleur q , à travers un élément de surface de la paroi, soit proportionnelle à la différence entre la température T de cet élément est une température moyenne du fluide T_a :

$$G = h.(T - T_a) \quad (\text{III.2})$$

Le coefficient h dépend :

- du type de convection
- du type d'écoulement.
- de la géométrie de l'écoulement.
- la vitesse de l'écoulement.
- la température.
- les propriétés thermo-physiques du fluide (viscosité).
- des conditions adoptées au niveau de la paroi (température constante, ou densité de flux constante).

Pour le calcul du coefficient de transfert thermique par convection il faut d'abord déterminer les nombres suivants :

Les nombres de Nusselt, Prandtl et Reynolds qui caractérisent respectivement :

L'échange thermique, les propriétés thermiques du liquide et le régime d'écoulement du liquide.

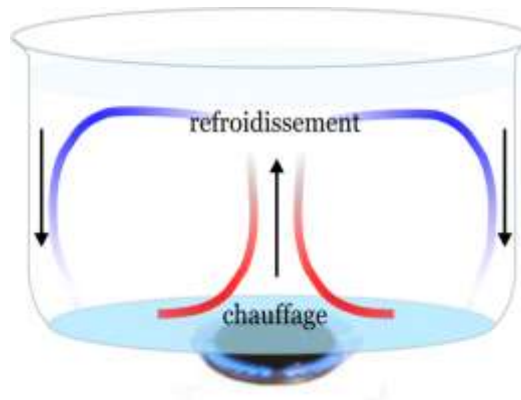


Figure III.3 : Transfert de chaleur par convection.

III.3.2.3. Transfert par rayonnement

C'est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet dans l'espace. Il s'agit d'un rayonnement électromagnétique. La loi fondamentale de ce phénomène, appelée loi de Stefan-Boltzmann, exprime la densité de flux d'énergie émise par une surface idéale, dite noire, en fonction de sa température absolue :

$$G = \sigma.T^4 \quad (\text{III.3})$$

Où σ est la constante de Stefan-Boltzmann : $5.67.10^{-8} [mK]$

L'équation d'échange, dans le cas particulier d'un corps noir à la température absolue T , plongé dans une enceinte noire à la température absolue T_a , s'écrit :

$$G = (T^4 - T_a^4) \quad (III.4)$$

En pratique, on tiendra compte de la géométrie du système par l'introduction d'un facteur de forme F lié à l'angle de vue de la surface rayonnante vers l'ambiance, et des propriétés émissives réelles de la surface, que l'on qualifiera par un coefficient ϵ appelé émissivité :

$$G = \epsilon.F.\sigma (T^4 - T_a^4) \quad (III.5)$$

III.3.2.4. Mécanisme de transfert de chaleur vers l'alimentation à cuire

Quand un ustensile de cuisson est déposé sur la plaque absorbante d'un cuiseur solaire boîte, orienté vers le soleil, les trois modes de transfert de chaleur expliqués précédemment interviennent dans le phénomène de cuisson (Fig III.4).

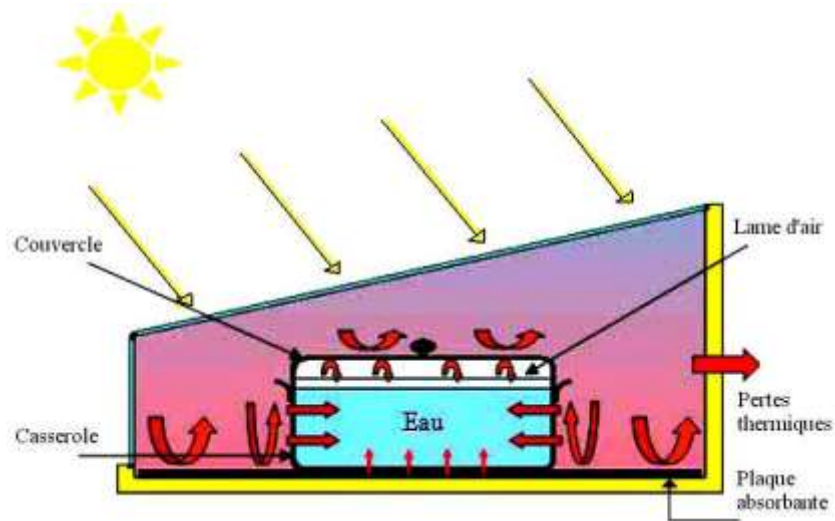


Figure III.4 : Schéma représentant le mécanisme de transfert de chaleur vers l'alimentation.

III.3.3. Simulation numériques du cuiseur

Le recours à la simulation numérique nous offre la possibilité de concevoir sur ordinateur notre modèle, d'intégrer toutes les caractéristiques techniques et de regarder le comportement de notre système en fonction des valeurs que nous entrerons. En résumé, le modèle numérique consiste d'une part à représenter géométriquement une configuration du modèle et d'autre part à établir les lois régissant son comportement.

En vue de prédire les performances de notre modèle de cuiseur en conditions réelles une simulation numérique du système de coordonnées cartésiennes : x, y, z (en 3D) a été mise en œuvre, notre choix s'est porté sur le logiciel Comsol Multiphysics. Plusieurs aspects importants dans la simulation de modèle à partir des méthodes d'Elément Finis (FEM) ont été pris en compte ; citant:

- l'avantage que présente cette méthode (géométrie complexes, non linéarités, couplage multi-physiques...).
- La pertinence de réaliser des modèles multi-physiques pour décrire le comportement des systèmes, qui intègrent plusieurs physiques (thermique... etc.)
- L'importance de valider le modèle établi par celui réalisé expérimentalement.

III.3.3.1. Présentation de notre plateforme de travail : COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de modélisation et de simulation de tout phénomène physique descriptible sous la forme d'équations aux dérivées partielles (EDP) (résolution par les éléments finis) [39] Flexible et performant pour l'étude des physiques couplées. Dans le paragraphe qui suit nous citons les étapes essentielles permettant la résolution d'un problème proposé. Il est reconnaissable par son logo (Fig III.5) qui est le suivant :



Figure III.5 : Logo du logiciel COMSOL Multiphysics 5.3

III.3.3.2. Méthodologie de conception et modélisation sous COMSOL

Le protocole à suivre avant de lancer une simulation sous Comsol est résumé par l'algorithme suivant :

1. Initialisation
2. Choix du système de coordonnées
3. Choix des modules à utiliser (la physique)
4. Choix de type de régime
5. La saisie des données

6. Établissement du modèle (dessin de la géométrie)
7. Choix des matériaux
8. Valeurs initiales et les conditions aux limites
9. Maillage
10. Lancement de simulation
11. Affichage graphique

➤ **Initialisation**

Dans ce qui suit on va détailler les étapes de simulation d'un modèle sous environnement COMSOL :

➤ **Choix du système de coordonnées**

Une fois le logiciel ouvert, il faut avant tout sélectionner le type de géométrie à simuler (1D, 2D ou 3D) comme indique la figure III.6 suivante :

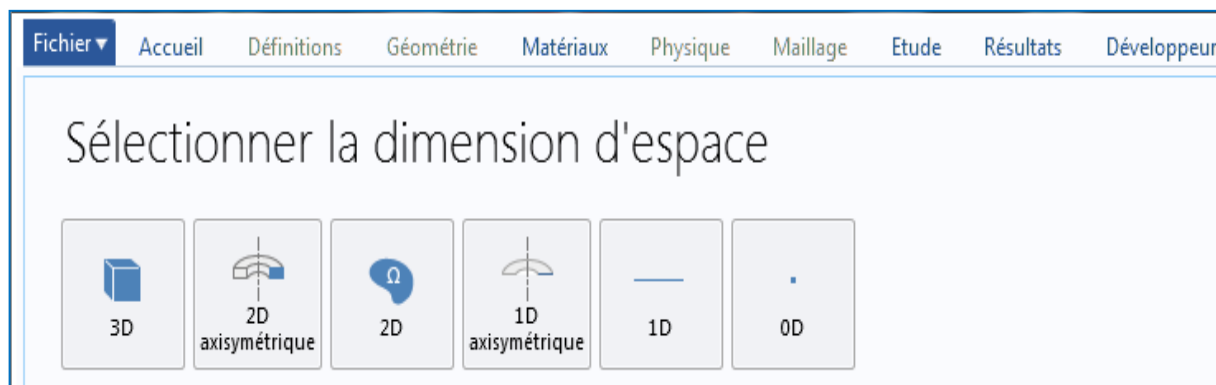


Figure III.6 : Type de géométrie à simuler.

➤ **Choix de la physique**

Le logiciel COMSOL Multiphysics dispose de tout un panel de modules : on peut citer les modules d'acoustique, de génie chimique, de mécanique des fluides, ...

Le comportement du cuiseur à étudier est régi par les équations de chaleur dans le solide et dans le fluide ainsi que l'écoulement dans les fluides. De ce fait, notre choix s'est porté sur le module « Ecoulement non isotherme » de la figure III.7, qui nous offre le moyen de résoudre des problèmes avec transfert de chaleur par convection, rayonnement et par conduction.

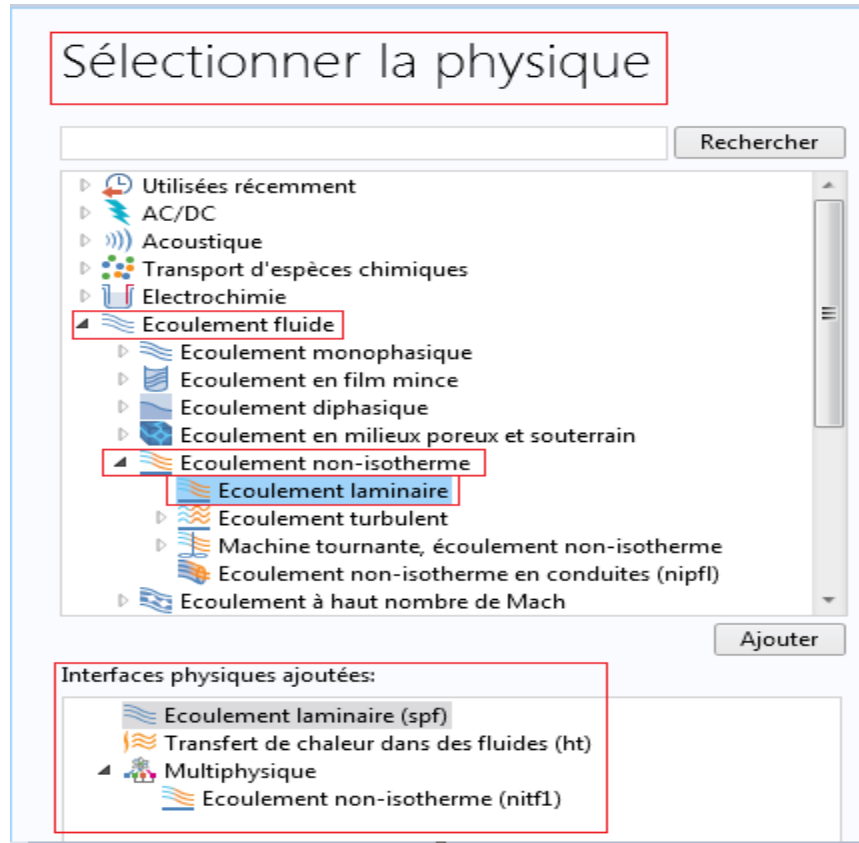


Figure III.7 : Fenêtre du navigateur de modèles : choix de la physique.

➤ **Choix de type de régime et construction du modèle**

Une fois que les étapes précédant sont établies et le régime d'étude est choisi (Fig III.8), on arrive à construire notre modèle comme indique la figure III.9 suivante :

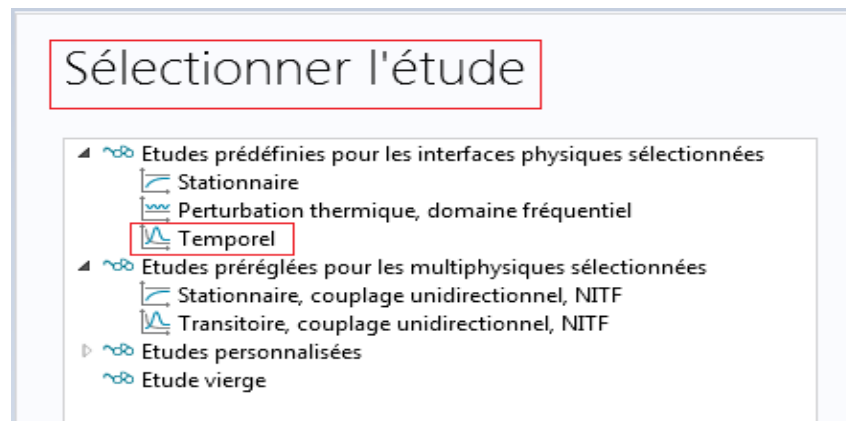


Figure III.8 : Choix du régime d'étude.

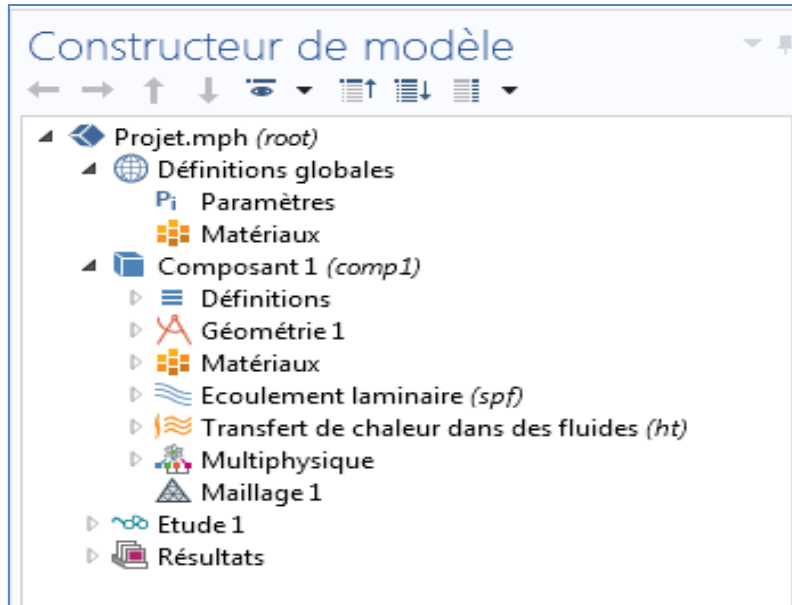


Figure III.9 : La constitution du modèle.

➤ **La saisie des données**

Dans les définitions globales, on introduit toutes les constantes et toutes les expressions qu'on regroupe sur le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques des matériaux :

Matériaux	Caractéristiques physiques
Verre La conductivité thermique du verre, λ_g Densité Capacité calorifique L'émissivité du verre, ϵ_g Le coefficient de transmission du verre, τ_g	1 W/m K 2210 730 0.88 0.92
Miroir La conductivité thermique, k Densité, ρ Capacité calorifique, C_p L'émissivité du verre, ϵ	10 [W/ (m·K)] 5000 [kg/m ³] 840 [J/ (kg·K)] 0
Aluminium La conductivité thermique, k Densité Capacité calorifique L'émissivité du verre, ϵ_g Absorptivité de l'absorbeur	238 2700 900 0.9 0.93

Isolateur thermique : Laine de verre La conductivité thermique, k Densité Capacité calorifique	0,03 à 0,04 [W/(m.K)] 25 à 30 [kg/m ³] 840 à 1000 [J/(kg.°C)]
Le caisson en bois La conductivité thermique de l'isolation, k Densité Capacité calorifique	0.13 [W/(m.K)] 500 [kg/m ³] 1600 [J/(kg.°C)]

➤ **Établissement du modèle (dessin de la géométrie)**

Une fois que les données sont saisies, on dessine la géométrie propre du modèle étudié comme illustré sur la figure III.10 suivante :

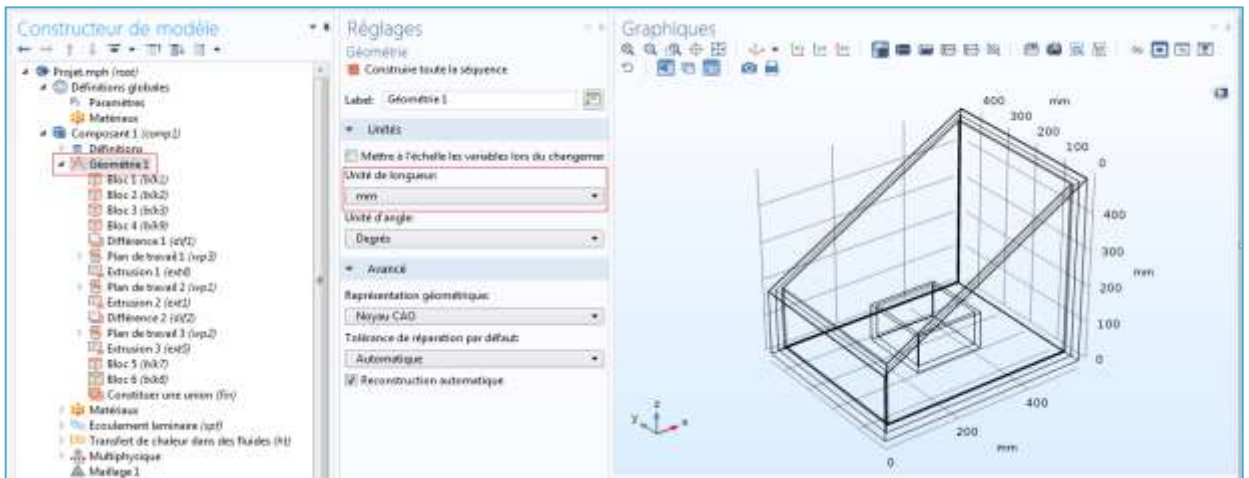


Figure III.10 : Dessin de la géométrie.

La géométrie finale en trois dimensions de notre modèle cuiseur solaire boîte développé sous COMSOL est représentée sur la figure III.11.

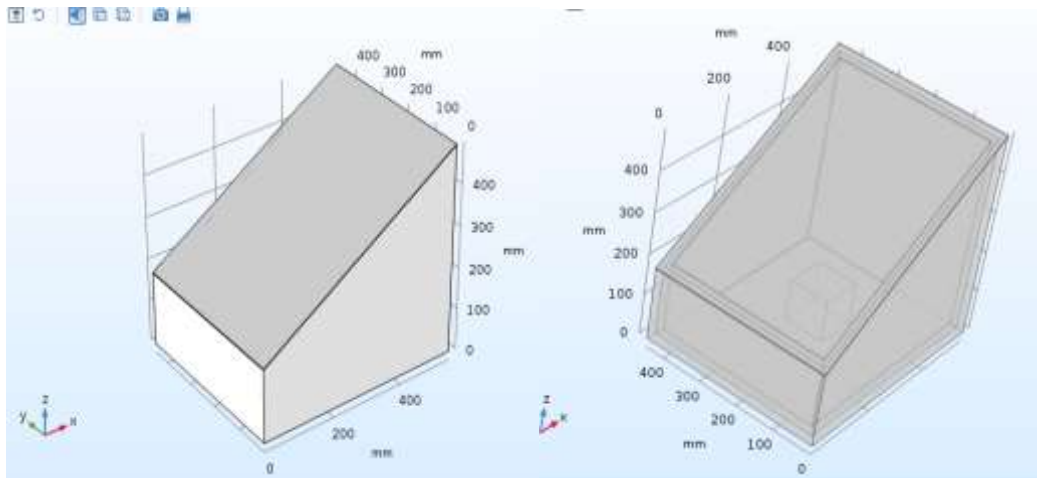


Figure III.11 : Vue en trois dimensions de la géométrie étudiée sous COMSOL.

➤ **Choix des matériaux**

On introduit les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans la fabrication de notre cuiseur (Fig III.12) :

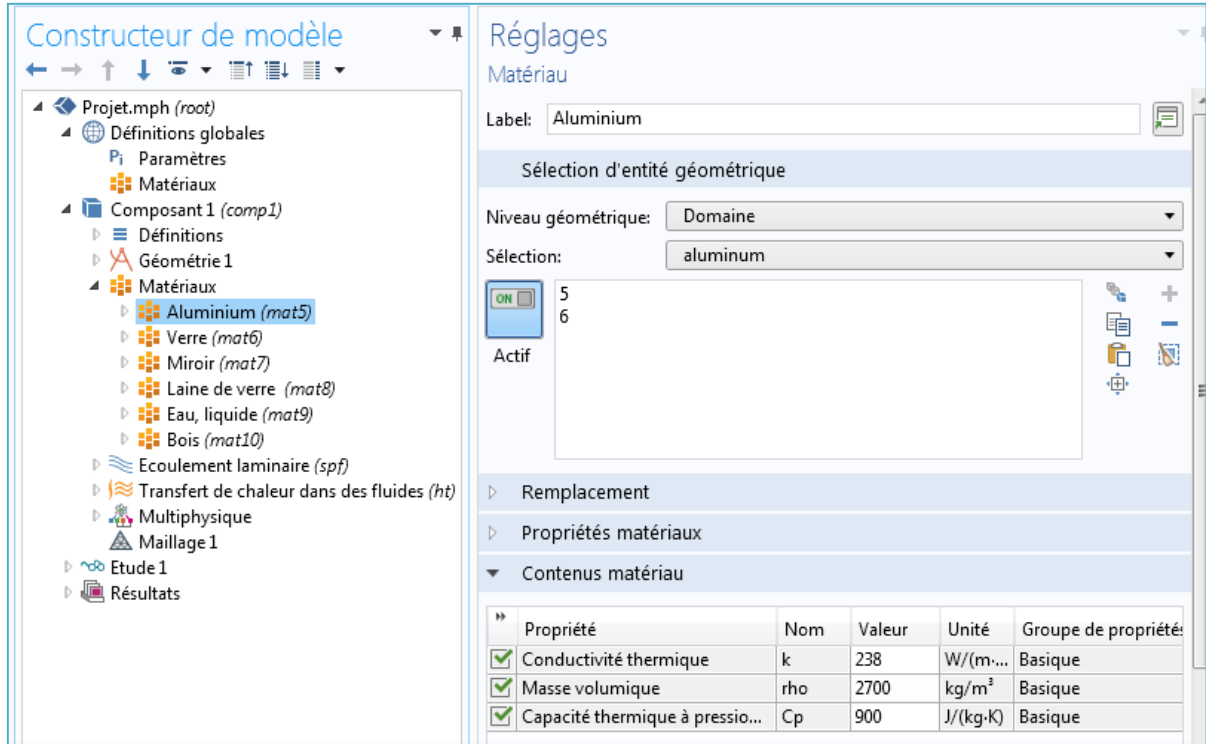


Figure III.12 : Choix des matériaux.

➤ **Valeurs initiales et les conditions aux limites**

Le cuiseur est un système qui fait intervenir un couplage de transfert thermique entre les différents éléments le constituant. Les différents modes de transfert thermique intervenant sont : les transferts par diffusion (conduction), par conducto-convection et par transfert radiatif (Fig III.13).

Le choix de module « Ecoulement non isotherme » convient à notre application, nécessite à fixer les valeurs initiales et les conditions aux limites correspondantes. La prise en compte de transfert de chaleur par rayonnement est donc nécessaire est fixée comme suit :

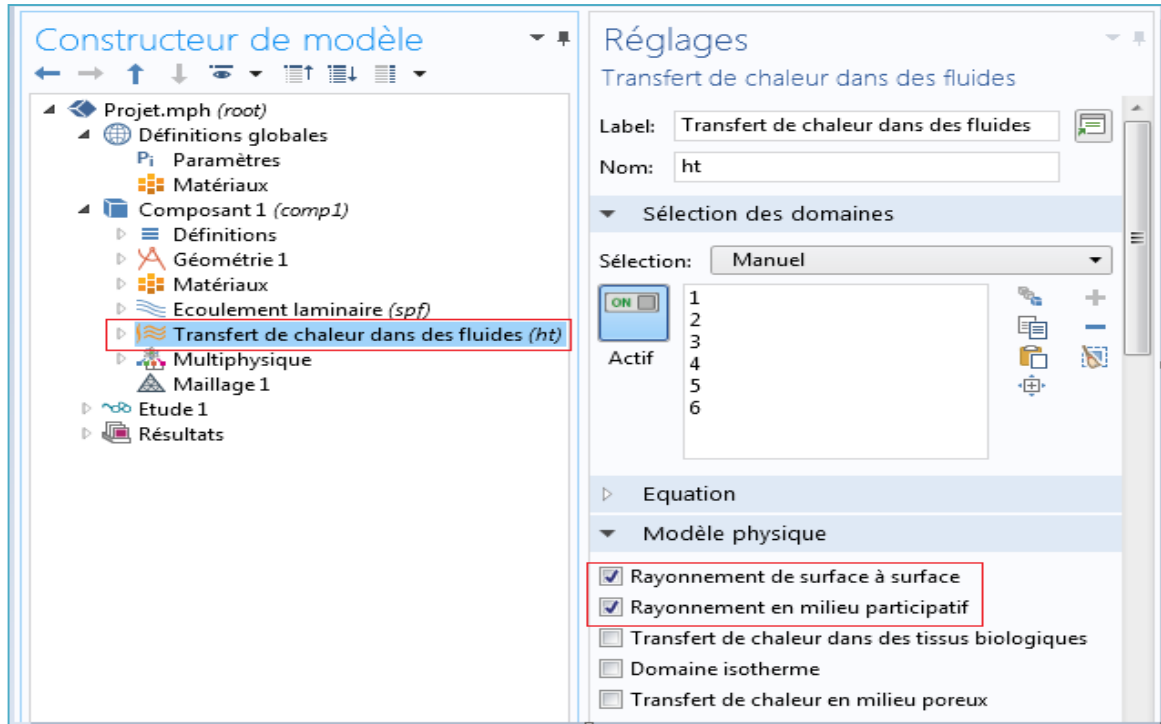


Figure III.13 : Sélection de transfert thermique radiatif.

➤ Maillage

Le maillage est une discrétisation du domaine en éléments finis, il dépend de l'espace mémoire du PC. Il permet de résoudre les équations de la physique sur ces petites parties en respectant les conditions aux limites classiques entre chaque maille (non discontinuité de certaines grandeurs, par exemple). Le maillage revêt donc une importance particulière. En effet, une géométrie maillée finement permettra un fort degré de précision et demandera plus de capacité mémoire. La figure III.14 ci-après représente le maillage de notre cuiseur boîte :

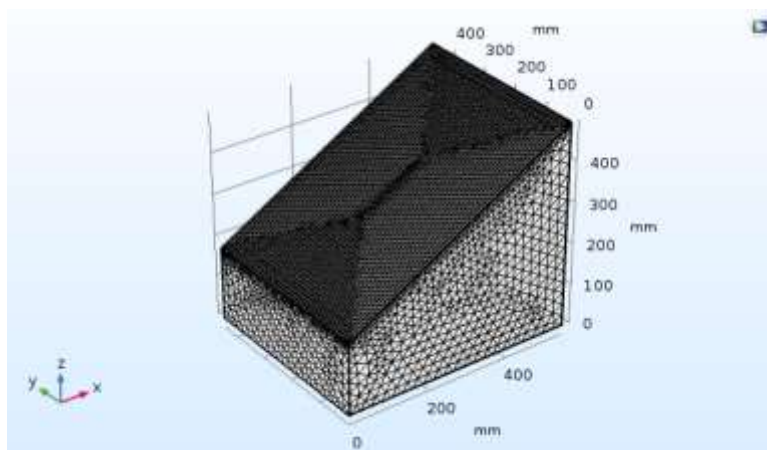


Figure III.14 : Maillage de la structure.

➤ **Lancement de simulation**

Lorsque le problème est complètement défini, il est mis sous forme matricielle avant le résoudre. La dernière étape est de lancer la simulation afin de permettre l'apparitions des résultats.

➤ **Affichage graphique**

Afin d'analyser le comportement énergétique de notre modèle de cuiseur en conditions réelles et en fonctions des variables liées aux conditions météorologiques, une simulation numérique en coordonnées cartésienne : x, y, z (en 3D) à l'aide de logiciel Comsol Multiphysics a été établie. Étant donné que le dispositif comprend une cavité contenant de l'eau, et que l'influence du rayonnement solaire sur la plaque vitré agité sur ce milieu. La figure III.15, montre un exemple de la répartition de la température dans le cuiseur pour un éclairage solaire de l'ordre de 1000 W/m^2 .

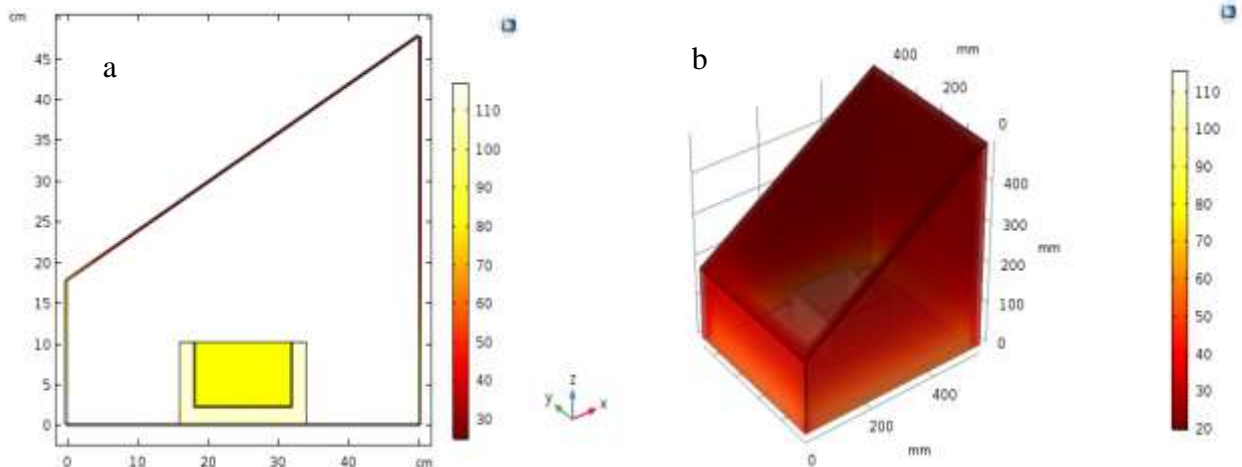


Figure III.15 : Répartition de la température de la géométrie étudiée sous COMSOL: (a) en deux dimensions (2D), (b) en trois dimensions (3D).

III.3.3.3. Résultats obtenus après simulation

La figure III.16 représente quelques résultats de la répartition de la température au niveau du cuiseur étudié en fonction du temps :

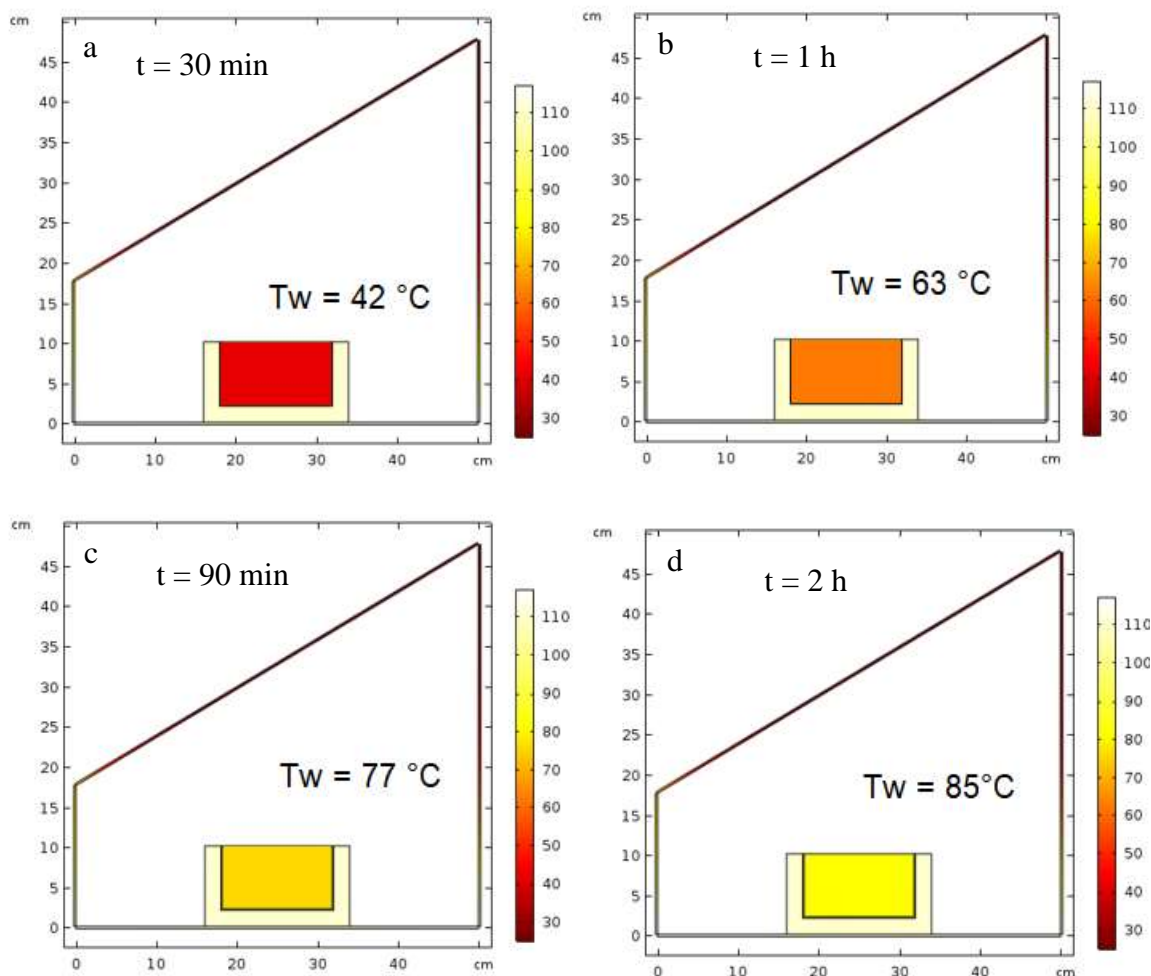


Figure III.16 : Répartition de la température de la géométrie étudiée sous COMSOL en deux dimensions (2D) en fonction du temps.

III.3.3.4. Autres résultats obtenus de la simulation

La simulation numérique peut effectuer une analyse paramétrique vise à clarifier et quantifier l'évolution de la température, en fonction des paramètres météorologiques tel que l'éclairement solaire IG. Une étude paramétrique a été menée sur le cuiseur afin d'évaluer l'influence de rayonnement solaire sur ses performances énergétiques. La plage de rayonnement solaire varie entre (800 – 1000 W/m²) avec un pas de 50 W/m², pour montrer son influence sur la température de la plaque d'Aluminium et sur la température du fluide (Fig III.17).

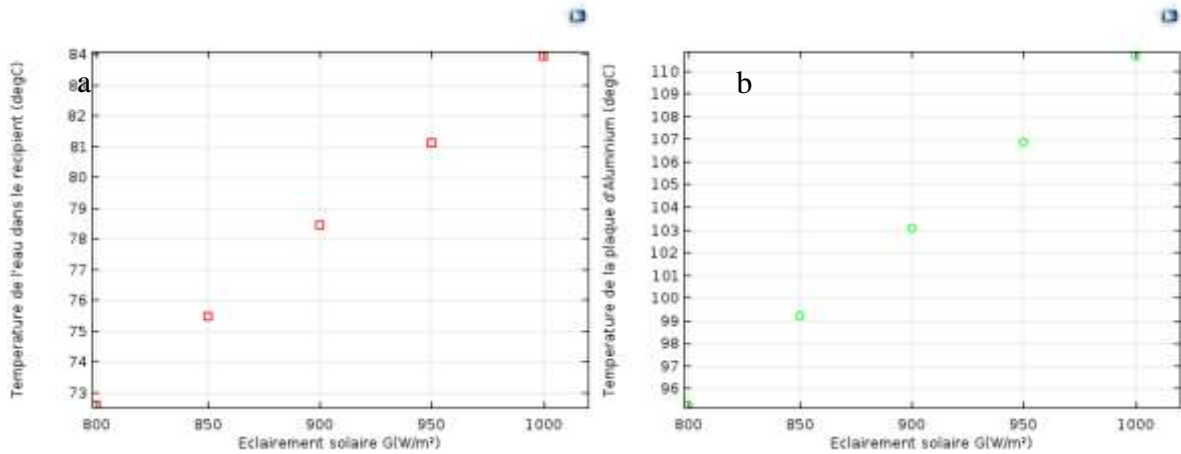


Figure III.17: Evolution de température en fonction de l'éclairement solaire: (a) de l'eau dans le récipient, (b) de la plaque absorbante.

III.4. Evaluation des performances énergétiques du cuiseur boîte

III.4.1. Méthodologies de test adoptées

III.4.1.1. Méthode de tests suggérée par Mullick et al.

Le test et l'évaluation des performances thermiques des cuiseurs solaires sont nécessaires pour la caractérisation de ces dispositifs. Mullick et al. ont développé une procédure de test thermique pour les cuiseurs solaires boîtes [40]. Selon cette procédure, une méthode d'essai complète suivant la Norme IS13429: 2000 est disponible pour le test de ces systèmes [41]. 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 de mérites, F1 et F2) sur la base des relevés des profils thermiques sans tenir compte de l'effet du miroir réflecteur.

Expérimentalement, F1 est une mesure de la différence de température gagnée par la plaque absorbante à un stade particulier de l'éclairement solaire ; elle est obtenue en utilisant la relation suivante :

$$F_1 = \frac{\eta_o}{U_L} = \frac{T_{ps} - T_{as}}{I_s} \quad (\text{III.6})$$

La seconde figure de mérite F2 est dérivée du test de chaleur sensible sous des conditions de pleine charge. Elle est donnée par la relation suivante [40, 41] :

$$F_2 = \frac{F_1(mc_p)_w}{A_{sc}\tau} \ln \left[I - \frac{I}{F_1} \left(\frac{T_{wi} - \bar{T}_a}{\bar{I}_s} \right) \right] / \left[I - \frac{I}{F_1} \left(\frac{T_{wf} - \bar{T}_a}{\bar{I}_s} \right) \right] \quad (\text{III.7})$$

Selon les Normes de Mullick [40], 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 de la manière suivante :

$$\tau_{boil} = \frac{-F_1(mc_p)_w}{F_2 A_{sc}} \ln \left[I - \frac{I}{F_1} \left(\frac{100 - T_a}{\bar{I}_s} \right) \right] \quad (\text{III.8})$$

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

III.4.1.2. Méthode de tests suggérée par Funk

Les performances thermiques des cuiseurs solaires peuvent être évaluées selon la procédure du Standard International développé par Funk [42]. 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 [42]. 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 :

$$P = \frac{(M_w \cdot C_w) \cdot \Delta T_w}{\Delta T} \quad (\text{III.9})$$

Funk [42] 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'éclairéments, la puissance de cuisson ajustée est donnée par l'équation (III.07; III.08). où \bar{I}_s est l'éclairément solaire moyen, I_n est l'éclairément solaire standardisé à 700 W/m².

$$P_{adj} = P \frac{I_n}{\bar{I}_s} \quad (\text{III.10})$$

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'éclairement 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'éclairement direct normal.

III.4.2. Matériel et expérimentation

III.4.2.1. Données utilisées

Actuellement ; en Algérie, la mesure des données de l'éclairement solaire est effectuée d'une manière instantanée, constante et sur certains sites seulement de l'Algérie. Nous avons choisi le site de Ghardaïa pour cette étude, le choix du site s'est porté sur la disponibilité des données radiométriques recherchées. En effet, les données de l'éclairement solaire (global, diffus, global incliné et direct normal) utilisées provient de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, 'URAER'. Le rayonnement solaire global est mesuré avec un pyranomètre CMP21 de Kipp & Zonen, tandis que rayonnement solaire direct normal est mesuré avec un pyréliomètre CHP1 de Kipp & Zonen (Fig III.18). Les données sont enregistrées par pas de 1 minute et stockées sur disque d'un micro-ordinateur.



Figure III.18: Station radiométrique de l'URAER (Ghardaïa).

III.4.2.2. Description du cuiseur solaire boîte

Le cuiseur conçu, sera tronqué de forme trapézoïdale de manière à avoir une surface d'ouverture inclinée (Fig III.19) 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. Les dimensions du cuiseur choisi sont les suivantes : 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. Les constituants du cuiseur après réalisation sont les suivants : 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.

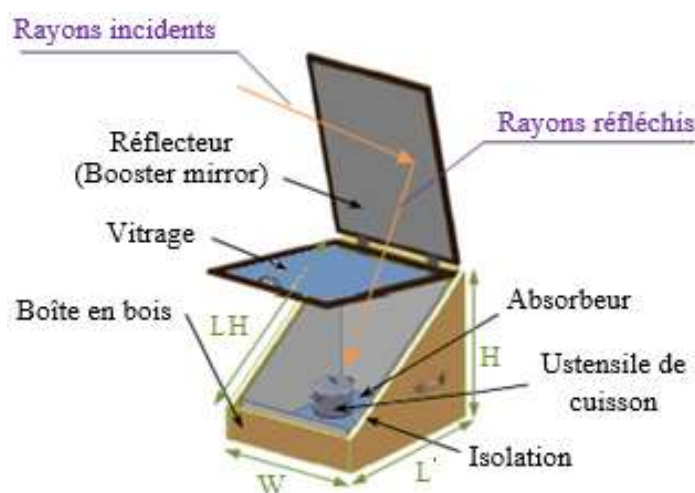


Figure III.19: Schéma de conception du cuiseur boîte et une vue prise lors du test à l'URAER.

III.4.2.3. Ajustement du cuiseur

La quantité d'énergie produite par les cuiseurs solaires dépend de la quantité de lumière à laquelle ils sont exposés. Étant donné que la position du soleil change pendant la journée et afin de collecter un maximum de rayonnement solaire, les cuiseurs solaires doivent être réorientés en continu vers le soleil, en suivant sa course pendant la cuisson (Fig III.20).

Si l'on considère les deux principaux types de cuiseurs : boîtes et paraboliques, le suivi continu reste difficile, en particulier lorsque le cuiseur est chargé (types boîtes) et lorsqu'un dispositif de suivi manuel est utilisé (types paraboliques). Un système automatique de suivi du soleil utilisant des vérins électriques ou des moteurs n'est pas intéressant pour des raisons de rentabilité dans le cas de la boîte et en raison du coût et de la complexité dans le cas des cuiseurs paraboliques. Dans la plupart des cas, un suivi manuel est effectué à différents intervalles pendant le temps de cuisson. Les performances optiques et thermiques des cuiseurs solaires peuvent être optimisées si les cuiseurs sont orientés efficacement ; de telle sorte que les rayons solaires incidents tombent sur les récepteurs avec un angle d'incidence nul, donc les pertes optiques seront minimisées (Fig III.21). Notre CSB suit les mouvements du soleil manuellement pendant 15 min d'intervalle.

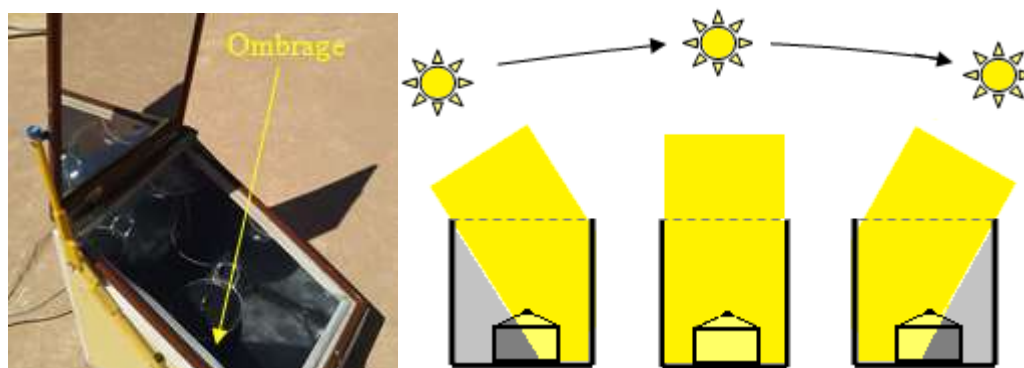


Figure III.20: Illustration de l'effet du non-ajustement des cuiseurs boîtes : (a) ombrage exercé sur l'absorbeur ; (b) différentes positions par rapport au soleil.

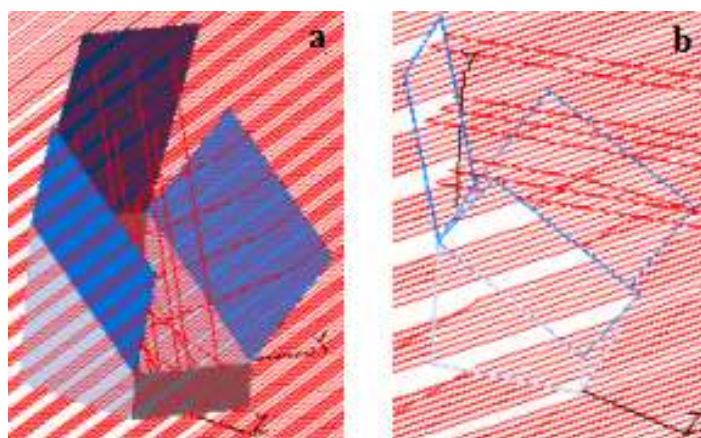


Figure III.21: Schéma de la trajectoire des rayons solaires incidents sur le cuiseur dans cas d'une bonne orientation et d'une absence d'orientation (déviation des rayons).

III.4.2.4. Schéma synoptique de la chaîne de mesure

La figure III.22, 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 [43], connectée à son tour à un micro-ordinateur par le baie d'un port USB. Le port USB, permet un grand nombre d'application avec une faible contrainte d'encombrement au point de vue fils de connexion.

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

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

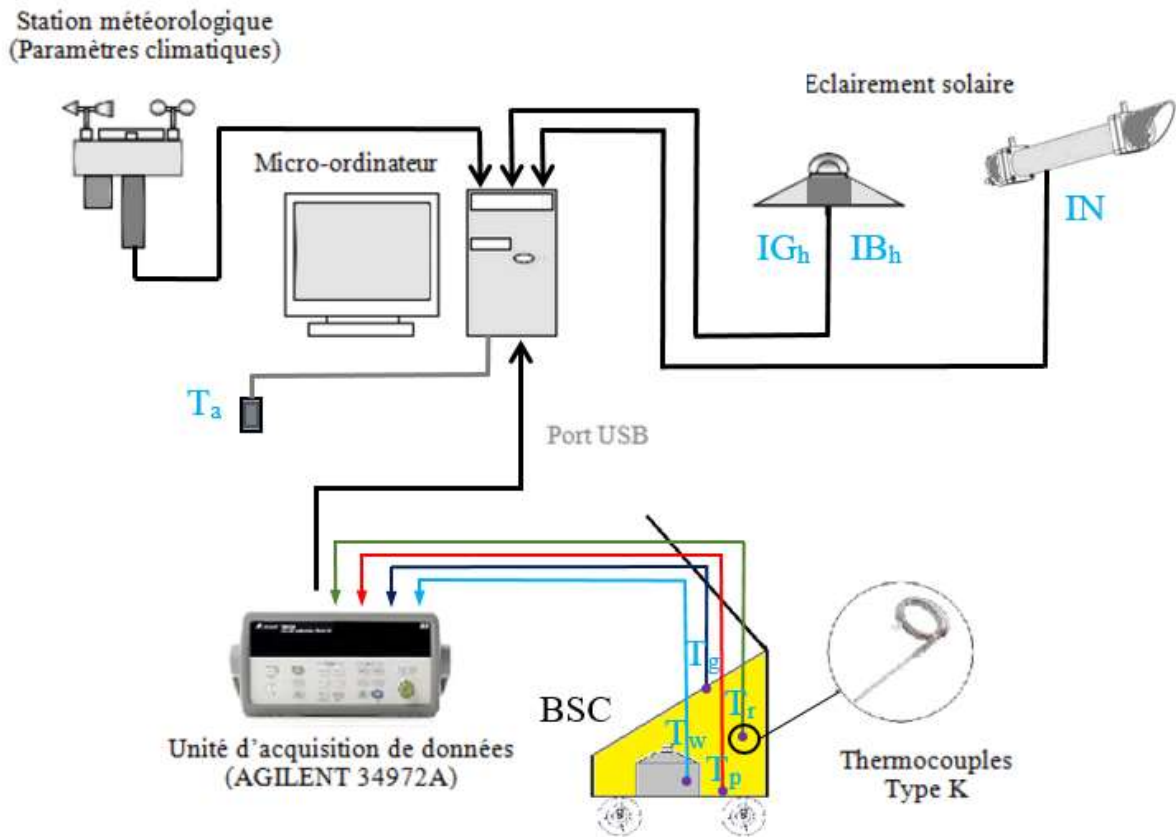


Figure III.22 : Schéma synoptique de l'installation des cuiseurs solaires.

III.4.2.5. 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. 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 III.23) et sauvegardées sur un fichier qu'on peut importer sur Excel.



Figure III.23: Visualisation des températures sur un micro-ordinateur connecté à une unité d'acquisition de donnée.

III.5. Résultats expérimentaux

III.5.1. Description des tests effectués

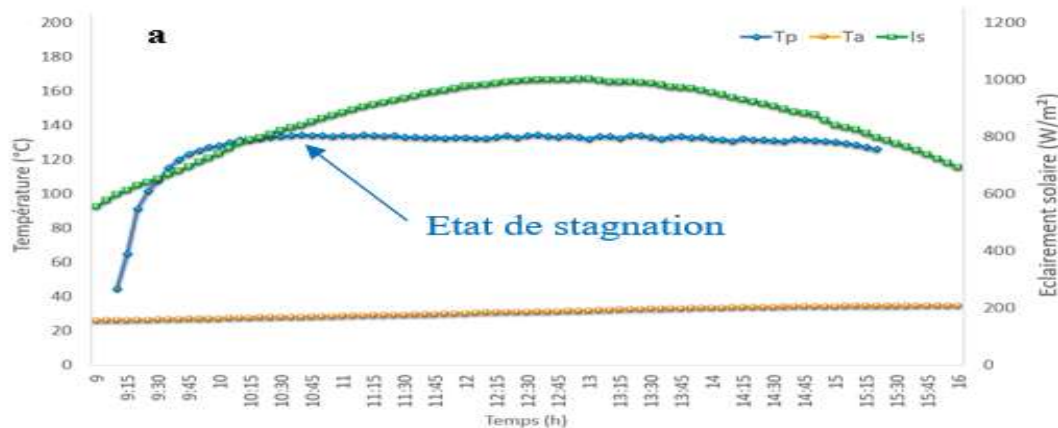
Les tests expérimentaux ont été réalisés à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables, située à Ghardaïa, Sud de l'Algérie (32.39 °N, 3.78 °E, 463 m au niveau de la mer) de 9 h à 15 h (ALT). Au cours de la période expérimentale, la température ambiante (T_a), la température de l'eau dans le pot (T_w), la température de la plaque absorbante et de l'air, l'éclairement solaire incident sur le cuiseur (IG) et la vitesse du vent (W_s) ont été relevés et enregistrés à un intervalle de temps régulier. L'éclairement solaire global incident a été mesuré à l'aide d'un pyranomètre Kipp & Zonen CMP21 et l'éclairement solaire direct normal est mesuré avec un pyréliomètre K & Z CHP1, en W/m^2 . La vitesse du vent (en m/s) a été mesurée en utilisant un anémomètre NRG 40H.

La précision de l'anémomètre est de l'ordre de $1\% \pm 0.1$ 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 et différents du cuiseur boîte et sont utilisés pour mesurer la température au niveau de l'absorbeur, la vitre et l'air. Un thermocouple spécial a été inséré depuis un trou percé dans le couvercle du l'ustensile peint en noir et immergé dans l'eau à l'intérieur du l'ustensile de cuisson à 20 mm au-dessus du fond de celui-ci. La mesure des paramètres climatiques et expérimentaux est ensuite réalisée à travers le système d'acquisition de données par ordinateur (data-logger AGILENT 34972A) pour un intervalle de 5 minutes.

III.5.2. Graphes caractérisant les paramètres F1 et F2

Les variations de l'éclairement solaire global incident sur le plan horizontal de l'absorbeur (I_s), la température ambiante (T_a) et la température de la plaque absorbante du cuiseur (T_p), mesurées dans des conditions de test de stagnation, sans charge et sans réflecteurs, par ciel clair et en absence du vent, sont représentées sur la figure III.24, pour la saison d'été. Pour ce test expérimental de stagnation, la première figure de mérite F1 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.

La valeur correspondante pour F2, calculée à partir des profils thermiques de températures estivales (Fig III.24b) s'élève à 0.333 (en utilisant $\bar{I}_s = 969.2$ W/m², $\bar{T}_a = 32.1$ °C, $T_{wi} = 62.8$ °C, $T_{wf} = 90.2$ °C, $\tau = 70$ min et $F1 = 0.129$ m²°C/W).



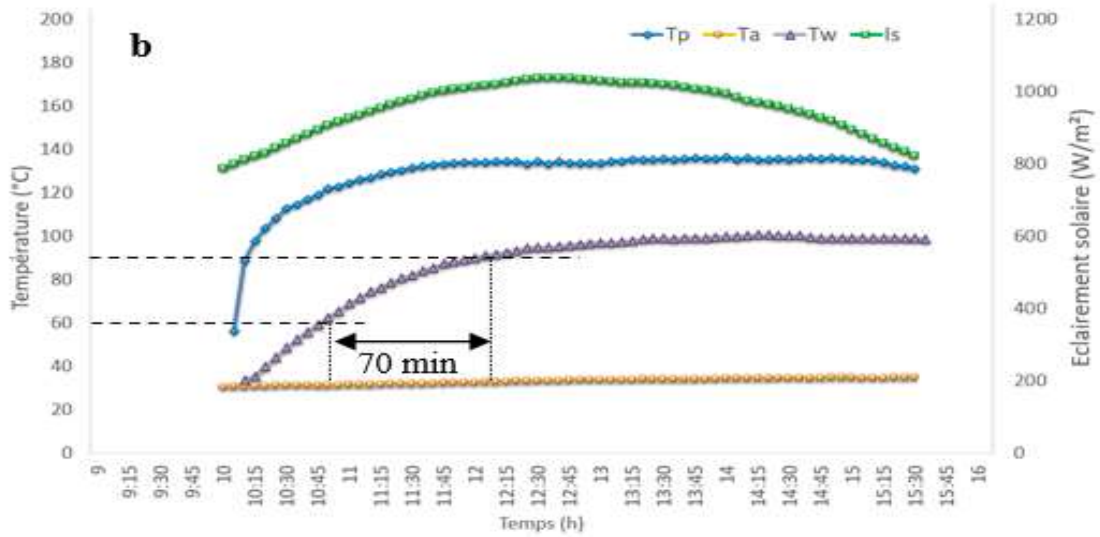


Figure III.24: Variations journalières de l'éclairement solaire et des profils des températures mesurées, sous des conditions de test de : (a) stagnation, (b) chaleur sensible, pour un jour d'été.

Selon Mullick et al. [40], la première figure de mérite F1 varie entre 0.12 et 0.16. Une valeur élevée de F1 indique un bon rendement optique η_0 et un faible facteur de pertes en chaleur UL. La seconde figure de mérite F2 varie entre 0.254 et 0.490 en fonction de la charge et du nombre d'ustensiles utilisés (Mullick et al. [44]). Une valeur élevée de F2 (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.

III.5.3. Graphes de la puissance de cuisson

La surface d'interception calculée de notre cuiseur est de 0.266 m², la charge de l'eau pour le test de puissance de cuisson (Fig III.25) est prise donc égale à 2 kg réparti uniformément. Les valeurs de puissance de cuisson ajustée en fonction de la différence de température entre l'eau et l'ambiance (ΔT) sont représentées sur la figure III.25 b.

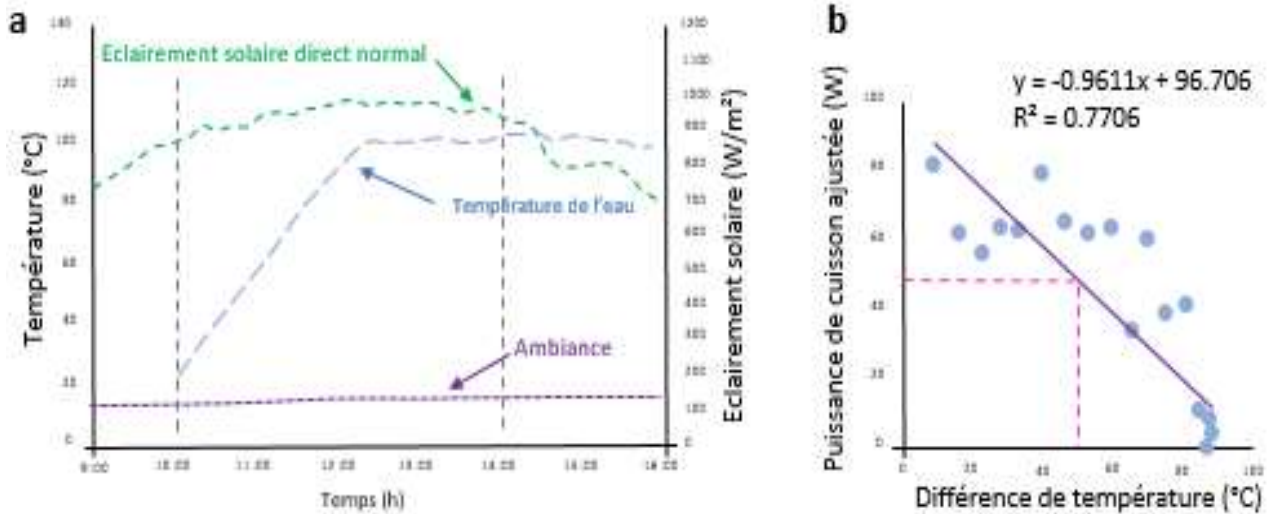


Figure III.25 : Expérimentation de la puissance de cuisson du cuiseur solaire réalisé : (a) variations journalières de l'éclairement direct normal et des températures de l'eau mesurées ; (b) puissance de cuisson ajustée en fonction de la différence de température.

A partir de la courbe de puissance de cuisson ajustée on obtient la valeur de puissance de cuisson initiale $P_{ini} = 97$ et la valeur de puissance de cuisson standardisée $P_{adj} = 48$ W. Le coefficient de perte obtenu à partir de la pente de la droite de régression est estimé à 0.96 W/°C et la valeur du coefficient de régression linéaire de détermination $R^2 = 0.77$, satisfait aux Normes des tests (meilleurs que 75 %). La relation suivante est déduite pour notre cuiseur solaire boîte réalisé :

$$P_{adj} = 96.706 - 0.9611(\Delta T) \quad (III.11)$$

III.6. Comparaison des résultats expérimentaux avec Comsol

On pourra remarquer d'après les résultats expérimentaux du cuiseur boîte durant un jour clair que : avec des valeurs d'éclairement solaire IG comprises entre 800 et 1000 W/m² durant la période expérimentale (moments de cuisson) que la température de l'absorbeur augmente à partir de la température ambiante (29 °C) jusqu'à atteindre la stagnation par principe de l'effet de serre. Ces températures sont transmises à l'eau après un certain intervalle de temps et l'eau sera ensuite chauffée à cet effet. En ce qui concerne la comparaison entre les valeurs mesurées et simulées on remarque qu'il existe un bon rapprochement entre les valeurs avec évidemment une marge d'erreur due aux hypothèses simplificatrices de la simulation (Fig III. 16b et Fig III. 24b). On peut

constater par exemple que la température expérimentale de l'eau dans l'ustensile atteint 48°C après 30 min d'exposition, alors que la température donnée par la simulation est de 42°C (Fig III.16a). Même remarque après une heure de chauffage, la simulation affiche 63 °C (Fig III.16b) et la mesurée est au environ de 70°C. Une température convenable à la cuisson (85 °C) est atteinte par le cuiseur après 90 min, la valeur simulée est de 77 °C (Fig III.16c). Après un temps de 120 min, la température de l'eau atteint 91 °C contre une valeur simulée de 85 °C (Fig III.16d).

Le tableau III.2ci-après donne un récapitulatif des résultats expérimentaux comparés avec les résultats du logiciel Comsol:

Tableau III.2 : Comparaison des résultats expérimentaux avec Comsol :

Temps [min]	Valeurs simulées [°C]	Valeurs expérimentales [°C]
30	42	48
60	63	70
90	77	85
120	85	91

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, une évaluation des performances du cuiseur solaire boîte est présentée. Les résultats des tests effectués sur le cuiseur sont illustrés et discutés. En plus une modélisation du comportement thermique du cuiseur en 3 dimensions et 2 dimensions sous le logiciel COMSOL software est effectuée afin de prédire les performances de ce système 'cuiseur solaire boîte' dans les conditions réelles. La modélisation permet de nous donner les différents potentiels et performances de notre système. C'est une étape très intéressante et très importante et aussi indispensable puisqu'elle permet d'aider chaque concepteur au choix des matériaux idéals, des dimensions réelles de dispositif avec ses orientations optimales ...etc. permettant de lui offrir un gain énergétique le plus optimal possible avant la réalisation du prototype. A la fin du travail, une comparaison entre les données mesurées et celles simulés est réalisée afin de démontrer l'efficacité de notre modèle. Néanmoins, la cuisson solaire reste une réalité, qui permet un mode de cuisson sain aux aliments avec des économies d'énergie et un respect à l'environnement ; dont il faut extraire les moindres avantages et essayer d'apporter de probables améliorations dans l'avenir.

CONCLUSION GENERALE

L'énergie solaire est, par conséquent, le rayonnement solaire résultant du processus de fusion nucléaire qui se déroule au Soleil. Cette énergie est la principale source d'énergie et, par conséquent, le moteur qui déplace notre environnement. L'énergie solaire que nous recevons par rayonnement solaire est directement ou indirectement responsable d'aspects aussi importants pour la vie que la photosynthèse, en maintenant une température sur la planète compatible avec la vie, le vent, etc. L'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre est 10 000 fois plus grande que l'énergie actuellement consommée par toute l'humanité.

L'énergie solaire présente divers avantages. Elle fait partie des énergies renouvelables permettant de produire de l'électricité sans matière première et sans impact sur l'environnement. Elle peut être utilisée pour répondre à un large éventail de besoins (alimenter les appareils électroménagers, le système de chauffage, la chaudière...)

Apparue dans les années 1970, la cuisine solaire consiste à préparer des plats à l'aide d'un cuiseur ou d'un four solaire. Les petits fours solaires permettent des températures de cuisson de l'ordre de 150 °C, les paraboles solaires permettent de préparer les mêmes plats qu'une cuisinière classique à gaz ou électrique.

L'utilisation de l'énergie solaire pour la cuisson des aliments, au-delà d'être gratuite et abondante sur certaines zones géographiques, permet également de réduire la déforestation dans certains pays où la cuisine au bois et au charbon est la norme. Elle permet par la même occasion la diminution des émissions de CO_2 dans l'atmosphère, d'environ 4 tonnes de CO_2 par an pour une famille africaine cuisinant au bois par exemple.

Dans ce contexte et dans le cadre de ce travail, nous avons fait une étude comparative entre un modèle de cuiseur solaire boîte établi par logiciel Comsol et des valeurs expérimentales issues de l'expérimentation du cuiseur et nous avons pu constater que notre modèle présente un bon rapprochement des données expérimentales avec une marge acceptable d'erreur. A l'issue de cette étude, nous avons constaté que l'utilisation d'un cuiseur solaire peut réaliser des économies sur la facture de consommation d'énergie, et aussi il est un bon ami de l'environnement. Pour cela, il est important que le pays commence à maîtriser cette technologie pour bénéficier de ses avantages à l'avenir, équilibrer sa consommation en introduisant de plus en plus l'énergie solaire thermique et des énergies renouvelables en terme général.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Yettou F. Application et Eclairage Solaire. Cours, Université de Ghardaïa, Algérie,(2019).
- [2] Yettou F. Conception et réalisation d'un système de cuisson solaire destiné au site saharien (Ghardaïa, Algérie). Thèses de Doctorat en science, Université de Batna, Algérie, (2015).
- [3] M. Capderou, 'Atlas solaire de l'Algérie', Modèles théoriques et expérimentaux, Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [4] R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, 'Le rayonnement solaire, Conversion thermique et applications', Technique & documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.
- [5] J.M. Chasseriau, 'Conversion thermique du rayonnement solaire', Ed. Dunod, France, 273 p., 1984.
- [6] A. Khedim, 'L'énergie Solaire utilisation thermique et photovoltaïque', ANEP, 359 p., 2005.
- [7] A. Labouret, 'Energie solaire photovoltaïque', Ed. Dunod, France, 302 p., 2003.
- [8] Yettou F. Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude. Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique, Alger 2009.
- [9] F. Linke, 'Transmissions – Koeffizient und Trübungsfaktor', Beiträge zur Physik der Atmosphäre, Vol. 10, pp. 91 – 103, 1922.
- [10] F. Kasten, 'A Simple Parameterization of Two Pyrheliometric formulae for determining the Linke Turbidity Factor', Meteorology Rdsch, Vol. 33, pp. 124 - 127, 1980.
- [11] K. Feussner and P. Dubois, 'Trübungsfaktor, Precipitable Water', Staub. Gerlands Beitr., Geophysical, Vol. 27, pp. 132 - 175, 1930.
- [12] A. Louche, G. Peri and M. Iqbal. 'An analysis of Linke Turbidity Factor'. Solar Energy. Vol. 37, N°6, pp.393 - 396, 1986.
- [13] J. Hofierka and M. Sári, 'The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications', Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [14] Solar cookers, How to make, Use and enjoy, 10th Edition, 2004, solarcookers.org.
- [15] http://solarcooking.wikia.com/wiki/Solar_Cooking_NV
- [16] <http://solarcooking.org/directory.htm>
- [17] F. Yettou, A. Gama, B. Azoui, A. Malek, Etude comparative entre deux types de cuiseurs solaires boites en milieux arides, 2eme Seminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables (SIENR12), 15-17 Octobre 2012, Ghardaia - Algerie.

- [18] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek, N. L. Panwar, A. Gama, T. Arrif, H. Merarda, Comparative assessment of two different designs of box solar cookers under Algerian Sahara conditions, *Revue des Energies Renouvelables CDER*, Volume 18, Numero 2, pages 227-234, Juin 2015.
- [19] F. Y. Gama, B. Azoui, A. Malek, N.L. Panwar, A. Gama, Energetic and exergetic valuation of solar box cooker in Algerian climatic conditions, *Int. J. Exergy*, Vol. 16, No. 3, pp.337–357, (2015).
- [20] F. Yettou, A. Gama, N. L. Panwar, A. Malek, B. Azoui, A. Kacem, Simulation of concentrating irradiance and experimental study on solar parabolic dish concentrator, 2nd International Conference on Energy Systems (ICES2016), 21 - 23 December 2016, Istanbul - Turkey.
- [21] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek, A. Gama, T. Arrif, H. Merarda, R. Khelifi, Contribution à la cartographie de l'efficacité d'un cuisinier solaire de type boîte en Algérie – Résultats préliminaires –, 1^{ère} Conférence Nationale sur les Energies Renouvelables et leurs Applications (CNERA'14), 18-19 Février 2014, Adrar - Algérie.
- [22] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek, A. Gama, N. L. Panwar, Estimation et cartographie des températures d'un cuisinier solaire boîte avec et sans réflecteur en Algérie, 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables (SIENR14), 13-14 Octobre 2014, Ghardaia - Algérie.
- [23] La cuisson solaire et la cuisine avec un four solaire, le Sun Cook 200..html
- [24] <http://wikipedia.com>.
- [25] [http://lowtechlab.org/wiki/Four_solaire_\(cuisinier_type_boite\)](http://lowtechlab.org/wiki/Four_solaire_(cuisinier_type_boite))
- [26] Solar Cooking, SCInet, [En ligne]. Available: <http://solarcooking.org/>.
- [27] Solar Cookers International, SCI, [En ligne]. Available: <http://www.solarcookers.org>.
- [28] C fait maison, 2014. [En ligne]. Available: <http://www.cfaitmaison.com>.
- [29] A. Dizier, F. Pignon, «Manuel de cuisson solaire,» Edition commune SCI / iD COOK, Paris, France, 2005.
- [30] Christelle Souriau & David Amelin, La collection Pro-Agro est une coédition d'Ingénieurs Sans Frontières Cameroun (ISF Cameroun) et du Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA). CTA – P.O. Box 380 – 6700 AJ Wageningen – Pays-

Bas – www.cta.int ISF Cameroun – BP7105 - Douala-Bassa - Cameroun – www.isf-cameroun.org . CTA et ISF 2014.

- [31] Thirugnan a sambandam M, Iniyar S, Goic R. A review of solar thermal technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14:312–322.
- [32] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek, A. Gama, N. L. Panwar, Solar cooker realizations in actual use : An overview, *Renew Sustain Energy Rev*,2014;37:288–306.
- [33] Nahar NM. Design, development and testing of a double reflector hot box solar cooker witha transparent insulation material. *Renewable Energy* 2001;23:167–79.
- [34] Mohamad MA, EI-Ghetany HH, Dayem AMA. Design, construction and field test of hot - box solar cookers for African Sahel region. *Renewable _Energy* 1998;14(1–4):49–54.
- [35] Amer EH. Theoretical and experimental assessment of a double exposure solar cooker. *Energy Conversion and Management* 2003;44:2651–63.
- [36] Buddhi D, Sahoo LK. Solar cooker with latent heat storage: design and experimental testing. *Ener Convers Manage*1997;38:493–8.
- [37] Sharma SD, Iwata T, Kitano H, Sagara K. Thermal performance of a solarcooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit. *Solar Energy* 2005;78:416–26.
- [38] Ozturk HH. Experimental determination of energy and exergy efficiency of the solar parabolic-cooker. *Solar Energy* 2004;77:67–71.
- [39] G,Ardilz Rodrigues , G,Ablart, A,Cazarre , C,Rossi « Introduction à la Modélisation Multiphysique de Microsystèmes sous l'environnement COMSOL Multiphysics » Rapport LAAS No08757, 10èmes Journées Pédagogiques du CNFM, Saint Malo (France), Novembre 2008.
- [40] Mullick SC, Kandpal TC, Sexena AK, «Thermal test procedure for box type solar cooker,» *Solar Energy*, vol. 39, n° %14, pp. 353-360, 1987.
- [41] 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.
- [42] Funk PA, «Evaluating the international standard procedures for testing solar cookers and reporting performance,» *Solar Energy*, vol. 68, n° %11, pp. 1-7, 2000.
- [43] ‘34972A LXI Data Acquisition’, keysight, 2000-2014. Available online at: <http://www.keysight.com/ja/pd-1756491-pn-34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unit?&cc=DZ&lc=eng>.
- [44] 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.