

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi –Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme

De Master Académique en Génie Mécanique

Option : Énergétique

Thème :

***Contribution à l'étude du comportement
thermique d'un cuiseur solaire boîte installé dans
le Nord de l'Algérie***

Présenté par : M^{elle} Hermime Nora

Dirigé par : M^r LAMROUS Nacer

PROMOTION 2012-2013

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant pour m'avoir accordé la puissance et la volonté de terminer ce modeste travail.

Je remercie mon promoteur Mr LAMROUS NACER pour avoir bien voulu m'encadrer et pour ses précieux conseils.

Je remercie mes très proches amis

Mes remerciements vont également à tout mes enseignants, les responsables et personnel du département de Génie mécanique.

J'adresse mes plus vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail

Je dédie ce modeste travail :

A mon père, ma mère pour leur amour, leur bonté, leur sacrifice, leurs encouragements perpétuels, leur soutien, puisse Dieu prolonger leur vie dans le bonheur.

A mon mari Aziz qui m'a soutenu dans les moments difficiles, et qui a tout partagé avec moi, y compris les moments les plus durs de mon parcours de thèse, depuis sa conception jusqu'à sa réalisation.

A ma sœur Nassima et son mari Youcef

A ma sœur Tassadit et son mari Ibrahim

A mes frères Said et M'hamed

A la mémoire de ma grande mère Tassadit

A tous ceux que j'aime

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : Le concept de la cuisson solaire.....	3
I.1- Introduction.....	4
I.2-Définition.....	4
I.3-Historique.....	4
I.4-Principe du fonctionnement du cuiseur solaire	6
I.5-Les différents types de cuiseurs solaires.....	6
I.5.1- Les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur.....	6
➤ Les cuiseurs directs.....	6
❖ <i>Type boîte</i>	6
❖ <i>Les cuiseurs à concentration</i>	8
• Type parabolique.....	8
• Cylindro-parabolique	8
• Type sphérique.....	8
• Type à panneaux.....	9
➤ Type indirect.....	10
• Avec panneaux solaire plats collecteurs.....	10
• Avec tube collecteur.....	11
• Avec collecteur à concentration.....	11
I.5.2- Cuiseur solaire avec stockage de chaleur.....	11
✓ Stockage de chaleur sensible.....	12
✓ Cuiseurs solaires avec stockage de chaleur latente.....	12
I.6 -Les avantages et les inconvénients du cuiseur solaire.....	13
I.7-Brève revue bibliographique des travaux effectués dans le domaine de la cuisson solaire dans le monde et en Algérie.....	15

CHAPITRE II : Conception d'un cuiseur solaire pour le Nord de l'Algérie.....	19
II .1-Introduction.....	20
II .2-Gisement solaire.....	20
II .2.1-La constante solaire.....	20
II.2.2- Mouvement du Globe Terrestre.....	21
II.3. La sphère céleste.....	22
II.4- Les coordonnées célestes.....	22
II.4.1- Les coordonnées géographiques.....	22
• <i>Longitude l</i>	22
• <i>Latitude φ</i>	22
II.4.2- Les coordonnées horaires.....	23
• <i>La déclinaison solaire δ</i>	23
• <i>Angle horaire w</i>	24
• <i>Le temps solaire vrai</i>	24
II.4.3- Les coordonnées horizontales	25
• <i>Hauteur angulaire du soleil h</i>	25
• <i>Azimut a</i>	25
• <i>Angle zénithal z</i>	25
II.5-Rayonnement solaire.....	25
II.5.1-Puissance et énergie reçues par un récepteur plan.....	26
II.5.1.1- Grandeur directe	26
II.5.1.2- Grandeur diffuse	28
II.5.1.3- Grandeur réfléchie.....	28
II .6-Gisement solaire disponible en Algérie.....	29
❖ Irradiation directe journalière reçue sur un plan horizontal et sur un plan normal en mois de décembre, Juillet.....	31
❖ Irradiation global journalière reçue sur un plan incliné à la latitude de lieu.....	32
II .7- Design du prototype de cuiseur solaire à étudier	34

II.7.1-les critères du design.....	34
II.7.3-Description du modèle à étudier	34
II.7.4-Transfert de chaleur vers l'aliment à cuire dans un cuiseur solaire boite.....	35
II.8-Paramètre influant sur le cuiseur solaire.....	36
II.8.1- Paramètres externes	36
II.8.2- paramètre internes.....	36
II.8.2.1- Paramètres de position.....	36
II.8.2.1- Paramètre de construction.....	36
a-Matériaux structuraux.....	37
b-Couvercle transparent	37
c-Plaque absorbante.....	39
d-Isolant.....	39
II.9- Pré-dimensionnement d'un cuiseur solaire en boite	40
II.9 1-La taille de cuiseur et le volume de la chambre de cuisson.....	40
II.9.2-Taux de concentration.....	40
II.9.3-Facteur de volume effectif.....	41
II.9.4-Surface de couverture transparente.....	41
II.9.5-L'épaisseur d'isolation du cuiseur.....	42
Conclusion.....	42
CHAPITRE III : Modélisation du prototype de cuiseur solaire étudié.....	43
III.1-Introduction	44
III.2-Description de cuiseur solaire étudié	44
III.3-Modélisation du cuiseur solaire étudié	45
III.4-les différents phénomènes radiatifs.....	46
III.5-Hypothèses simplificatrices de base	47
III.6-Schéma électrique équivalent du système.....	48
III.7-Ecriture des bilans énergétiques du système	48
III.7.1.1-Estimation de rayonnement solaire	48
III.7.1.2-Puissance solaire réfléchi par le réflecteur sur la surface de la vitre extérieure.....	49

III.7.1.3-Puissance solaire absorbée par la vitre extérieure.....	50
III.7.1.4-Puissance solaire absorbée par la vitre intérieure.....	50
III.7.1.5- Puissance solaire absorbée par la plaque absorbante.....	50
III.7.2-Bilans énergétiques des composants.....	50
III.7.2.1-Bilan énergétique de la vitre extérieure.....	50
III.7.2.2-Bilan énergétique de la vitre intérieure.....	53
III.7.2.3-Bilan énergétique de l'air intérieur.....	54
III.7.2.4-Bilan énergétique de la plaque absorbante.....	54
III.8- Résolution du système d'équations	55
❖ Structure du code de calcul	56

CHAPITRE IV : Exploitation du code de calcul et analyse des résultats de simulation

IV-1 Graphes des Températures pour le site de TIZI-OUZOU.....	58
IV-2 Graphes des Températures pour le site de TLEMCEN.....	59
IV-3 .Graphes des Températures pour le site d'EL BAYADH.....	60
IV.4-Résultats et discussion.....	61

Indexe des figures

Chapitre I

Figure I-1: Cuiseurs solaires de type boite.....	7
Figure I-2 : Cuiseur solaire à concentration.....	9
Figure I-3: Les différentes formes de cuiseurs solaires à panneaux.....	9
Figure I-4: Cuiseur solaire avec panneaux collecteurs plans.....	10
Figure I-5 : Les cuiseurs solaires indirects à concentration.....	11
Figure I-6 : Cuiseur solaire avec stockage de chaleur sensible.....	12
Figure I-7 : Four solaire avec stockage de chaleur latente.....	13
Figure I-8 : Cuiseur solaire avec un système pour stockage de chaleur latente utilisant l'hexa hydrate de nitrate de magnésium comme PCM.....	13

Chapitre II

Figure II .1-La constante solaire.....	21
Figure II.2- Variation saisonnière du rayonnement solaire.....	21
Figure II.3- La sphère céleste	22
Figure II.4-Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné (φ , l).....	23
Figure II.5- L'angle horaire et la déclinaison.....	24
Figure II.6- Les coordonnées horizontales.....	25
Figure II.7- Carte du monde de l'enseillement moyen annuel.....	29
Figure II.8-Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.....	30
Figure II.9- Irradiation directe journalière reçue sur un plan horizontal en mois de décembre et Juillet.....	31
Figure II.10- Irradiation directe journalière reçue sur un plan normal en mois de décembre et Juillet.....	31
Figure II.11-Irradiation global journalière reçue sur un plan incliné à la latitude de lieu en été.....	32
Figure II.12-Irradiation global journalière reçue sur un plan incliné à la latitude de lieu en Hiver.....	32
Figure II.13-Irradiation global journalière reçue sur un plan incliné à la latitude de lieu en Printemps.....	33
Figure II.14-Irradiation global journalière reçue sur un plan incliné à la latitude de lieu en automne.....	33
Figure II.15-Schéma du cuiseur boite à étudier.....	35
Figure II.16 : Schéma représentant le principe du cuiseur solaire boite.....	35
Figure II.17-Type de verre pour les couvertures.....	38
Figure II.18-Différentes formes de boîte intérieure.....	40

Chapitre III

Figure III.1-Schéma du cuiseur boite à étudier.....	
Figure III.2-Schéma représentant les éléments du cuiseur solaire étudié.....	
Figure III.3-Schéma électrique équivalent du système étudié.....	

Indexe des tableaux

Tableau II.1-Le potentiel solaire en Algérie.....	30
Tableau III.1-Valeurs du coefficient d'angström et de la hauteur d'eau condensable....	49
Tableau III.2-Les coordonnées géographiques de trois sites.....	56

Nomenclature

Notations	Unités
I_d : L'éclairement direct incident sur le plan récepteur	w/m ²
I_r : Puissance solaire réfléchiée par le réflecteur sur la surface de la vitre extérieure	w/m ²
D_h : Le rayonnement solaire diffus reçu par un plan horizontal	w/m ²
G_{v_1} : Puissance solaire absorbée par la vitre extérieure	w/m ²
G_{v_2} : Puissance solaire absorbée par la vitre intérieure	w/m ²
G_p : Puissance solaire absorbée par la plaque absorbante	w/m ²
T_{v_1} : Température de la vitre extérieure	k
T_{v_2} : Température de la vitre intérieure	k
T_a : Température de l'air intérieure	k
T_{ab} : Température de la plaque absorbante	k
T_{ab} : Température de la plaque absorbante	k
T_{amb} : Température ambiante	k
hr_{v_1-c} : Coefficient d'échange radiatif vitre-ciel	w/m.k
$hr_{v_2-v_1}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre les deux vitrages	w/m.k
hc_{v_1-amb} : Coefficient d'échange convectif entre la vitre extérieure et l'air ambiant	w/m.k
hc_{v_2-a} : Coefficient d'échange convectif entre la vitre intérieure et l'air ambiant	w/m.k
$hc_{v_1-v_2}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre les deux vitrages	w/m.k
hr_{ab-v_2} : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre intérieure	w/m.k
h_{moy} : Hauteur de la cavité du cuiseur	m
S_v : Surface de la vitre	m ²

S_{ab} : Surface de la plaque absorbante	m^2
S_L : Surface de latérale	m^2
S_m : Surface de réflecteur	m^2
U : vitesse du vent parallèle à la vitre	m/s
K_{air} : Coefficient de conductivité thermique de l'air entre les deux vitres	
k : Coefficient de conductivité thermique de l'isolant	$w/m.k$
$e_{v_2-v_1}$: La distance entre les deux vitres	m
e : Épaisseur de l'isolant	m
g : Accélération de la pesanteur	m/s^2
Nu : Nombre de Nusselt	-
Ra : Nombre de Rayleigh	-
f_{mv} : Facteur de forme géométrique entre le réflecteur et la vitre extérieure	-
f_{ma} : Facteur de forme géométrique entre le réflecteur et la plaque absorbante	-
mCp : Chaleur spécifique	J/K
ν : viscosité cinématique	m^2/s

Lettres grecques

β : L'angle d'inclinaison du réflecteur	degré (°)
α : Angle des rayons avec la normale au plan du réflecteur	degré (°)
θ : Angle d'incidence	degré (°)
α_{ab} : Absorptivité de la plaque absorbante	
τ_v : Transmittivité du vitrage	-
α_v : Absorptivité du vitrage	-

ε_v : Emissivité de la vitre	-
ρ_m : Réflectivité de réflecteur	-
σ : Constante de Stefan-Boltzmann	w/m ² .k ⁴
δ : La déclinaison solaire	degré (°)
φ : Latitude	degré (°)
l : Longitude	degré (°)

Actuellement, à l'échelle nationale et internationale, la demande énergétique toujours croissante constitue une contrainte écologique et économique importante sur l'environnement et le développement durable.

Le recours à l'énergie solaire est une solution pour limiter l'utilisation abusive des énergies fossiles ainsi que l'énergie du bois.

Dans les régions montagneuses isolées, où les ressources en énergie de bois sont en constante décroissance alors que les besoins en matière de chaleur en basse et moyenne température sont sans cesse croissants, la cuisson solaire des produits alimentaires apparaît alors comme le moyen idéal pour remédier à ce problème.

Ce projet permet d'étudier la faisabilité de cette technique en milieu rural dans le Nord de l'Algérie. L'étude s'inscrit dans le cadre de la vulgarisation de cette application qui est certes, loin d'être moderne. Paradoxalement, peu de chercheurs et d'ingénieurs algériens se sont penchés sur ce domaine précisément, sans doute a-t-on sous-estimé jusque là les bienfaits qu'un cuiseur solaire qui n'a besoin ni de bois, ni de gaz, peuvent procurer dans la vie quotidienne des populations rurales.

Le présent projet porte sur l'étude théorique d'un prototype de cuiseur solaire. Ce dispositif, prévu pour une installation au Nord de l'Algérie, sera conçu pour assurer la cuisson alimentaire moyennant le rayonnement solaire qui sera capté et piégé pour atteindre des niveaux de température favorables à une cuisson alimentaire saine. Le choix des matériaux de construction sera effectué de telle sorte à favoriser la réalisation de ce genre de système dans les régions pauvres et qui ne disposent pas de gros moyens industriels.

Pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre mémoire en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente le principe de fonctionnement d'un cuiseur solaire et expose les différents types existant. Nous terminons ce chapitre par une brève revue bibliographique.
- Le deuxième chapitre est consacré à la description des différentes composantes du cuiseur que nous nous sommes proposés d'étudier. Nous justifierons le choix des matériaux de construction préconisés. Nécessaire au dimensionnement du cuiseur, et afin d'exploiter au mieux l'énergie solaire on a présenté une étude du gisement solaire.

- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation du prototype de cuiseur solaire étudié en introduisant les hypothèses simplificatrices de base et les différents échanges thermiques mis en jeu entre les différents éléments du cuiseur solaire.
- Le quatrième chapitre présente une analyse des résultats de la simulation numérique du système traitée à l'aide du logiciel MATLAB, pour 3 sites les différents du Nord d'Algérie.

Chapitre I

Le concept de la cuisson solaire

I.1-Introduction

Il est connu que partout dans le monde, la cuisson est une nécessité majeure pour les gens et elle représente une part importante de la consommation d'énergie. Cependant, il y a une forme d'énergie qui est toujours disponible et en quantité abondante dans bon nombre de pays, c'est l'énergie solaire.

Lorsqu'on parle d'énergie solaire, le débat tourne inévitablement soit autour du photovoltaïque (faire de l'électricité solaire) soit sur le solaire thermique (faire chauffer de l'eau).

Bien peu de personnes savent qu'il est également possible de faire cuire ses aliments avec le soleil, et ce, pour beaucoup moins cher qu'une installation solaire habituelle.

I.2- Définition

Les cuiseurs solaires sont des dispositifs permettant de faire la cuisine sans aucune source d'énergie (bois ou énergie fossile) mais uniquement avec l'énergie solaire; Ils représentent une solution de choix, surtout dans les pays pauvres en ressources énergétiques conventionnelles.

L'énergie étant inépuisable et renouvelable, le cuiseur solaire va notamment permettre de solutionner les problèmes de bois dans les pays complètement privés de ressources végétales et permettre également de faire la cuisine avec un impact environnemental nul.

I.3-Historique

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 en 1767 ; Il a réussi à cuire des fruits dans un boîtier vitré. Par la suite un physicien français Augustin Bernard Mouchot, a décrit un cuiseur solaire dans son livre "La Chaleur Solaire" édité à Paris, en 1869 puis il invente le premier cuiseur solaire parabolique en 1877. W. Adams, un officier de l'armée britannique, a conçu un cuiseur solaire en Inde en 1878 consistant en un four octogonal, entouré de miroirs en verre pour concentrer la lumière du soleil et la diriger vers le four. Adams a rapporté qu'il a préparé dans son cuiseur les rations de sept soldats en deux heures, au mois de janvier.

En 1894, un restaurant en Chine servait déjà des aliments cuits totalement dans un cuiseur solaire.

Cependant, l'idée du développement des cuiseurs solaires fut par la suite assez vite abandonnée, principalement pour des raisons d'encombrements et de faibles rendements.

Dans les années cinquante du siècle passé et par nécessité, il y a eu une reprise d'intérêt pour la cuisson solaire, surtout en Inde et en Chine. En Inde, le développement de la cuisson solaire a persisté pendant une longue période ; la construction de cuiseurs solaires y était même subventionnée par l'état pendant un certain temps.

Après la crise du pétrole des années 70, les pays industrialisés se sont intéressés de nouveau à la cuisson solaire et ont intensifié les investigations fondamentales pour l'amélioration et le développement effectif de ce mode de cuisson.

En 1980, un mouvement s'est formé aux Etats Unis autour de Barbara Kerr qui est un pionnier de la cuisson solaire en Arizona et 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. Plusieurs modèles de cuiseurs solaires ont été construits et distribués dans le monde rural à travers la planète. En Afrique et dans la région subsaharienne, 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...

En Algérie, la cuisson solaire est toujours méconnue par le grand public; en 2004 l'URER/MS lance un projet qui a permis d'introduire cette activité en milieu saharien et de s'inscrire dans le répertoire international des promoteurs de la cuisson solaire ('International Directory of Solar Cooking Promoters').

Beaucoup d'efforts restent à fournir et un projet de grande envergure est nécessaire pour développer et vulgariser cette application qui peut être très bénéfique au niveau des régions isolées. En effet, le cuiseur solaire ne constitue pas une solution de substitution à la cuisinière conventionnelle qui fonctionne au bois, au gaz ou à l'électricité. Mais tout simplement l'utilisation d'un cuiseur solaire, dans notre vie quotidienne, nous fait découvrir une autre façon de préparer la nourriture moyennant une forme d'énergie qui respecte l'environnement

et assure un développement durable. Cette forme d'énergie n'est issue ni d'une mine, ni d'une raffinerie ou encore d'une centrale nucléaire. Elle est gratuite et disponible en tout lieu.

Certes, la cuisson solaire est lente et ne peut être pratiquée à tout moment surtout par ciel couvert ou à la tombée de la nuit, mais elle offre une alternative non polluante à l'utilisation des énergies fossiles. En effet, un cuiseur solaire utilisé peut éviter une grande quantité de gaz à effet de serre.

I.4-Principe de fonctionnement du cuiseur solaire

Le principe de fonctionnement du cuiseur solaire est simple : il convertit le rayonnement solaire en énergie calorifique nécessaire à la cuisson des aliments. Pour cela, cela consiste à :

- diriger au maximum les rayons solaires vers le récipient de cuisson.
- les convertir en énergie calorifique
- maintenir cette chaleur en isolant les parois.

La température de cuisson d'un cuiseur solaire est atteinte quand les gains en énergie solaire viennent à égaler les pertes de chaleur vers l'extérieur ; on parle d'un juste équilibre entre les gains et les pertes de chaleur.

I.5-Les différents types de cuiseurs solaires

Un aperçu des cuiseurs solaires dans le monde entier prouve qu'une large variété de cuiseurs a été conçue. Ces conceptions se rangent dans deux catégories principales : les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur et les cuiseurs pourvus d'un système de stockage de chaleur.

I.5.1-Les cuiseurs solaires sans stockage de chaleur

Dans cette catégorie de cuiseurs, on en distingue deux types selon le mécanisme de transfert de chaleur au récipient de cuisson : les cuiseurs directs et les cuiseurs indirects. Le type direct emploie le rayonnement solaire directement dans le procédé de cuisson tandis que les cuiseurs solaires indirects emploient un fluide caloporteur pour transférer la chaleur du collecteur au récipient de cuisson.

➤ Les cuiseurs directs :

❖ *Type boîte :*

Appelé aussi four solaire, il est constitué essentiellement d'une boîte bien isolée et pourvue d'une lucarne en verre à travers laquelle les rayons du soleil peuvent pénétrer.

Pour diminuer les pertes de chaleur par convection, Il est recommandé dans certains cas d'utiliser pour les lucarnes un double vitrage. Quelquefois aussi, ces cuiseurs sont munis de réflecteurs extérieurs ou intérieurs pour augmenter la chaleur captée.

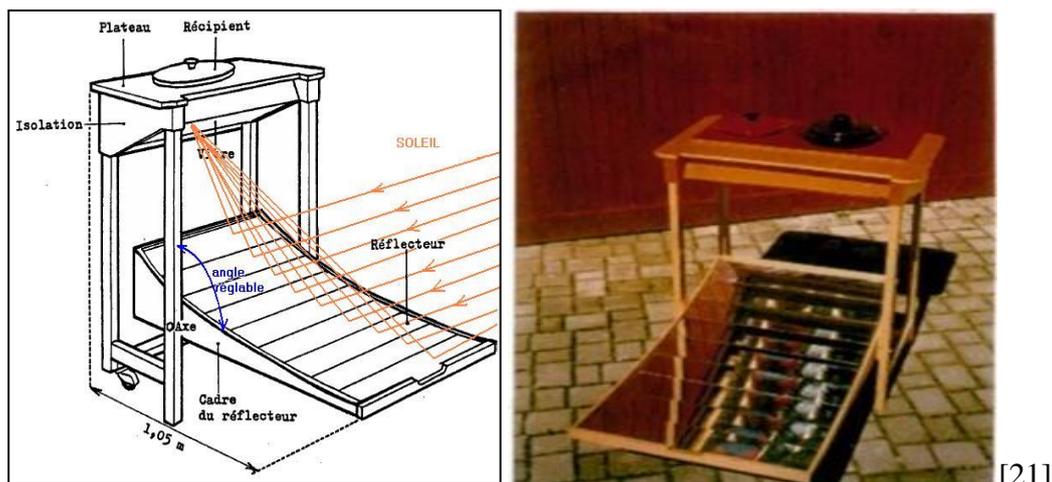
Ces appareils fonctionnent selon le principe de l'effet de serre. Les rayons solaires à ondes courtes traversent les deux parois de verre puis se transforment en rayons thermiques à ondes plus longues en touchant les parois noires. L'énergie est emprisonnée ainsi à l'intérieur de la boîte et empêchée de s'évacuer par conduction grâce à l'isolation thermique. On peut alors y atteindre des températures assez élevées, allant jusqu'à un maximum de 170°C, pour assurer la cuisson de la nourriture contenue dans les récipients. La vitesse de cuisson dépend de la conception du cuiseur et de son efficacité thermique.

Les différents modèles de ce type sont représentés dans la figure I-1.



Figure I-1: Cuiseurs solaires de type boîte : a-sans réflecteur ; b-avec un seul réflecteur ; c-avec deux réflecteurs ; d-avec trois réflecteurs ; e-avec quatre réflecteurs ; f-avec huit réflecteurs.

Dans le modèle représenté ci-après, les rayons solaires se réfléchissent sur les réflecteurs plans, disposés en arc de parabole, et viennent converger sur le vitrage ; la boîte isolée est inversée et le récipient de cuisson est encastré dans un trou pratiqué sur le plateau de la boîte. Les rayons solaires viennent frapper le fond noirci du récipient à cuisson. Pour mieux chauffer et réduire les temps de cuisson, les parois intérieures de la boîte sont munies de réflecteurs.



❖ *Les cuiseurs à concentration :*

Les cuiseurs solaires à concentration fonctionnent selon le principe de la concentration et de la réflexion des rayons solaires. Ils utilisent une surface réfléchissante dont la forme permet de concentrer en un même point la réverbération de l'énergie lumineuse.

De nombreux modèles existent :

- **Type parabolique :**

Ce sont des disques concaves qui focalisent par leurs miroirs ou leurs lames en aluminium très réfléchissantes, les rayons solaires de manière très précise sur le fait-tout. Ce dernier repose sur un dispositif prévu pour recevoir le ou les plats à cuire (selon le modèle et la grandeur des récipients). Les paraboles doivent être régulièrement réorientées pour obtenir un rendement optimum.

- **Cylindro-parabolique :**

En règle générale, le creux est aligné avec son axe focal horizontal Est-Ouest. L'aliment à cuire est disposé le long de cette ligne. L'auge est faite de sorte que son axe de symétrie pointe au soleil à midi ; cela impose au bac d'être incliné de haut en bas.

- **Type sphérique :**

Cette conception est la plus simple des concentrateurs car ils sont très faciles à réaliser et à employer ; la forme du réflecteur est sphérique et dirige la lumière le long d'une ligne perpendiculaire à la surface de la sphère. Une telle conception a été proposée pour la première fois par « Stam » en 1961. Le navire de cuisson peut être accroché au trépied pour atteindre le foyer. Voici les différents modèles de type a concentration :



Figure I-2 : Cuiseur solaire à concentration : 1- parabolique, 2- parabolique orienté vers le haut, 3- forme carrée concave, 4- sphérique, 5- cylindro-parabolique, 6- à parois réfléchissantes en forme d'aile.

- **Type à panneaux :**

Les cuiseurs à panneaux sont construits à partir de matériaux variés, suffisamment résistants et dont l'intérieur est recouvert d'une surface réfléchissante (miroir, aluminium...).

Sa configuration spatiale répond à des exigences géométriques et optiques précises de façon à permettre aux réflecteurs de bien jouer leur rôle. En effet, les réflecteurs sont orientés selon un certain angle de manière à focaliser les radiations solaires réfléchissantes en un point où sera placé, sur une grille un récipient de couleur noire enfermé à l'intérieur d'un sac en plastique ou en verre, résistant à la chaleur qui permet de créer l'effet de serre.

Ce type de cuiseur permet de cuire une variété d'aliments et il peut atteindre 150 degré durant une journée bien ensoleillée.



Figure I-3: Les différentes formes de cuiseurs solaires à panneaux

➤ **Type indirect:**

Dans le type des cuiseurs solaires indirects, le récipient de cuisson reçoit indirectement de la chaleur, c'est à dire par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur. On peut distinguer trois configurations possibles:

• **Avec collecteurs solaires plans :**

Ce sont des cuiseurs chauffés au moyen d'un collecteur plan et qui peuvent fonctionner en utilisant de l'huile ou de l'air comme intermédiaire pour transférer la chaleur. Ces cuisinières permettent d'accumuler de l'énergie. Leurs points faibles résident en le fait qu'ils sont volumineux, lourds, difficiles à transporter et plus chers que les autres types.

Leurs avantages sont : la facilité d'utilisation, la possibilité de poursuivre la cuisson lorsque le ciel se couvre, il n'est pas nécessaire de les réorienter continuellement, elles fonctionnent sans l'intervention de l'utilisateur en maintenant la chaleur des aliments durant de longues périodes, elles ne produisent pas d'éblouissement, elles sont stables et elles n'impliquent pas de risques de feu ou de brûlures.

Il existe aussi d'autres variétés de modèles, de type concentrateur, et qui possèdent des réflecteurs courbés et concentrent la lumière solaire en un long champ, où sera localisé l'appareil de chauffage.

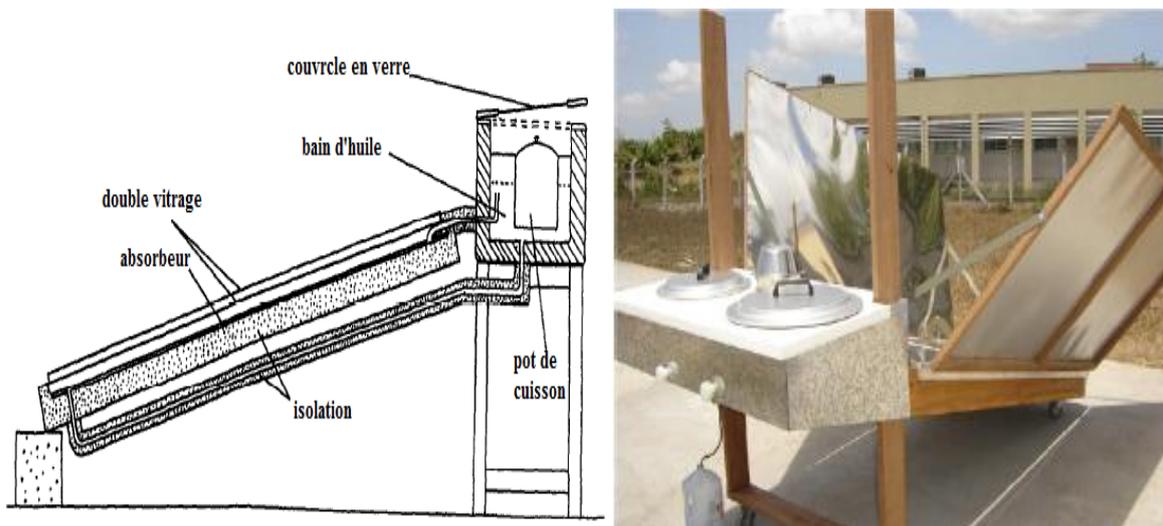


Figure I-4: Cuiseur solaire avec panneaux collecteurs plans. [21]

- **Avec tube collecteur:**

Le collecteur est un tube central relié à la boîte isolée contenant le récipient de cuisson. Le tube contient généralement de l'huile et il est chauffé par un concentrateur (miroir cylindro-parabolique) ; cette l'huile chaude transfère alors la chaleur au navire de cuisson.

- **Avec collecteur à concentration :**

Des concentrateurs paraboliques dirigent les rayons solaires sur un système générateur de vapeur, laquelle est utilisée pour la cuisson des aliments, comme représenté sur la figure I-5 (2 et 3). Ce système de cuisson solaire a suscité un véritable succès commercial en Inde, où 106 toits surmontés de concentrateurs paraboliques génèrent de la vapeur pour cuire 30.000 repas quotidiennement, comme le montre l'image de la figure I-5 (1). La surface réfléchissante est placée de façon à focaliser les rayons solaires sur l'évaporateur, lequel est relié au récipient de cuisson placé à l'intérieur de la cuisine.

Un « bol solaire » de 15m de diamètre, installé à Auroville en Inde, produit de la vapeur à 150C° et permet de préparer 1000 repas quotidiennement.

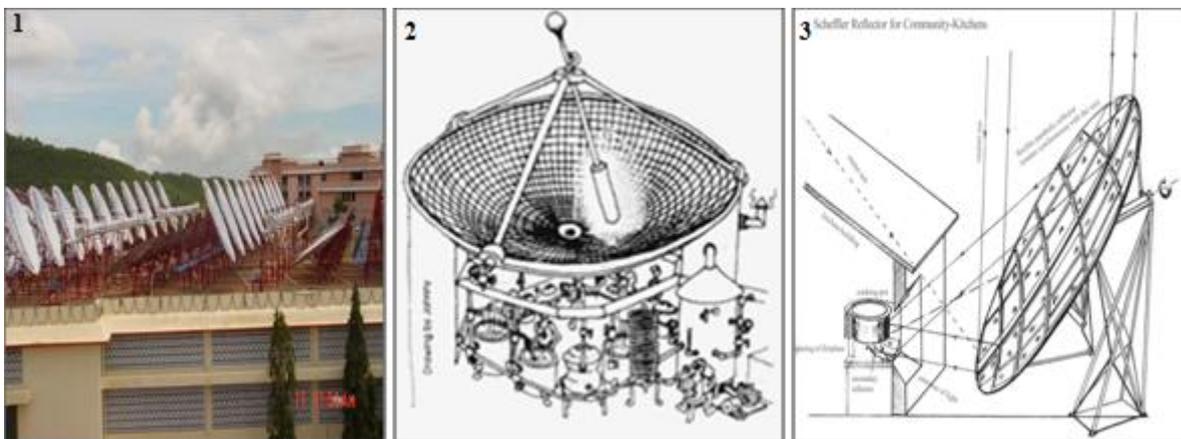


Figure I-5 : Les cuiseurs solaires indirects à concentration [20]

I.5.2- Cuiseur solaire avec stockage de chaleur :

En vue de résoudre le problème de la cuisson en plein air ou bien de l'impossibilité de cuire les aliments après le coucher de soleil ou à cause de passages nuageux fréquents de la journée,

les cuiseurs solaires sont pourvus de matériaux capables de stocker cette énergie tout au long de la journée et de la restituer au moment de la cuisson des aliments.

L'énergie thermique peut être stockée par l'augmentation de l'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente et thermochimique ou une combinaison de celles-ci.

✓ **Stockage de chaleur sensible :**

Dans le cas de stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique stockée se traduit par l'augmentation de la température du matériau stockeur, en général un solide ou un liquide. La figure I-6 montre le schéma d'un four utilisant de l'huile comme fluide caloporteur et du sable en tant que matériau de stockage.

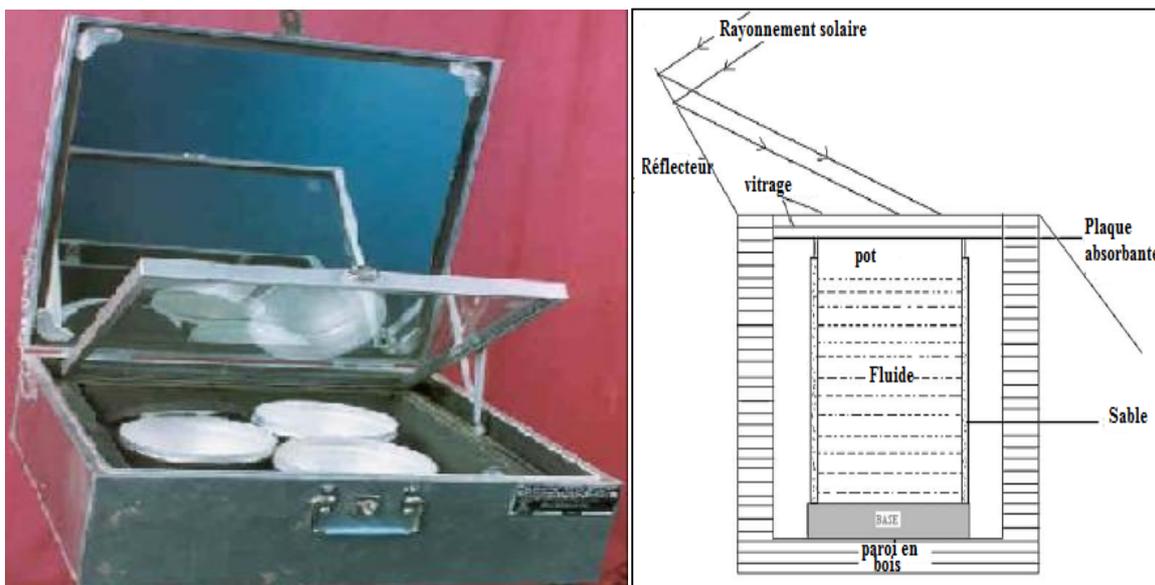


Figure I-6 : Cuiseur solaire avec stockage de chaleur sensible.[23]

✓ **Cuiseurs solaires avec stockage de chaleur latente :**

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière. L'utilisation d'un matériau à changement de phase (PCM) pour stocker de la chaleur sous forme de chaleur latente est intéressante car cela constitue un système de stockage compact et efficace, dû à une densité de stockage élevée et à une température de fonctionnement constante.

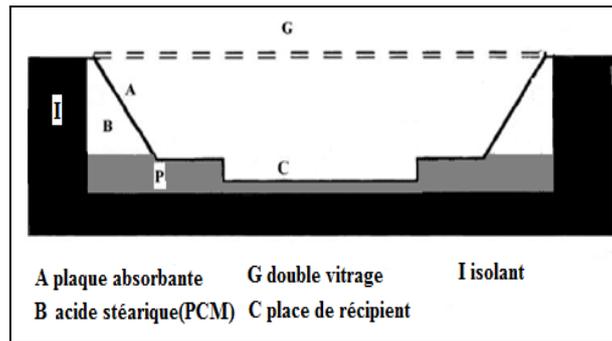


Figure I-7 : Four solaire avec stockage de chaleur latente [22]

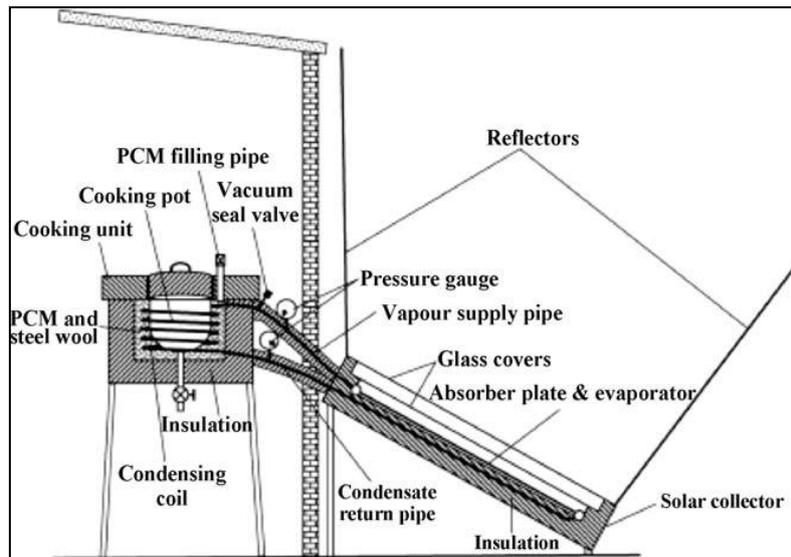


Figure I-8 : Cuiseur solaire avec un système pour stockage de chaleur latente utilisant l'hexa hydrate de nitrate de magnésium comme PCM. [24]

I.6-Les avantages du cuiseur solaire :

Il est fondamental de développer l'utilisation de l'énergie solaire aujourd'hui dans le monde pour la santé de nos enfants et de notre Mère Terre et la cuisson solaire est une solution simple et efficace pour résoudre certains problèmes de santé et d'environnement :

- Pour la santé

1- Purification de l'eau : Peu de gens le savent mais l'eau se purifie dès 65°C. Le cuiseur solaire atteignant 150°C en moyenne, les familles purifient l'eau qu'elles boivent. C'est inouï quand on sait que les taux de mortalité infantile, tant élevé dans certains pays du Sud, sont surtout dus aux diarrhées causées par l'eau crue non pasteurisée.

2- Alimentation saine : Le cuiseur solaire conserve les saveurs et les richesses des aliments cuits. La concoction solaire est lente tandis que le feu à gaz tue les vitamines et brûle le fond de la casserole. La chaleur est répartie dans tout le cuiseur solaire, il n'est pas nécessaire de mettre beaucoup d'huile pour cuire. La cuisson est plus saine, plus riche et plus goûteuse.

3- Moins de maladies : Les maladies pulmonaires et des yeux dues aux émanations de fumée de feu de bois sont évitées. On s'abîme moins le dos à force de porter des kilos de bois pour la cuisson. L'eau chauffée au solaire permet de laver les bébés et les enfants sans risque de refroidissement

- Pour l'environnement:

1- Réduction de la déforestation, du déboisement et de l'érosion des sols : plus de 80% du bois coupé dans le monde est utilisé pour la cuisson et 2 milliards de personnes sur terre utilisent le bois pour cuire. L'Afrique de l'Ouest, dont les ressources naturelles sont tant exploitées par l'occident, a survécu jusqu'à présent mais au prix de l'anéantissement de sa forêt. Le désert avance à grand pas, les sols sont pauvres, stériles, sans végétation. Utiliser le cuiseur solaire, c'est laisser, enfin, un peu de répit à la nature, aux sols, aux arbres et à la végétation. C'est permettre la reforestation de nombreuses régions du monde.

2- Diminution de l'émission de gaz à effet de serre (CO2) : Toute combustion, qu'elle soit de gaz, de bois, de pétrole etc., génère des gaz qui contribuent au réchauffement de la planète. Réduire notre consommation de combustible, c'est préserver l'environnement, et conserver des réserves énergétiques pour les générations futures.

3- Revalorisation de la biomasse et des engrais naturels : Dans de nombreux pays, la bouse des animaux sert à cuire alors qu'elle est un si bon engrais pour la terre. Le cuiseur solaire permet de garder les herbes et la biomasse comme engrais.

- Pour l'économie :

1- Gain financier : En économisant du combustible, on économise de l'argent. L'énergie du soleil est gratuite. Et lorsque le soleil se cache, on utilise le cuiseur avec stockage de chaleur.

2- Création d'emploi : Les cuiseurs solaires boîtes sont en bois, aluminium, verre et laine de mouton. Il n'y a pas de haute technologie. Ils peuvent être construits dans n'importe quel pays du monde et devenir une source nouvelle de revenus. La construction locale de cuiseurs solaires peut permettre la création d'emplois utiles à travers le monde entier.

3- Gain de temps : C'est l'un des avantages les plus importants de la cuisson solaire. Dans les pays du Sud, la corvée de bois représente des heures de marche et des kilos sur le dos toutes les semaines. Ce sont généralement les femmes et les enfants qui sont responsables du ramassage. Avec le cuiseur solaire, on a besoin de très peu de combustible. Et il n'est plus nécessaire de toujours remuer, surveiller, calmer le feu... ça cuit tout seul, sans personne, sans brûler, sans coller. On peut quitter la maison et revenir pour le déjeuner. Ce sont des heures de travail en moins.

- Vie quotidienne:

1- Sécurité : Face aux dangers de l'utilisation du gaz en cuisine (brûlure, feu, fuite...), le cuiseur solaire est une véritable innovation en matière de sécurité. De l'extérieur, le cuiseur n'est absolument pas chaud, les enfants peuvent participer à la préparation du repas et jouer près du cuiseur sans danger. Rien ne peut prendre feu, pas besoin de surveiller sans cesse la cuisson et les enfants.

2- Partage : Simple et sûre, la cuisson solaire permet à tous les membres de la famille de cuisiner. Les plus jeunes apprennent sans danger. Les hommes sont curieux d'expérimenter. Les femmes peuvent déléguer et s'absenter.

Inconvénients

1-Le temps de cuisson est variable et va dépendre de l'ensoleillement.

2-Les durées de cuisson, sont bien supérieures à celles des cuissons traditionnelles, il faut s'organiser et ne pas être pressé.

3-La possibilité de cuisiner dehors dépend de l'ensoleillement, cela n'est possible ni tous les jours ou ni à toute heure.

4- ne permet ni friture, ni grillade qui réclament une température élevée.

I.7-Brève revue bibliographique des travaux effectués dans le domaine de la cuisson solaire dans le monde et en Algérie.

A. Faye, A. Thiam, V. Sambou , M. Faye, O. Diao, D. Azilinon et M.Adj [1] ont mené une étude expérimentale sur un cuiseur solaire de type boîte, fabriqué avec des matériaux locaux(Sénégal) , en comparant un cuiseur avec et sans paraffine.

Les résultats obtenus sont encourageants car, pour une charge de 3 litres d'eau, l'efficacité énergétique varie de 10% à 42% sans paraffine et de 5 % à 42 % en présence de paraffine tandis que l'efficacité exergetique varie de 1 % à 19 % sans paraffine et de 1 % et 18 % en présence du matériau à changement de phase.

La présence de la paraffine augmente l'inertie, les performances et les pertes du cuiseur solaire. Il permet aussi d'atténuer les variations brusques de température. En outre la paraffine permet de stocker la chaleur qui peut être restituée pendant la nuit.

A. Gaur, O.P. Singh, S.K. Singh and G.N. Pandey [2] ont proposé un ustensile doté d'un couvercle concave.

Leur étude expérimentale a montré une réduction de 10 à 13 % de la période de cuisson par comparaison à un ustensile de cuisson ordinaire placé dans les mêmes conditions d'exploitation.

Pour améliorer l'échange de chaleur entre l'air intérieur du cuiseur avec l'ustensile de cuisine utilisé, **Narasimha Rao et S. Subramanyam [3]** ont proposé l'utilisation d'ustensiles de cuisine dotés d'une cavité centrale.

Ils ont expérimentalement démontré que l'ustensile de cuisine avec cavité centrale améliore la surface effective de transfert de chaleur vers l'eau qui se trouve à l'intérieur et réduit alors la durée de cuisson.

Domanski R, El Sebaï AA et Jaworski M [4] ont étudié un cuiseur solaire en forme de boîte et utilisent de l'Hexahydrate de Nitrate de Magnésium purifié à 99% (2Kg) et de l'acide stérique à 95% (1.1Kg), comme matériaux à changement de phase(PCM) . Ce matériau est placé dans un pot peint en noir et entoure le récipient de cuisson.

Terres H, Ortega JA, Gordon M, Morales JR, Lizard A [5] ont fait une étude numérique sur le chauffage dans un cuiseur solaire en boîte équipé de réflecteurs internes du miel d'abeille, de l'huile d'olive, du lait et de l'eau. Ils ont utilisé les valeurs climatiques de Mexico du 26 Janvier 2006.

Les températures maximales obtenues pour les cas du miel, de l'huile d'olive, du lait et de l'eau sont respectivement 91.8, 91.6, 86.2, 85.2 et 85.3C°.

Ozturk HH, Oztekim S, Bascetincelik [6] ont fait plusieurs tests sur des cuiseurs solaires en forme parabolique et analysé les performances des paramètres en terme de lois thermodynamiques.

Ils ont aussi examiné expérimentalement l'efficacité en termes d'énergie et d'exergie d'un cuiseur solaire parabolique de conception simple et de faible coût dans les conditions climatiques d'Adana en Turquie.

Bello AMA, Makinde V, Sulu HT [7] ont fait l'étude d'un cuiseur solaire en boîte simple dans les conditions climatiques du Nigéria et ils ont trouvé que son efficacité est 47.56.

En Algérie :

A.Harmim, M Boukar et M.Amari [8] ont réalisé et testé expérimentalement un cuiseur solaire simple de type boîte à trois réflecteurs plans et une surface d'ouverture inclinée, fabriqué avec des moyens et des matériaux rustiques disponibles en milieu saharien. Les tests ont été effectués sur la plate-forme des essais de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS) d'Adrar (27.88°N et -0.17°W au Sahara Algérien).

Les résultats obtenus sont concluants et encourageants et les températures atteintes sont très satisfaisantes pour une cuisson alimentaire saine. Le rendement énergétique du cuiseur varie entre 25 % et 55 %.

Dans une autre étude [9] ces mêmes auteurs ont proposé une nouvelle forme d'ustensile de cuisine. C'est une casserole cylindrique ordinaire dont la surface latérale extérieure est munie d'ailettes rectangulaires le long de la circonférence. Cette nouvelle configuration augmente la

surface de transfert de chaleur vers l'intérieur de l'ustensile tout en gardant un volume adéquat pour contenir l'aliment à cuire. Il a été démontré que ce nouvel ustensile de cuisine réduit considérablement le temps de cuisson.

A. Harmim, M. Belhamel, M. Boukar et M. Amar [10] Ils ont aussi modifié la forme de la plaque absorbante du cuiseur pour la remplacer par une plaque absorbante à ailettes ; ce qui permet d'améliorer l'échange convectif vers l'air intérieur du cuiseur et qui constitue un moyen important pour le chauffage des parois latérales de l'ustensile de cuisine posé sur la plaque absorbante.

Les résultats obtenus indiquent que le cuiseur muni de la plaque ailettée est 7% plus efficace et le temps pour faire bouillir l'eau est réduite de 12% dans ce cas.

A. Harmim, M. Merzouk, M. Boukar et M. Amar [11] ont réalisé un cuiseur solaire à double exposition muni d'un réflecteur parabolique et l'ont testé à Adrar. Le système se compose de deux parties distinctes: un réflecteur en forme parabolique et un boîtier dans lequel on dépose une plaque chauffante. La position de la plaque et l'orientation du réflecteur sont choisies de telle sorte à faire réfléchir le rayonnement solaire incident vers une tache focale linéaire située au niveau de l'emplacement du boîtier.

Cette configuration permet une double exposition de la plaque chauffante du cuiseur solaire. La surface supérieure est directement irradiée par le rayonnement solaire incident sur une surface horizontale et sa surface inférieure est irradiée par la tache focale formée par le réflecteur en forme de branche parabolique. Ce dernier est constitué de morceaux rectangulaires de miroirs fixés sur un cadre en bois et dont la partie supérieure est façonnée selon le profil de branche parabolique de distance focale 300 mm. En comparaison avec les performances des cuiseurs boîte à réflecteurs, qui nécessitent des ajustements périodiques de 20 à 60 minutes pour un meilleur fonctionnement, ce prototype fonctionne en position stationnaire durant toute la durée d'exploitation (jusqu'à 5 heures).

Conclusion

Au cours de ce premier chapitre nous avons fait un recensement des cuiseurs solaires existant et nous avons procédé à l'analyse de la littérature spécifique consacrée à notre étude. Ainsi nous avons défini les différents types de cuiseurs solaires réalisés en soulignant dans certains cas les améliorations apportés par les travaux de recherches dans ce domaine.

Chapitre II

Conception d'un cuiseur solaire pour le Nord de l'Algérie

II .1-Introduction :

Dans ce chapitre on s'intéressera à certaines notions sur le rayonnement solaire en général et également sur le potentiel solaire disponible en Algérie, des notions qui sont nécessaires pour les calculs qui suivront dans ce mémoire. Le choix d'un cuiseur solaire parmi les différents types cités dans le chapitre précédant s'est porté sur un cuiseur solaire simple de type boîte destiné à fonctionner sous le climat du Nord algérien. Nous sous-entendons par cuiseur simple, un dispositif de grande simplicité de fabrication, de coût très modeste et dont les matériaux qui constituent les différents composants ont une large disponibilité dans la région. Les caractéristiques de ce cuiseur et les paramètres de fonctionnement de ce dernier seront présentées dans ce chapitre.

II .2-Gisement solaire :

Le rayonnement solaire est caractérisé par différentes grandeurs, essentiellement l'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre, appelée "constante solaire" et les diverses altérations et atténuations (aléatoires) que subit le rayonnement solaire, durant la traversée de l'atmosphère terrestre.

II .2.1-La constante solaire :

La constante solaire exprime la quantité de flux énergétique moyenne reçu par une surface unité placée orthogonalement aux rayons solaires au sommet de l'atmosphère terrestre. Cette valeur est soumise à des variations de quelques watts selon deux modes : une variabilité à long terme (période de 33 millions d'année) due au mouvement du système solaire dans la voie lactée et une variabilité à très court terme (un jour à quelques années) due à l'activité solaire.

Dans notre cas la valeur moyenne qui a été retenue est $I_0 = 1367 \frac{w}{m^2}$.

Par contre, la puissance solaire I interceptée au sommet de l'atmosphère est variable au cours de l'année puisque la distance Terre-Soleil est elle-même variable en raison de la trajectoire elliptique de la Terre dans sa course autour du Soleil. On appelle correction de distance la quantité suivante :

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos \frac{360}{365} j - 2 \quad (\text{II .1})$$

La puissance I est calculée à partir de la constante solaire corrigée: $I = I_0 C_{t-s}$. Nous avons tracé dans la figure II-1, le graphe de la fonction représentant son évolution journalière dans l'année.

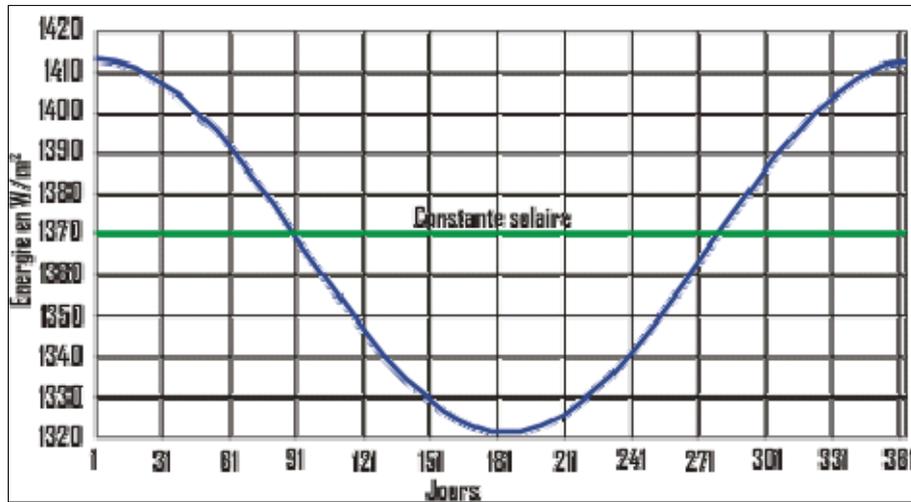


Figure II .1-Evolution annuelle de la constante solaire

II.2.2-Mouvement du Globe terrestre :

La Terre décrit autour du Soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21décembre) que la Terre est la plus proche du Soleil, et c'est au solstice d'été (22juin) qu'elle en est la plus éloignée.

La Terre tourne sur elle-même avec une période de 24h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle $d = 23^{\circ}27'$ avec la normale au plan de l'écliptique.

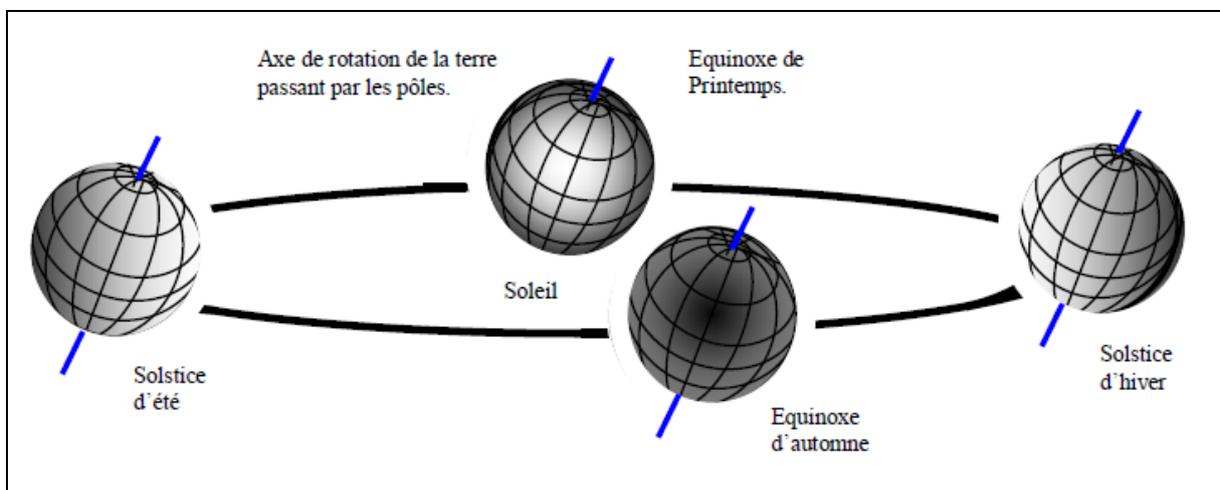


Figure II.2- Variation saisonnière du rayonnement solaire

II.3. La sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est représenté sur la figure (II-2) :

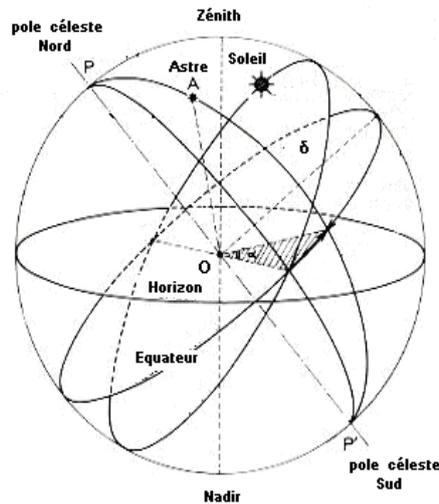


Figure II. 3- La sphère céleste

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

II.4- Les coordonnées célestes :

II.4.1- Les coordonnées géographiques :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la Terre.

- **Longitude l :**

La longitude d'un lieu correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine 0°) le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.

- **Latitude φ :**

La latitude d'un lieu correspond à l'angle fait avec le plan équatorial, par le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur Terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° . Cette convention de

signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère Nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère Sud.

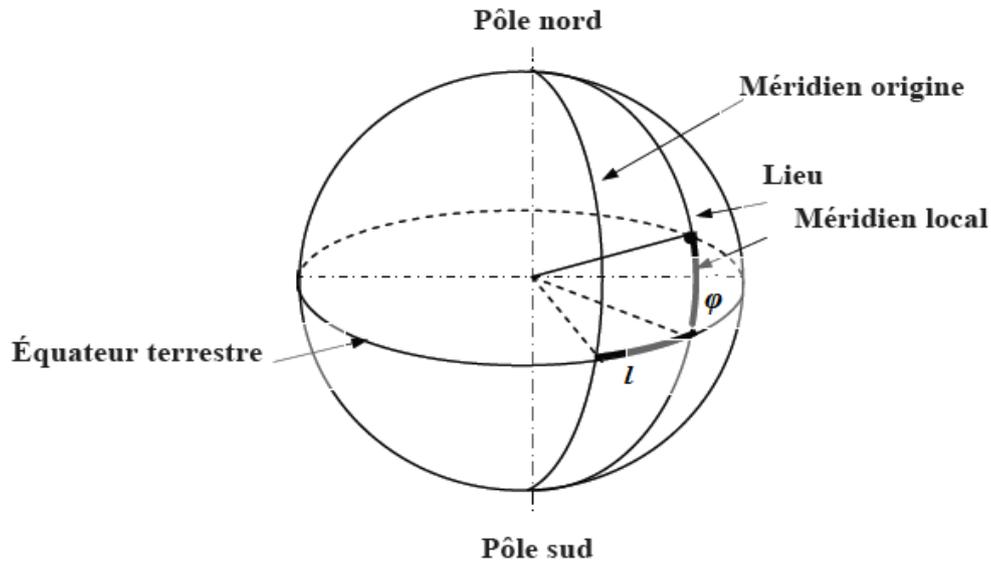


Figure II.4-Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné (φ , l)

II.4.2- Les coordonnées horaires :

- *La déclinaison solaire δ :*

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes :(-23°27'et +23°27'environ) et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule :

$$\delta = 23.45 \times \sin \frac{360 \times 284d}{365} \quad (\text{II}.2)$$

d : numéro du jour dans l'année.

Valeurs particulières de la déclinaison :

Equinoxe de Printemps (21 Mars) : $\delta = 0$

Solstice d'Eté (22 Juin) : $\delta = + 23^{\circ} 27'$

Equinoxe d'Automne (23 Septembre) : $\delta = 0$

Solstice d'hiver (22 Décembre) : $\delta = - 23^{\circ} 27'$

Approche maximale (Périhélie) : 2 Janvier

Approche minimale (Aphélie) : 2 Juillet

- **Angle horaire w :**

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le méridien local et le cercle solaire. L'angle horaire est compris entre 0° et 360° . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après midi et augmente de 15° par heure.

- **Temps solaire vrai :**

La notion du temps solaire vrai TSV a une liaison avec l'angle horaire w . La valeur zéro degré (0°) de cet angle est atteinte au passage du soleil au méridien du lieu et qui correspond à 12 h TSV , c'est-à-dire au midi solaire vrai. La relation entre ces deux fonctions est :

$$w = 15 TSV - 12 \quad (II .3)$$

Avec:

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{E_T + 4l}{60}\right) \quad (II .4)$$

$$E_T = 9.87 \sin(2n) - 7.35 \cos(n) - 1.5 \cos(n) \quad (II .5)$$

$$n = d - 81 \frac{360}{365} \quad (II .6)$$

TL: temps légal (lu sur la montre).

DE : décalage horaire administratif (1heure pour l'Algérie).

E_T : correction de l'équation de temps. Cette correction varie au cours de l'année de (-14.3mn) à (16.4mn) ; elle peut être calculée par la formule approchée II.5.

l : longitude de lieu, en degrés.

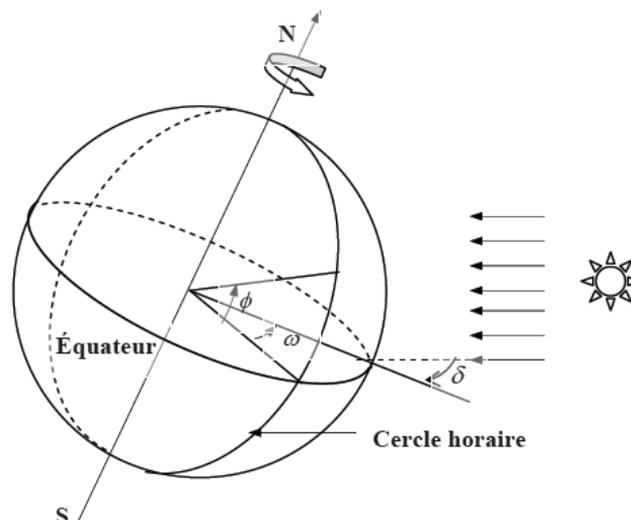


Figure II.5- L'angle horaire et la déclinaison

II.4.3- Les coordonnées horizontales :

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

- **Hauteur angulaire du soleil h :**

C'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil.

Cette hauteur durant le jour peut varier de 0 (soleil à l'horizon) à 90 (soleil au zénith).

La hauteur angulaire du soleil h est alors donnée par la formule :

$$\sin h = \cos \delta \cos \varphi \cos w + \sin \varphi \sin(\delta) \quad (\text{II} .7)$$

- **Azimut a :**

C'est l'angle compris entre le plan méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil.

La connaissance de l'azimut est importante pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. L'azimut nul correspond à la direction Sud dans l'hémisphère Nord et à la direction Nord dans l'hémisphère Sud. L'orientation Est correspond à l'azimut $a = -90^\circ$, et l'orientation Ouest à $a = +90^\circ$.

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(w)}{\cos(h)} \quad (\text{II} .8)$$

- **Angle zénithal z :** C'est l'angle fait par la direction du soleil par rapport au zénith. Il est complémentaire de h .

$$z = 90^\circ - h$$

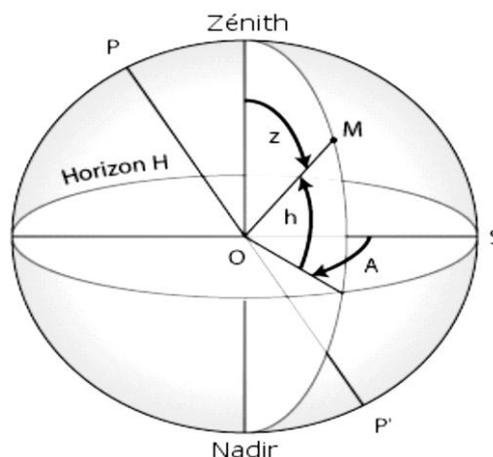


Figure II.6- Les coordonnées horizontales

II.5-Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire arrivant sur la Terre subit une altération lors de la traversée de l'atmosphère, et seulement une partie de cette énergie est disponible au sol. Cette énergie se décompose en deux parties principales : le rayonnement solaire direct (I^*) et le rayonnement

solaire diffus (D^*). La somme de ces deux rayonnements est appelé rayonnement solaire global (G^*).

II.5.1-Puissance et énergie reçues par un récepteur plan:

La puissance ou l'énergie reçue par une surface est tributaire de plusieurs facteurs selon son orientation γ et son inclinaison β . En revanche elle se compose des mêmes éléments de bases que sont les quantités directe, diffuse et réfléchie :

- Les grandeurs directes : Reçues directement du soleil en traversant l'atmosphère sans qu'elle ne soit restituée ou réfléchie.

$$I_{dir.\beta,\gamma} : \text{Puissance reçue directe} \quad [W/m^2]$$

$$H_{dir.\beta,\gamma} : \text{Energie reçue directe} \quad [J/m^2]$$

- Les grandeurs diffusées : Les nuages, les aérosols diffusent en partie le rayonnement.

$$I_{diff.\beta} : \text{Puissance diffuse reçue} \quad [W/m^2]$$

$$H_{diff.\beta} : \text{Energie diffuse reçue} \quad [J/m^2]$$

- Les grandeurs réfléchies : C'est les quantités réfléchies par l'entourage du capteur ; les plus prépondérantes sont dues au sol (albédo) et au ciel :

$$I_{ref.\beta} : \text{Puissance réfléchie reçue par la surface de captation inclinée orientée; en } [W/m^2]$$

$$H_{ref.\beta} : \text{Energie réfléchie reçue par la surface de captation inclinée orientée; en } [J/m^2]$$

II.5.1.1- Grandeur directe :

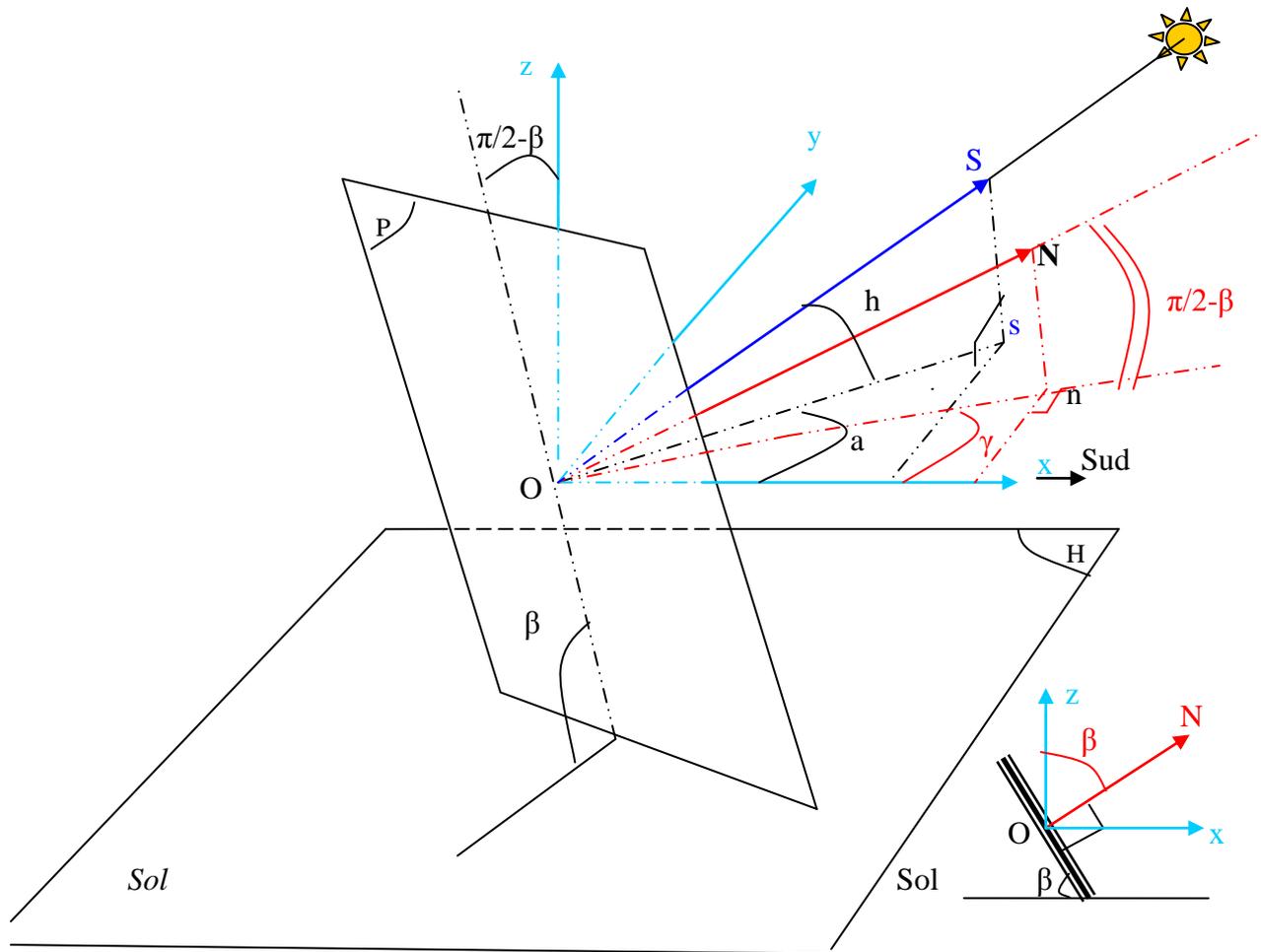
La surface de captation est placée dans les conditions suivantes :

- La position du soleil se trouve définie par sa hauteur h et son azimut a mesuré par rapport au Sud.

- Le plan du capteur est orienté par rapport au Sud d'un angle γ est incliné de β par rapport au sol.

Afin de bien définir les éléments, on définit un référentiel $(\vec{Ox}, \vec{Oy}, \vec{Oz})$, dont le centre est placé sur un élément de surface du capteur de normale \vec{ON} . L'axe \vec{Ox} est confondu avec la

direction du Sud. La projection sur le plan horizontal (Oxy) de \vec{ON} est \vec{On} ce qui définit les angles $\gamma = (\vec{Ox}, \vec{On})$ et $\beta = (\vec{ON}, \vec{Oz})$. La direction du soleil est définie par le vecteur \vec{Os} .



Les vecteurs qui nous concernent sont \vec{Os} et \vec{ON} . Leurs composantes sont :

$$\vec{Os} = \cos h \cdot \cos a, \cos h \cdot \sin a, \sin h$$

$$\vec{ON} = (\sin \beta \cdot \cos \gamma, \sin \beta \sin \gamma, \cos \beta)$$

La puissance reçue sur la surface de captation est :

$$I_{dir.\beta.\gamma} = \frac{I_t}{\sin(h)} (\vec{Os} \cdot \vec{ON}) \quad (II.9)$$

$$= \frac{I_t}{\sin(h)} [\sin(h) \cdot \sin(\beta) \cos(a - \gamma) + \cos(\beta) \cdot \sin(h)] \quad (II.10)$$

Avec :

I_t : Puissance directe reçue par une surface horizontale qui peut être évalué par l'une des méthodes de calcul d'estimation.

D'habitude on note par R_{dir} la quantité appelée facteur d'inclinaison :

$$R_{dir.\beta.\gamma} = \frac{\cos(h) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(a - \gamma) + \cos(\beta) \cdot \sin(h)}{\sin(h)} \Rightarrow I_{dir.\beta.\gamma} = R_{dir.\beta.\gamma} \cdot I_t \quad (\text{II} .11)$$

C'est une quantité qui intègre les paramètres géographiques de l'installation et les données astronomiques du soleil dans son mouvement.

L'évaluation de l'énergie directe reçue, en une journée sur la surface inclinée orientée, se fait par intégration de la puissance.

$$H_{dir.\beta.\gamma} = \int_{-\omega_s}^{\omega_s} I_{dir.\beta.\gamma} d\omega = \int_{-\omega_s}^{\omega} I_t \cdot R_{dir.\beta.\gamma} d\omega \quad (\text{II} .12)$$

II.5.1.2- Grandeur diffuse :

On fait l'hypothèse que le flux diffus est uniforme dans sa répartition dans le ciel, lequel est assimilé à un plan infini. Cette hypothèse permet de calculer $R_{diff.\beta}$ le facteur de correction relatif au rayonnement diffus une fois l'inclinaison choisie.

$$I_{diff.\beta} = R_{diff.\beta} \cdot I_{diff} \quad (\text{II} .13)$$

Avec :

$$R_{diff.\beta} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (\text{II} .14)$$

$R_{diff.\beta}$ est en fait le facteur de forme géométrique entre le capteur et le ciel. L'énergie diffuse reçue est aussi affectée de la même manière :

$$H_{diff.\beta} = R_{diff} \cdot H_{diff} \quad (\text{II} .15)$$

II.5.1.3- Grandeur réfléchie :

Le rayonnement reçu par le sol est composé du direct et du diffus, dont une partie est réfléchie selon des directions et intensités variables au cours du mouvement du soleil. Pour les applications solaires, où on ne s'intéresse qu'à l'aspect énergétique uniquement, on considère que la distribution de cette réflexion est isotrope. Et la correction se fait par R_{ref} qui ne tient compte que de l'inclinaison β :

$$I_{ref.\beta} = R_{ref.\beta} \cdot \rho_s (I_{dir} + I_{diff}) = R_{ref.\beta} \cdot \rho_s I_h \quad (\text{II} .16)$$

Avec :

I_h : Puissance globale reçue par une surface horizontale [W/m²]

$$R_{réf} = \frac{1 - \cos(\beta)}{2} ; \text{(Facteur de forme capteur sol)} \quad \text{(II .17)}$$

ρ_s : Réflectivité du sol ou albédo.

Pour l'énergie reflétée :

$$H_{réf.\beta} = R_{réf.\beta} \cdot \rho_s \cdot (H_{dir} + H_{diff}) = R_{réf.\beta} \cdot \rho_s \cdot H_h \quad \text{(II .18)}$$

Ainsi au total la puissance et l'énergie reçues sur un capteur orienté incliné sont :

$$I_{t,\beta,\gamma} = I_{dir.\beta,\gamma} + I_{diff.\beta} + I_{réf.\beta} \quad \text{(II .19)}$$

$$H_{t,\beta,\gamma} = H_{dir.\beta,\gamma} + H_{diff.\beta} + H_{réf.\beta} \quad \text{(II .20)}$$

II .6-Gisement solaire disponible en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure II.7:

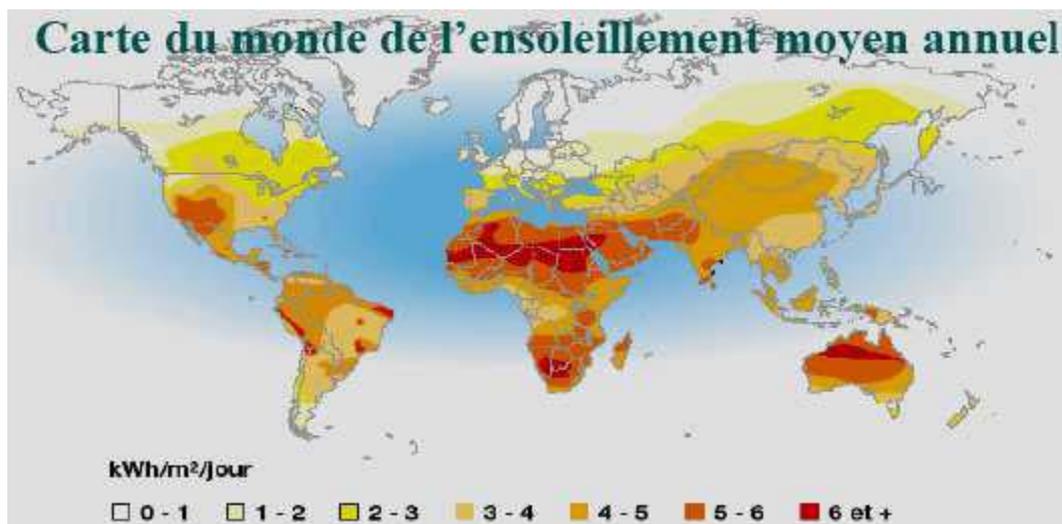


Figure II.7- Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [25]

La durée d'insolation sur le quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement en moyenne annuelle sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit annuellement près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2$ au Nord et $2263\text{KWh}/\text{m}^2$ au Sud du pays. Le tableau II.1 résume le potentiel solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Rapport de la surface de la région sur la Superficie totale du pays (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement en Heures/an	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue enKWh/m2/an	1700	1900	2650

Tableau II.1- le potentiel solaire en Algérie

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle, et en moyenne mensuelle est donnée par les figures ci-dessous. Elle présente les différents niveaux énergétiques qui donnent ainsi un découpage du pays en régions isoénergétiques.

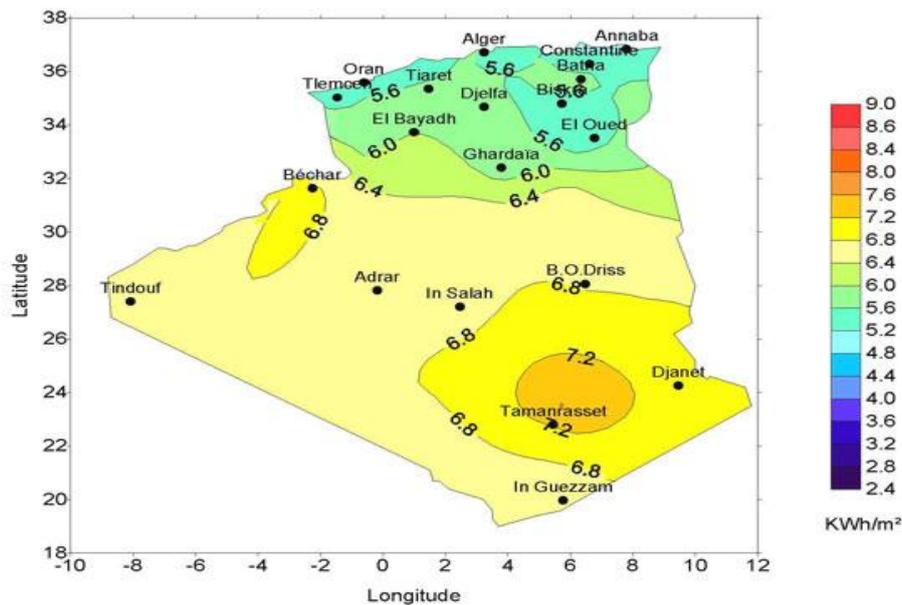


Figure II.8-Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [19]

❖ Irradiation directe journalière reçue sur un plan horizontal et sur un plan normal en mois de décembre, Juillet.

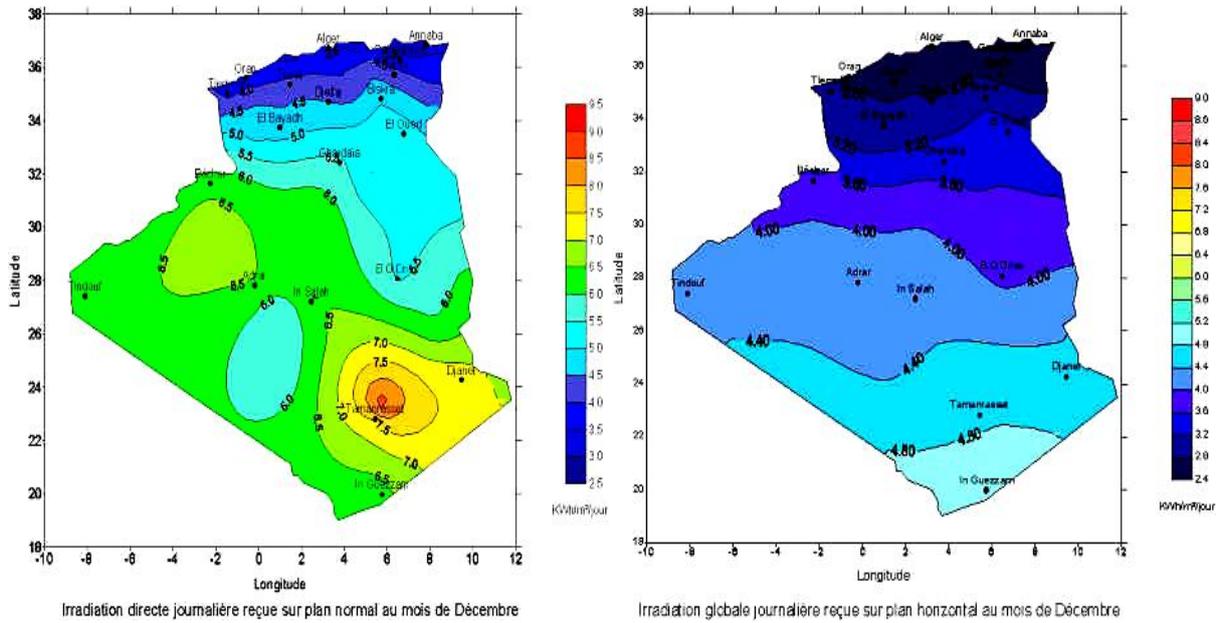


Figure II.9- Irradiation directe journalière reçue sur un plan horizontal en mois de décembre et Juillet.

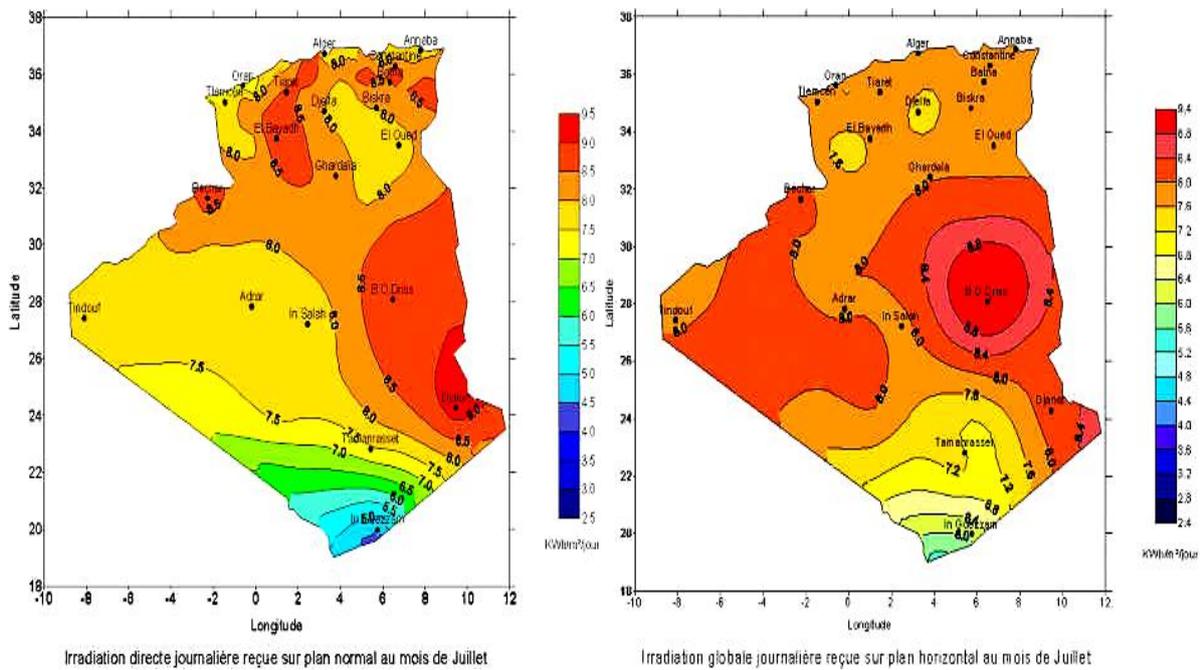


Figure II.10- Irradiation directe journalière reçue sur un plan normal en mois de décembre et Juillet.

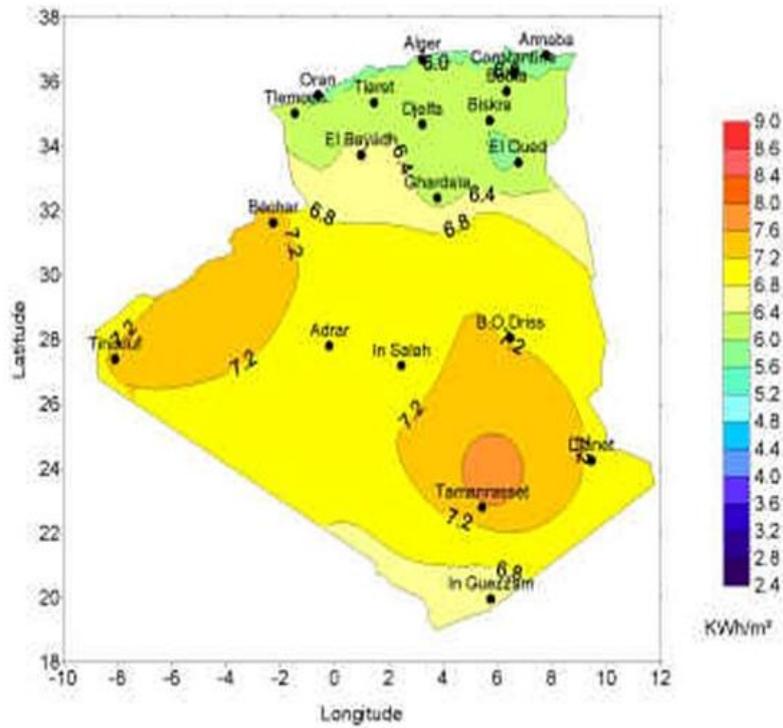


Figure II.13-Irradiation globale journalière reçue sur un plan incliné à la latitude de lieu au Printemps.

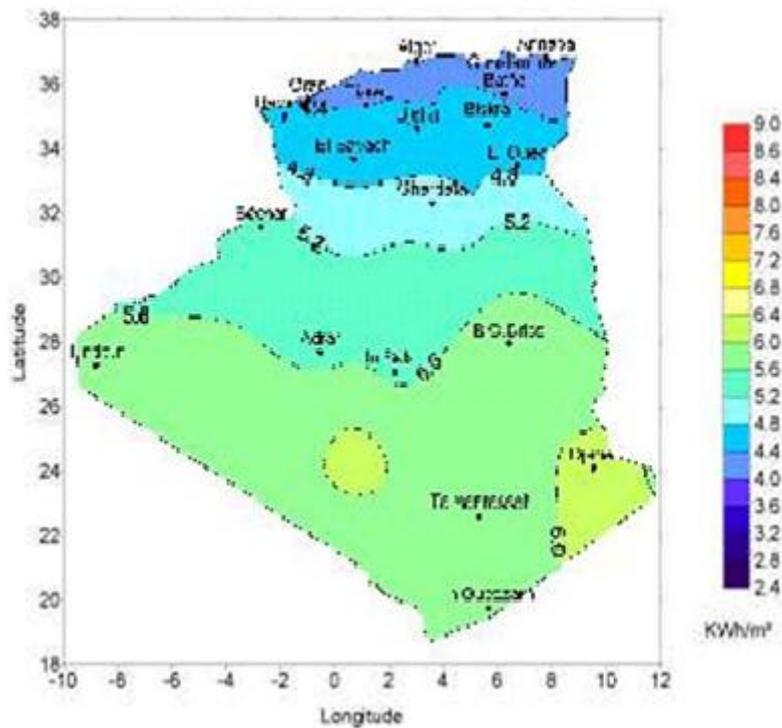


Figure II.14-Irradiation globale journalière reçue sur un plan incliné à la latitude de lieu en Automne.

D'après les cartes représentées ci dessus, on constate que le nord d'Algérie bénéficie d'un rayonnement solaire prometteur pour les applications solaires à basse température (le cuiseur solaire par exemple).

II .7- Design du prototype de cuiseur solaire à étudier :

Au vu de leur simplicité de fabrication, de leur moindre coût et la disponibilité des matériaux qui les constituent même dans les régions montagneuses et isolée, nous avons porté notre choix sur des cuiseurs solaires en boite ordinaire à surface d'ouverture horizontale. De plus, cette forme se prête bien à la cuisson d'un grand nombre de plats de la région.

II.7.1-les critères du design :

Pour le design du cuiseur solaire boite, des critères doivent être pris en considération :

- 1. Taille :** il devrait tenir compte de la quantité de nourriture généralement cuite mais sans que sa taille ne soit trop grande pour ne pas rendre difficile un éventuel déplacement.
- 2. Longévité :** il devrait être facilement exploitable durant toute l'année.
- 3. Réparable:** il devrait être facile à réparer si nécessaire.
- 4. Fonctionnalité :** il doit optimiser les températures de cuisson, au besoin être facilement réorienté par rapport à la position du soleil
- 5. Aspect :** il devrait sembler bien fait et professionnel, sans toutefois placer en priorité le souci de l'esthétique parfaite.
- 6. Disponibilité :** le cuiseur devrait être réalisé à partir de matériaux disponibles localement ou stockés en quantités suffisantes pour les matériaux importés. L'usage de pièces standard est souhaitable.
- 7. Coût :** le coût total devrait être réduit au minimum. Il faut écarter les conceptions où le coût de production de certaines parties du cuiseur ne peut pas être comprimé.

II.7.3-Description du modèle à étudier :

Le cuiseur solaire « boite » retenu est constitué principalement d'une double couverture transparente, fixée par des charnières à la partie supérieure du boîtier, d'une plaque absorbante, d'un réflecteur extérieur articulé et d'une boite rectangulaire isolée à l'arrière et sur les côtés comme montré sur le schéma descriptif de la figure II-15.

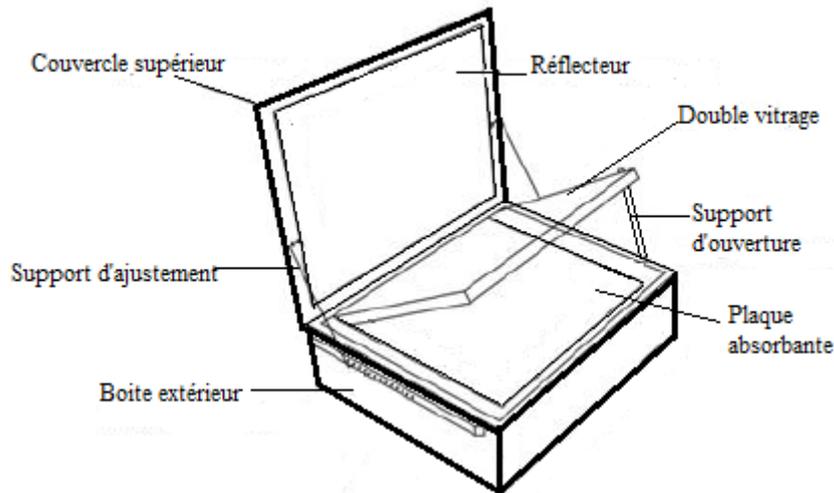


Figure II.15-Schéma du cuiseur boîte à étudier

II.7.4-Transfert de chaleur vers l'aliment à cuire dans un cuiseur solaire boîte :

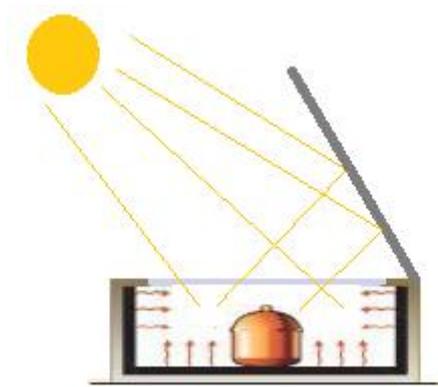


Figure II.16 : Schéma représentant le principe du cuiseur solaire boîte.

Quand un ustensile de cuisine est déposé sur la plaque absorbante d'un cuiseur solaire boîte, orienté vers le soleil, le transfert de chaleur vers l'aliment, qui se trouve à l'intérieur de l'ustensile, se fait dans les conditions suivantes :

La plaque absorbante est irradiée sur sa face supérieure. Par convection naturelle, elle transmet une grande partie du rayonnement absorbé qu'elle convertit en chaleur vers l'air intérieur. Par conduction, elle transmet une fraction de sa chaleur vers la base de l'ustensile de cuisine qui est en contact direct avec la plaque absorbante. Cette fraction de chaleur est absorbée par l'aliment se trouvant à l'intérieur de l'ustensile.

Le couvercle de l'ustensile de cuisine absorbe une quantité importante de rayonnement solaire, mais cette surface demeure non effective dans le processus de transfert de chaleur vers l'aliment à cuire car ce dernier n'est pas en contact direct avec le couvercle. Il existe une lame

d'air entre la surface supérieure de l'aliment et le couvercle, qui se comporte comme un isolant thermique. Par contre une grande partie de la chaleur du couvercle est transmise, par convection naturelle, à l'air intérieur du cuiseur.

La surface latérale de l'ustensile de cuisine est partiellement irradiée et est en contact direct avec l'air chaud intérieur du cuiseur. Elle est donc effective dans le processus du transfert de chaleur vers l'intérieur de l'ustensile et chauffe l'aliment à cuire.

II.8-Paramètre influant sur le cuiseur solaire :

Sur un site donné, il existe deux types de paramètres qui influent sur les performances du cuiseur solaire et dont il faut tenir compte:

II.8.1- Paramètres externes :

Ces paramètres sont liés au site :

- Paramètres géographiques, tels que la longitude, la latitude et la hauteur du soleil.
- Paramètres météorologiques, dont les plus fréquemment retenus sont :
 - la vitesse du vent, qui intervient surtout dans l'échange par convection entre la face externe et le milieu ambiant.
 - La température ambiante dont l'augmentation conduit à une décroissance de la production.
 - Paramètres d'ensoleillement : rayonnement global, position du soleilIl est évident que la cuisson dépend de la quantité de chaleur que reçoit le cuiseur (l'irradiation globale incidente).

II.8.2- paramètre internes :

II.8.2.1- Paramètres de position :

- L'emplacement du cuiseur : ils doivent être placés de façon à éviter les obstacles empêchant le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.
- L'orientation: elle dépend essentiellement de la période de fonctionnement du cuiseur pendant la journée ; on distingue notamment:
 - le fonctionnement en matinée : orientation Est
 - le fonctionnement en après- midi : orientation Ouest
 - le fonctionnement durant toute la journée : orientation Sud

II.8.2.1- Paramètre de construction :

Les matériaux utilisés dans la construction du cuiseur ont une grande influence sur le fonctionnement de ce dernier, notamment:

a-Matériaux structuraux :

Les matériaux structuraux devraient être choisis de sorte que la boîte maintienne une forme donnée, et soit durable dans le temps. Les matériaux structuraux incluent le bois, le contre-plaqué, le métal, le ciment, les briques, le plastique ...etc. Beaucoup de matériaux qui se comportent bien structurellement sont trop denses pour être de bons isolants. Pour assurer l'intégrité structurale a une bonne qualité d'isolation, il est habituellement nécessaire d'employer des matériaux structuraux séparés de ceux qui sont chargés de l'isolation.

b-Couvercle transparent :

Le cuiseur solaire en boîte met à profit l'effet de serre. La couverture est transparente au rayonnement solaire qui se transforme en chaleur dans la plaque absorbante. Cette dernière compte tenu des températures atteintes, émet des radiations dans le domaine de l'infrarouge. Mais ces émissions sont bloquées par la couverture (opaque à ces radiations) et sont réfléchies vers la plaque absorbante. C'est l'effet de serre.

En général tout vitrage est caractérisé par son coefficient de transmission (τ) et son coefficient de réflexion (ρ). Une augmentation du coefficient de transmission, entraîne d'une part, une augmentation de la partie du rayonnement direct incident reçu par la plaque absorbante- d'où un meilleur échauffement de l'air- et d'autre part, une diminution de la quantité d'énergie radiative directe absorbée par le vitrage, ce qui permet par la suite une diminution de la température de vitrage donc une diminution des pertes.

Le coefficient de réflexion (ρ) doit être le plus petit possible car une augmentation de ce dernier a pour effet d'abaisser la température de la plaque absorbante et donc l'air s'échauffe moins. En effet cette augmentation se traduit par une diminution du rayonnement direct incident sur la plaque absorbante.

On trouve dans la littérature divers matériaux utilisés pour les couvertures transparentes tel que le verre, le plexiglas et l'acrylique.

***Verre :**

Avec une épaisseur de 3 mm, le verre laisse passer entre 84 % et 92 % du rayonnement incident (sous une incidence normale). Il est conseillé de prendre du verre contenant moins

d'oxyde de fer pour s'approcher d'une transmission du verre pouvant atteindre 95% du rayonnement reçu.

La transmission peut atteindre 96 % pour le verre anti reflet recouvert de part et d'autre d'une couche de nanostructure (figure II.17). Le verre prismé évite qu'une trop grosse partie du rayonnement soit réfléchi quand l'angle d'incidence est faible. Le seul inconvénient des couvertures en verre consiste en leur fragilité vis à vis des chocs mécaniques et thermiques.

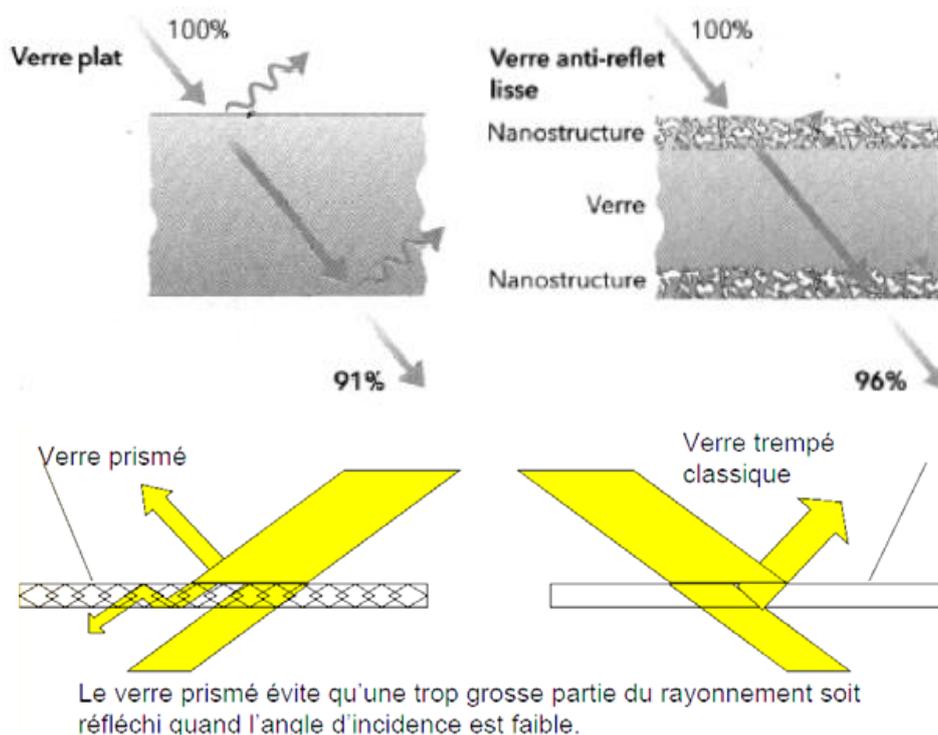


Figure II.17-Type de verre pour les couvertures

*** Polyméthacrylate de méthyle (plexiglas) :**

Ce matériau peut également remplacer le verre. Il est moins fragile mais il présente l'inconvénient de ne pas supporter une température de l'ordre de 95°C, et son coefficient de transmission est plus faible que celui du verre, de l'ordre de 83%.

*** Polycarbonate :**

Il transmet environ 84% du rayonnement reçu. Il a l'avantage d'avoir une solidité mécanique à toute épreuve, une facilité au découpage pour l'utilisation, et il réduit également l'inertie du cuiseur par sa légèreté.

De multiples améliorations sont apportées comme par exemple l'emploi d'une seconde vitre disposée au dessus du système, qui permet de diminuer les pertes par convection. Les pertes

par rayonnement infrarouge sont réduites de 30% car la moitié des 50% d'infrarouge émise vers l'extérieur par la première vitre, est récupérée par la seconde vitre.

Cependant, il faut compter les pertes supplémentaires de lumière solaire dues au remplacement d'un vitrage simple par un double paroi, en effet ces pertes varient avec le type de construction, avec la hauteur et l'azimut du soleil.

La présence d'un double vitrage (verre ou matériaux plastiques) occasionne des pertes par réflexion environ deux fois plus élevées que dans le cas d'une couverture simple, 8% dans le cas du verre, 9% à 11% et 10% à 12% dans celui du polyéthylène.

L'accroissement des pertes de lumière par absorption, due au vitrage supplémentaire, peut être considérée comme faible : 1% à 2% dans le cas du verre, 2 et 3% à 6% dans celui du polyéthylène. En passant d'un simple vitrage à un double vitrage, le rendement optique, diminue de l'ordre de 7%.

Les couvertures en verre sont presque toujours choisies au vu de leur disponibilité.

c-Plaque absorbante :

La nature de la plaque absorbante joue un rôle très important pour les performances d'un cuiseur solaire en boîte. Il a comme rôle de transformer en chaleur le rayonnement électromagnétique incident qu'il reçoit et de le transmettre sous forme de chaleur à l'ustensile de cuisson. Ses principales qualités sont donc :

- un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité,
- un pouvoir émissif dans l'infrarouge aussi faible que possible,
- une bonne conductibilité thermique,
- une faible inertie thermique.

Les absorbeurs souvent utilisés sont en aluminium, cuivre, acier, inoxetc.

Pour augmenter son coefficient d'absorption, la plaque absorbante peut être revêtue d'une couche mince de peinture sélective.

d-Isolant :

Dans le cas des cuiseurs solaires en boîte, l'isolant est placé sous la plaque absorbante et aussi sur les côtés de la boîte. On peut isoler les parois du cuiseur solaire en boîte avec plusieurs matériaux. En général il n'est pas recommandé d'utiliser de la fibre de verre ou du Styrofoam car ils donnent des gaz malodorants en se réchauffant. Les substances naturelles comme le coton, la paille, la laine, les plumes, ou même du papier journal mis en boule fonctionnent très bien. Le mieux est d'utiliser de la laine de verre qui offre un meilleur rendement.

Un cuiseur solaire en boîte perd le plus de chaleur par le verre ou le plastique, et non à travers des parois. C'est pourquoi une amélioration au niveau de l'isolation ne va pas avoir grande influence ni sur la température ni sur le pouvoir de cuisson. Les caractéristiques désirées des matériaux de construction sont : disponibilité locale, coût bas, manipulation facile pendant la fabrication, légèreté et effets non-toxiques.

II.9- Pré-dimensionnement d'un cuiseur solaire en boîte :

Quelques notions sont très importantes pour le pré-dimensionnement d'un cuiseur solaire boîte.

II.9 .1-La taille de cuiseur et le volume de la chambre de cuisson :

La taille du cuiseur est un facteur important non seulement pour la quantité de nourriture qu'elle fait cuire, mais également elle dicte le temps de cuisson. En règle générale, le cuiseur le plus grand (et la surface la plus grande pour recevoir le rayonnement solaire) est le plus rapide pour faire cuire. Cependant, la conception du cuiseur est un facteur beaucoup plus important qu'elle ne semblerait à première vue.

La Figure II.18 montre un exemple de trois formes différentes de boîte intérieure de cuiseur :

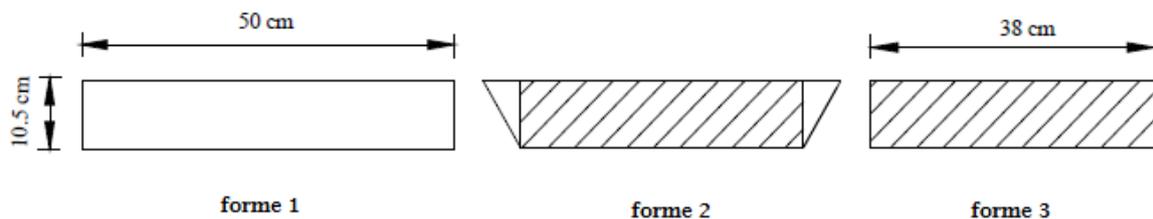


Figure II.18-Différentes formes de boîte intérieure

- 1- Les modèles 1 et 2 sont semblables dans la surface supérieure.
- 2- Les modèles 2 et 3 sont semblables dans la surface inférieure.
- 3- Les trois cas ont la même profondeur.

Pour choisir la forme, qui réalise la meilleure efficacité thermique, deux facteurs importants devraient être calculés :

II.9.2-Taux de concentration :

Le taux de concentration géométrique est défini par le rapport entre la surface qui reçoit l'éclairage solaire et la surface des déperditions de chaleur.

$$R = \frac{\text{surface supérieure}}{\text{surface du fond} + \text{surface des murs intérieurs}} \quad (\text{II} .21)$$

Pour le modèle **1** on a :

$$R_1 = \frac{a^2}{a^2 + 4ad} = \frac{50^2}{50^2 + (4 \times 50 \times 10.5)} = 0.55$$

Pour le modèle **2** on a :

$$R_2 = \frac{a^2}{b^2 + 4d \frac{a+b}{2}} = \frac{50^2}{38^2 + (4 \times 10.5 \frac{50+38}{2})} = 0.76$$

Pour le modèle **3** on a :

$$R_3 = \frac{b^2}{b^2 + 4bd} = \frac{38^2}{38^2 + 4 \times 38 \times 10.5} = 0.48$$

II.9 .3-Facteur de volume effectif :

$$F = \frac{\text{surface du couvercle}}{\text{volume de la chambre de cuisson}} \quad (\text{II .22})$$

Pour le modèle **1** on a :

$$F_1 = \frac{a^2}{a^2d} = \frac{50^2}{50^2 \times 10.5} = 0.096$$

Pour le modèle **2** on a :

$$F_2 = \frac{a^2}{\frac{d}{2} a^2 + b^2} = \frac{50^2}{\frac{10.5}{2} 50^2 + 38^2} = 0.122$$

Pour le modèle **3** on a :

$$F_3 = \frac{b^2}{b^2d} = \frac{38^2}{38^2 \times 10.5} = 0.096$$

De ce fait on a :

$R_2 > R_1 > R_3$ et $F_2 > F_1$ et F_3 on peut donc conclure que :

- Le modèle **2** est construit avec le minimum de matériel comparé avec le modèle **1**
- Le modèle **2** absorbe le maximum de rayonnement solaire car R est élevé.

II.9.4-Surface de couverture transparente :

Le principe de la cuisson solaire est que des rayons du soleil reçus par la couverture transparente sont convertis en chaleur, laquelle est transférée vers l'ustensile contenant l'aliment à cuire .La capacité d'un cuiseur solaire de rassembler les rayons solaires est

directement liée à la surface de la couverture transparente recevant le rayonnement incident. À cet égard, Si $MCp\Delta T$ est l'énergie exigée pour relever la température de l'eau de T_i à T_f où $\Delta T = T_f - T_i$ et $I t \eta$ est la quantité d'énergie solaire disponible, la surface collectrice, c'est-à-dire la surface de couverture transparente de cuiseur, est obtenue par :

$$A_s = \frac{MCp\Delta T}{I t \eta} \quad (\text{II .23})$$

II.9.5-L'épaisseur d'isolation du cuiseur :

L'épaisseur d'isolation du cuiseur est estimée à partir de la loi de Fourier de la conduction :

$$x = \frac{KA_L\Delta T_p}{q_L} \quad (\text{II .24})$$

Où K est la conductivité thermique de l'isolation, A_L est la surface de déperditions (le fond + les murs latéraux) et ΔT_p est la différence entre la température de la plaque absorbante et la température ambiante.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence que le Nord d'Algérie bénéficie d'un rayonnement solaire prometteur pour les applications de l'énergie solaire à basse température comme par exemple pour le cuiseur solaire. Néanmoins la réalisation de ce genre de système doit se faire avec des matériaux de construction disponibles et présenter un design de grande simplicité pour intéresser une grande partie de la population rurale de ces régions pauvres et qui ne disposent pas de gros moyens industriels.

Chapitre III

Modélisation du prototype de cuisEUR solaire étudié

III.1-Introduction :

Ce chapitre est consacré à la modélisation du prototype de cuiseur solaire en boîte où nous établirons le bilan thermique au niveau de chaque partie. Le système d'équations résultant est résolu par une approche numérique en acceptant les hypothèses simplificatrices nécessaires.

III.2-Description de cuiseur solaire étudié :

Le cuiseur solaire en boîte est essentiellement en contreplaqué renforcé par une ossature intérieure en bois dur et Il est isolé à l'arrière et sur les côtés par un isolant en laine de verre de conductivité thermique de $0,04 \text{ W/m.K}$.

La plaque absorbante est en aluminium noircie. Elle est disposée sur le fond du boîtier. La couverture transparente est constituée d'un double vitrage de type commercial d'épaisseur 4 mm, les deux vitres sont espacées de 10mm.

La couverture transparente est munie d'un cadre métallique qui est fixé par des charnières sur le bord supérieur du boîtier de telle sorte à permettre l'ouverture du cuiseur.

Afin d'augmenter la fraction du rayonnement solaire absorbée par la plaque chauffante, un réflecteur en miroir plan est posé sur une plaque de contre-plaqué fixée sur le bord supérieur de la boîte. La fixation est assurée par des cornières en aluminium avec des charnières qui permettent l'orientation du réflecteur quand le système est exposé au soleil.

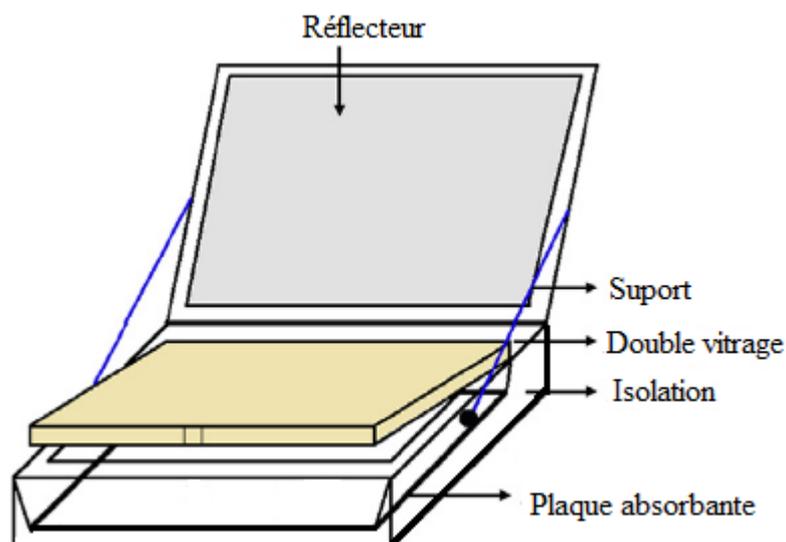


Figure III.1-Schéma du cuiseur boîte à étudier

III.3-Modélisation du cuiseur solaire étudié :

La modélisation est faite dans le cas où le cuiseur est sans charge, C'est-à-dire que le système est exposé au rayonnement solaire à vide. Aucun ustensile de cuisine n'est déposé sur la plaque absorbante.

Les éléments de base à considérer sont :

- L'environnement extérieur (l'air ambiant);
- La couverture transparente (vitrage);
- L'air intérieur ;
- La plaque absorbante (plaque chauffante).

Le cuiseur solaire constitue un système énergétique complexe où la plupart des modes de transfert thermique sont mis en jeu. Il s'agit de :

- L'apport solaire direct sur la plaque absorbante.
- L'apport solaire réfléchi par le réflecteur externe.
- Les échanges radiatifs entre les différents éléments.
- Les échanges convectifs entre l'air intérieur et les autres éléments.
- Les échanges convectifs et conductifs vers le milieu ambiant.

La figure III.2 illustre les différents échanges thermiques mis en jeu entre les différents éléments du cuiseur solaire. Notre modèle s'articule autour de la formulation des bilans d'énergies instantanés entre les différents composants du cuiseur. Chacun des éléments du cuiseur est caractérisé par une variable d'état : Il s'agit de la température.

- La couverture transparente

Elle est constituée d'un double vitrage ordinaire ; la vitre extérieure (V_1) et la vitre intérieure (V_2) auxquelles on associe, respectivement, deux variables d'état T_{V_1} et T_{V_2} .

- L'air intérieur

Par simplification, la température T_a de l'air intérieur est considérée uniforme dans le volume interne du cuiseur. En réalité, un gradient de température existe dans le sens vertical entre le vitrage et la plaque absorbante ainsi que dans le sens horizontal.

- La plaque absorbante

Il s'agit d'une plaque métallique plane dont la température T_{ab} est uniforme sur toute la surface.

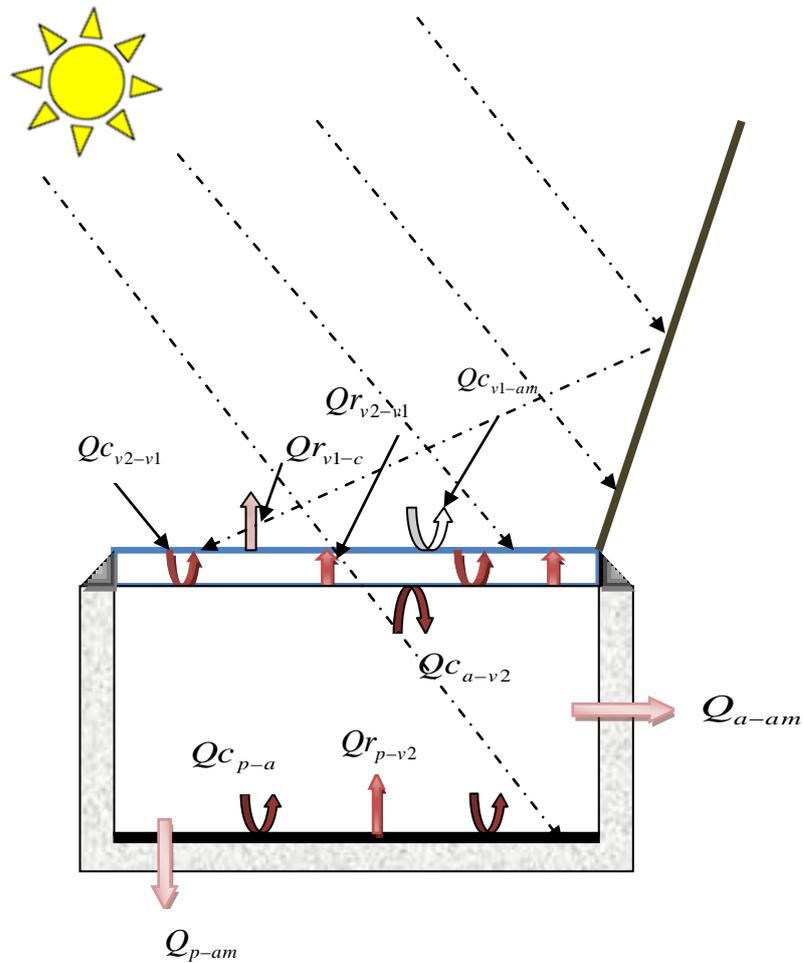
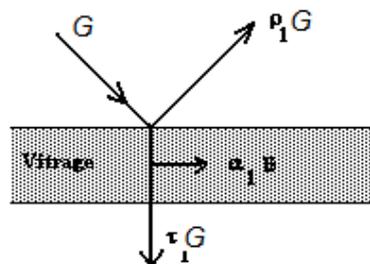


Figure III.2 -Schéma représentant les éléments du cuiseur solaire étudié

II .4-les différents phénomènes radiatifs:

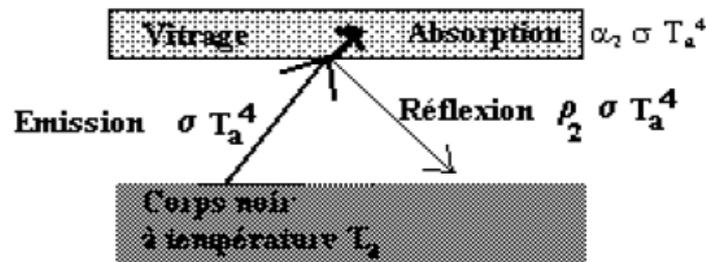
Avant d'établir les bilans thermiques sur le cuiseur solaire boîte à étudier, on doit décrire les différents phénomènes radiatifs intervenant en fonctionnement de ce dernier. L'éclairement solaire incident G frappe la paroi transparente (vitrage). Une fraction $\rho_1 G$ est réfléchi, une fraction $\alpha_1 G$ est absorbée par la paroi transparente, tandis que la fraction restante du flux incident $\tau_1 G$ traverse la paroi transparente.



Tout le rayonnement $\tau_1 G$ transmis par la première paroi transparente est reçu par la deuxième vitre et subit le même traitement au niveau de cette paroi.

Par la suite le rayonnement $\tau_1^2 G$ transmis par la seconde vitre vient frapper la plaque absorbante noire, qui en absorbe une fraction.

La plaque absorbante à la température T_{ab} , émet à son tour un rayonnement dont l'émittance est fournie par la loi de Stefan-Boltzmann, soit: σT_{ab}^4



Ce rayonnement frappe la paroi transparente. Une fraction $\sigma \rho_2 T_{ab}^4$ est réfléchiée et revient donc vers l'absorbeur. Une autre fraction $\sigma \alpha_2 T_{ab}^4$ est absorbée.

III.5-Hypothèses simplificatrices de base :

Pour l'établissement des équations traduisant les bilans thermiques dans une section du prototype de cuiseur solaire à étudier nous avons admis les hypothèses généralement adoptées suivantes :

- 1- Les différents éléments constituant le système sont à des températures différentes mais uniformes ;
- 2- Le rayonnement solaire n'est incident que sur le vitrage, le réflecteur externe et la plaque absorbante car le cuiseur est constamment orienté suivant l'axe vertical.
- 3- Le gradient de température dans l'épaisseur du vitrage et la plaque absorbante est négligeable.
- 4- Les pertes thermiques dues aux fuites d'air sont négligeables.
- 5- Afin de ne pas négliger les pertes thermiques latérales, on considère que les surfaces latérales internes de l'enceinte (non absorbantes du rayonnement solaire) sont à la température de l'air intérieur. Ceci permet de surestimer légèrement les pertes thermiques latérales vers le milieu ambiant à travers les parois isolées.

- 6- L'échange radiatif entre la plaque absorbante et les parois verticales est négligeable ;
- 7- Les propriétés thermo-physiques des matériaux constituant le système sont constantes dans les marges de température de fonctionnement du cuiseur.

III.6-Schéma électrique équivalent du système

Pour construire le modèle mathématique, l'écriture des bilans thermiques au niveau de chaque élément est établie suivant le schéma électrique équivalent du système montré sur la figure suivante

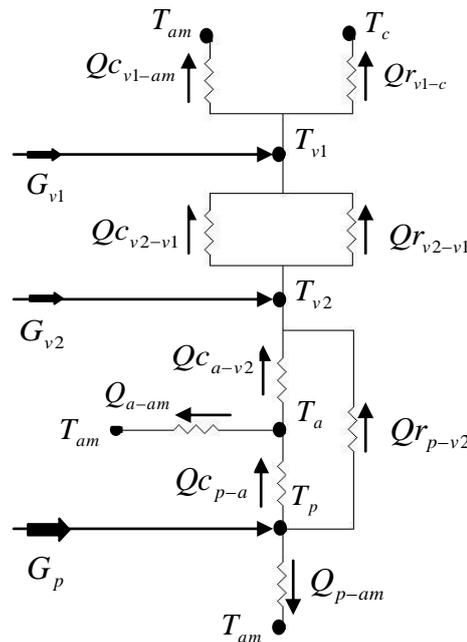


Figure III.3-Schéma électrique équivalent du système étudié

III.7-Ecriture des bilans énergétiques du système

III.7.1.1-Estimation de rayonnement solaire :

Pour calculer l'éclairement direct incident sur le plan récepteur de cuiseur solaire, on utilise la formule de Kasten car cette dernière tient compte du trouble atmosphérique Tl et du trajet optique atmosphérique m_h .

$$I_d = I \times \exp \left[-\frac{m_h \times Tl}{0.9m_h + 9.4} \right] \quad \text{III-1}$$

Avec : $I = I_0 \times \left[1 - \frac{\sin(\delta)}{11.7} \right]$ III-2

$$Tl = 2.5 + 16\beta_A + 0.5 \ln w \quad \text{III-3}$$

β_A est le coefficient d'angström et w , la hauteur d'eau condensable dont le tableau ci-dessous présente les valeurs pour trois états atmosphériques différents :

	β_A	W (cm)
Ciel pur	0.05	1
Ciel moyen	0.1	2
Ciel dégagé	0.2	5

Tableau III.1- Valeurs du coefficient d'angström et de la hauteur d'eau condensable.

La distance optique atmosphérique à une altitude Z (la masse atmosphérique) est exprimée par la formule :

$$m_h = \frac{1-0.1Z}{\sin h + 0.15(h+3.885)^{-1.253}} \quad \text{III-4}$$

Le rayonnement solaire diffus reçu par un plan horizontal est:

$$D_H = \frac{I}{25} \overline{\sin h} Tl - 0.5 - \overline{\sin h} \quad \text{III-5}$$

Le rayonnement solaire global reçu par un plan horizontal :

$$G_H = 1270 - 56 \times Tl \left(\overline{\sin h} \right)^k \quad \text{III-6}$$

$$\text{Avec } k = \frac{Tl+36}{33} \quad \text{III-7}$$

La puissance solaire directe E reçue par une surface quelconque est déterminée par la relation suivante :

$$E = I_d \cos \theta$$

Où θ est l'angle entre la normale à la surface réceptrice et la direction du soleil.

I_d est la puissance solaire directe arrivant sur une surface unitaire placée orthogonalement aux rayons solaires. Nous avons déjà montré que l'angle θ est donné par son cosinus :

$$\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta$$

III.7.1.2-Puissance solaire réfléchié par le réflecteur sur la surface de la vitre extérieure :

On considère que le cuiseur est orienté plein Sud et que le réflecteur forme un angle β avec le plan horizontal.

$$I_r = f_{mv} I_d \rho_m \frac{S_m}{A} \cos \theta$$

f_{mv} : Facteur de forme géométrique entre le réflecteur et la vitre extérieure

L'angle d'inclinaison du réflecteur β est calculé à partir de: $\beta = \frac{2}{3}(\pi - \alpha)$

Avec : $\alpha = \varphi - \delta$

α : Angle des rayons avec la normale au plan du réflecteur ($^\circ$)

III.7.1.3-Puissance solaire absorbée par la vitre extérieure :

$$G_{v_1} = \alpha_v I_d \sin H + D_h + I_r \quad (\text{III.8})$$

III.7.1.4-Puissance solaire absorbée par la vitre intérieure :

$$G_{v_2} = \tau_v G_{v_1} \quad (\text{III.9})$$

III.7.1.5- Puissance solaire absorbée par la plaque absorbante :

$$G_p = \alpha_{ab} \tau_v^2 (I_d \sin H + D_h + f_{ma} I_d \rho_m \frac{S_m}{A} \cos \theta) \quad (\text{III.10})$$

f_{ma} : Facteur de forme géométrique entre le réflecteur et la plaque absorbante

III.7.2-Bilans énergétiques des composants :

III.7.2.1-Bilan énergétique de la vitre extérieure

La variation d'énergie interne est égale à la somme des quantités de chaleur échangées :

$$(m cp)_{v_1} \frac{dT_{v_1}}{dt} = S_v G_{v_1} - Q_{r_{v_1-c}} + Q_{r_{v_2-v_1}} - Q_{c_{v_1-amb}} + Q_{c_{v_2-v_1}} \quad (\text{III.11})$$

$S_v G_{v_1}$: Flux solaire absorbé par la vitre extérieure.

$Q_{r_{v_1-c}}$: Flux rayonné par la vitre extérieure vers le ciel.

La quantité d'énergie quittant un corps sous forme de chaleur rayonnée dépend de la nature de ce corps, de sa température et de sa surface.

La loi de Stefan-Boltzmann, obtenue par l'intégration de la formule de Planck sur l'ensemble du spectre rayonné donne l'émittance d'un corps noir :

$$M = \sigma T^4 \quad (\text{III.12})$$

σ : Constante de Stefan-Boltzmann égale à $5,67.10^{-8} \text{ w/m}^2.\text{k}^4$

T est la température du corps noir.

Le flux d'énergie échangé par rayonnement entre deux surfaces grises S_1 et S_2 en échange mutuel l'une avec l'autre, de températures respectives T_1 et T_2 , et de coefficients d'émissivités respectifs ε_1 et ε_2 , est donné par :

$$\Phi_{1,2} = \sigma S_1 F_{12} T_1^4 - T_2^4 = \sigma S_2 F_{21} T_1^4 - T_2^4 \quad (\text{III.13})$$

F_{12} et F_{21} sont les facteurs de forme gris entre S_1 et S_2 et dépendent des propriétés radiatives des matériaux, F_{12} est le facteur de forme géométrique.

$$F_{12} = \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \times \frac{S_1}{S_2}^{-1} \quad (\text{III.14})$$

Les facteurs de forme géométriques vitre1/vitre2 et vitre2/absorbeur sont égaux à l'unité ; ce qui donne pour les facteurs de forme gris dans ces deux cas :

$$F_{12} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1^{-1} \quad (\text{III.15})$$

Le ciel de température T_c joue le rôle de corps noir dans ses échanges radiatifs avec le cuiseur en raison de l'importance relativement infinie de sa surface. Le coefficient d'échange radiatif vitre-ciel est de ce fait calculé comme :

$$hr_{v_1-c} = \sigma \varepsilon_{v_1} (T_c^2 + T_{v_1}^2) (T_c + T_{v_1}) \quad (\text{III.16})$$

$$\text{Donc : } Q_{r_{v_1-c}} = \sigma S_v \varepsilon_v (T_{v_1}^4 - T_c^4) = hr_{v_1-c} S_v (T_{v_1} - T_c) \quad (\text{III.17})$$

L'estimation de la température T_c a fait l'objet de nombreuses études et plusieurs corrélations empiriques existent dans la littérature consacrée à cette question. Cependant, nous avons retenu pour sa simplicité d'emploi la relation très utilisée de Swinbank :

$$T_c = 0,0552 T_{amb}^{1,5} \quad (\text{III.18})$$

$Q_{r_{v_2-v_1}}$: Flux échangé par rayonnement entre les deux vitres

$$Q_{r_{v_2-v_1}} = hr_{v_2-v_1} S_v (T_{v_2} - T_{v_1}) \quad (\text{III.19})$$

$hr_{v_2-v_1}$: Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre les deux vitrages est calculé à partir de l'équation suivante.

$$F_{v_2-v_1} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{v_1}} + \frac{1}{\varepsilon_{v_2}} - 1} \quad (\text{III.20})$$

$$\text{et } hr_{v_2-v_1} = \frac{\sigma (T_{v_2} + T_{v_1}) T_{v_2}^2 + T_{v_1}^2}{\frac{1}{\varepsilon_{v_1}} + \frac{1}{\varepsilon_{v_2}} - 1} \quad (\text{III.21})$$

$Q_{c_{v2-amb}}$: Flux thermique échangée par convection entre la vitre extérieure et l'air ambiant :

$$Q_{c_{v2-amb}} = hc_{v_1-amb} S_v (T_{v_1} - T_{amb}) \quad (III.22)$$

hc_{v_1-amb} est le coefficient d'échange convectif entre la vitre extérieure et l'air ambiant,

estimé par la relation de Hottel et Woertz :

$$hc_{v_1-amb} = 5,7 + 3,8 U \quad (III.23)$$

U : vitesse du vent parallèle à la vitre.

$Q_{c_{v2-v1}}$: Flux thermique échangé par convection entre les deux vitres.

$$Q_{c_{v2-v1}} = hc_{v_1-v_2} S_v (T_{v_1} - T_{v_2}) \quad (III.24)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection entre les deux vitrages est calculé à partir de l'équation suivante:

$$hc_{v_1-v_2} = N_u \times \frac{K_{air}}{e_{v_2-v_1}} \quad (III.25)$$

K_{air} : Coefficient de conductivité thermique de l'air entre les deux vitres.

$e_{v_2-v_1}$: La distance entre les deux vitres.

Le nombre de Nusselt est estimé à partir de la corrélation de Hollands :

$$N_u = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta}\right)^* \times \left(1 - \frac{1708 \sin 1,8\beta^{1,6}}{Ra \cos \beta}\right) + \frac{Ra \cos \beta}{5830}^{1/3} - 1 \quad (III.26)$$

β est l'inclinaison de la vitre. Comme dans notre cas la vitre est horizontale, nous obtenons :

$$N_u = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708}{Ra}\right)^* \times \frac{Ra}{5830}^{1/3} \quad (III.27)$$

g : Constante gravitationnelle

ΔT : Différence de température entre les deux plaques

β' : Coefficient d'expansion volumétrique (gaz parfait $\beta' = \frac{1}{T_{moy}}$)

$e_{v_2-v_1}$: Distance entre les deux vitres

α : Diffusivité thermique de gaz

ν : viscosité cinématique de gaz

Ra : Nombre de Rayleigh

Le signe * indique que lorsque la quantité est négative, elle vaut zéro.

Le nombre de Rayleigh est donné par la relation :

$$Ra = \frac{g \cdot \Delta T \cdot \beta' \cdot e_{v_2-v_1}^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (\text{III.28})$$

g : Accélération de la pesanteur

ΔT : Différence de température entre les deux plaques

β' : Coefficient d'expansion volumétrique de l'air ($\beta' = \frac{1}{T_{moy}}$)

$e_{v_2-v_1}$: Distance entre les deux vitres

α : Diffusivité thermique de l'air

ν : viscosité cinématique de gaz

Finalement le bilan sur la vitre extérieure s'écrit :

$$(m \cdot cp)_{v_1} \frac{dT_{v_1}}{dt} = S_v G_{v_1} - hr_{v_1-c} S_v (T_{v_1} - T_c) - hc_{v_1-amb} S_v (T_{v_1} - T_{amb}) + S_v (hr_{v_2-v_1} + hc_{v_1-v_2}) (T_{v_2} - T_{v_1}) \quad (\text{III.29})$$

III.7.2.2-Bilan énergétique de la vitre intérieure

L'équation résultante du bilan énergétique est :

$$(m \cdot cp)_{v_2} \frac{dT_{v_2}}{dt} = S_v G_{v_2} + Q_{r_{ab-v_2}} + Q_{c_{a-v_2}} - Q_{r_{v_2-v_1}} - Q_{c_{v_2-v_1}} \quad (\text{III.30})$$

$S_v G_{v_2}$: Flux absorbée par la vitre intérieure

$Q_{r_{ab-v_2}}$: Flux de rayonnement entre la vitre intérieure et l'absorbant

$$Q_{r_{ab-v_2}} = hr_{ab-v_2} S_v (T_{ab} - T_{v_2}) \quad (\text{III.31})$$

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre intérieure hr_{ab-v_2} est calculé comme :

$$hr_{ab-v_2} = \sigma \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{ab}} + \frac{1}{\varepsilon_{v_2}} - 1} (T_{ab} + T_{v_2}) T_{ab}^2 + T_{v_2}^2 \quad (\text{III.32})$$

$Q_{r_{v_2-v_1}}$ Flux de rayonnement entre la vitre intérieure et la vitre extérieure :

$$Q_{r_{v_2-v_1}} = hr_{v_2-v_1} S_v (T_{v_2} - T_{v_1}) \quad (\text{III.33})$$

$Q_{c_{a-v_2}}$: Flux dû à l'échange convectif entre la vitre intérieure et l'air du cuiseur :

$$Q_{c_{a-v_2}} = hc_{v_2-a} S_v (T_{ab} - T_{v_2}) \quad (\text{III.34})$$

$$hc_{a-v_2} = Nu \times \frac{K_{air}}{h_{moy}} \quad (\text{III.35})$$

$Q_{c_{v_2-v_1}}$ Flux dû à l'échange par convection entre la vitre intérieure et la vitre extérieure

$$Q_{c_{v_2-v_1}} = hc_{v_1-v_2} S_v (T_{v_2} - T_{v_1}) \quad (\text{III.36})$$

Finalement le bilan sur la vitre intérieure s'écrit :

$$m cp_{v_2} \frac{dT_{v_2}}{dt} = S_v G_{v_2} + hr_{ab-v_2} S_v T_{ab} - T_{v_2} + hc_{a-v_2} (T_a - T_{v_2}) - (hc_{v_1-v_2} + hr_{v_2-v_1}) S_v (T_{v_2} - T_{v_1}) \quad (\text{III.37})$$

III.7.2.3-Bilan énergétique de l'air intérieur

$$(m cp)_a \frac{dT_a}{dt} = Q_{c_{p-a}} - Q_{c_{a-v_2}} - Q_{c_{a-amb}} \quad (\text{III.38})$$

$Q_{c_{p-a}}$: Flux dû à l'échange par convection entre la plaque absorbante et l'air intérieur

$$Q_{c_{p-a}} = hc_{ab-a} S_{ab} (T_{ab} - T_a) \quad (\text{III.39})$$

$Q_{c_{a-v_2}}$: Flux dû à l'échange par convection entre la vitre intérieure et l'air intérieur

$$Q_{c_{a-v_2}} = hc_{a-v_2} S_v (T_a - T_{v_2}) \quad (\text{III.40})$$

$Q_{c_{a-amb}}$: Les pertes thermiques par conduction

$$Q_{c_{a-amb}} = \frac{k}{e} S_L (T_a - T_{amb}) \quad (\text{III.41})$$

Finalement le bilan sur l'air du cuiseur s'écrit :

$$(m cp)_a \frac{dT_a}{dt} = hc_{ab-a} S_{ab} (T_{ab} - T_a) - hc_{a-v_2} S_v (T_a - T_{v_2}) - \frac{k}{e} S_L (T_a - T_{amb}) \quad (\text{III.42})$$

III.7.2.4-Bilan énergétique de la plaque absorbante

$$(m cp)_{ab} \frac{dT_{ab}}{dt} = S_{ab} G_{ab} - Q_{c_{ab-a}} - Q_{r_{ab-v_2}} - Q_{c_{ab-amb}} \quad (\text{III.43})$$

$S_{ab} G_{ab}$: Flux absorbé par la plaque absorbante

$Q_{r_{ab-v_2}}$: Flux échangé par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre intérieure.

$$Q_{r_{p-v_2}} = hr_{ab-v_2} S_{ab} (T_{ab} - T_{v_2}) \quad (\text{III.38})$$

Comme la plaque absorbante et la vitre intérieure sont de même surface $hr_{ab-v_2} = hr_{v_2-ab}$

$Q_{c_{p-a}}$: Flux dû à l'échange convectif entre l'absorbeur et d'air intérieur :

$$Q_{c_{p-a}} = hc_{ab-a} S_{ab} (T_{ab} - T_a) \quad (\text{III.39})$$

$$hc_{ab-a} = N_u \times \frac{K_{air}}{h_{moy}} \quad (\text{III.40})$$

$$Q_{c_{p-amb}} = \frac{k}{e} S_{ab} (T_{amb} - T_{ab}) \quad (\text{III.41})$$

Finalement le bilan thermique de l'absorbeur s'écrit :

$$m_{ab} cp_{ab} \frac{dT_{ab}}{dt} = S_{ab} G_{ab} - hr_{ab-v_2} S_{ab} T_{ab} - T_{v_2} - hc_{ab-a} S_{ab} T_{ab} - T_a - \frac{k}{e} S_{ab} (T_{ab} - T_{amb}) \quad (\text{III.42})$$

III.8- Résolution du système d'équations :

Si on suppose que le régime de fonctionnement est permanent, les équations finales des divers bilans par rapport aux températures sont ordonnées alors comme suit:

$$hr_{v_2-v_1} + hc_{v_1-v_2} + hr_{v_1-c} + hc_{v_1-amb} T_{v_1} - (hr_{v_2-v_1} + hc_{v_1-v_2}) T_{v_2} = G_{v1} + hr_{v_1-c} T_c + hc_{v_1-amb} T_{amb}$$

$$-(hc_{v_1-v_2} + hr_{v_2-v_1}) T_{v_1} + (hc_{v_1-v_2} + hr_{v_2-v_1} + hr_{ab-v_2} + hc_{a-v_2}) T_{v_2} - hc_{a-v_2} T_a - hr_{ab-v_2} T_{ab} = G_{v2}$$

$$-hc_{a-v_2} S_v T_{v_2} + (hc_{ab-a} S_{ab} + hc_{a-v_2} S_v + \frac{k}{e} S_L) T_a - hc_{ab-a} S_{ab} T_{ab} = \frac{k}{e} S_L T_{amb}$$

$$-hr_{ab-v_2} T_{v_2} - hc_{ab-a} T_a + (hr_{ab-v_2} + hc_{ab-a} + \frac{k}{e}) T_{ab} = G_P + \frac{k}{e} T_{amb}$$

Dans ce système d'équations les paramètres inconnus sont: $(T_{v_1}, T_{v_2}, T_a, T_{ab})$

Ces équations forment un système d'équations linéaires qui peut être écrit sous la forme matricielle

$$A T = B \quad \text{Où} \quad T = \begin{pmatrix} T_{v_1} \\ T_{v_2} \\ T_a \\ T_{ab} \end{pmatrix}$$

Les températures sont déterminées par la matrice inverse : $T = A^{-1} B$

Les étapes de calcul des quatre températures nécessitent la connaissance des coefficients d'échanges par rayonnement, convection et par conduction. Au début des calculs nous avons affecté à ces coefficients des valeurs initiales judicieusement choisies. En effet elles correspondent aux coefficients moyens mesurés dans une étude expérimentale d'un cuiseur boîte [8]. Pour nous rapprocher de ce modèle, nous avons adopté les dimensions et propriétés des matériaux du cuiseur de référence.

❖ Structure du code de calcul :

Nous avons développé un code de calcul en langage Matlab. Ce logiciel est un outil de calcul numérique, de programmation et de visualisation graphique. C'est un environnement interactif de travail avec les matrices. De ce fait le système d'équations est d'abord mis sous la forme matricielle avant sa résolution par Matlab.

Ce code est constitué des parties suivantes :

- 1- entrer les grandeurs météorologiques du site choisi (latitude, longitude, altitude, albédo)
- 2- entrer les paramètres caractéristiques du cuiseur en boîte.
- 3- calculer la déclinaison d et l'angle w , hauteur du soleil h .
- 4- calculer le rayonnement direct I_d et diffus D_h .
- 5- calculer l'angle d'inclinaison de réflecteur β en fonction de latitude et de la déclinaison
- 6-calculer le rayonnement absorbé par les deux vitres ainsi que la plaque absorbante.
- 7- initialiser les coefficients de pertes thermiques puis les calculer.
- 8- résoudre le système matriciel et tracer le graphe des températures ($T_{v_1}, T_{v_2}, T_a, T_{ab}$)

Remarque :

- Tous les calculs de rayonnement solaire sont faits pour un ciel clair.
- Le code de calcul sera exploité pour simuler le fonctionnement du cuiseur sur trois sites du Nord de l'Algérie (Tizi-Ouzou, Tlemcen et El bayadh), choisis pour leurs climats différents, et dont les coordonnées géographiques sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Site	TIZI-OUZOU	TLEMCCEN	EL BAYADH
latitude	36°70 N	34°56 N	33°40 N
Longitude	4°3 E	1°19 E	1° E
Altitude	200m	816m	1341m
Albédo	0.2	0.2	0.2

Tableau III.2-Les coordonnées géographiques de trois sites

Les résultats obtenus seront discutés et interprétés dans le chapitre suivant.

Chapitre VI

*Exploitation du code de calcul et analyse
des résultats de simulation*

Le but principal assigné au programme présenté précédemment est d'estimer les valeurs au cours d'une journée, des différentes températures dans le cuiseur solaire (Températures des deux vitres, de l'air intérieur, et de la plaque absorbante). Ces calculs sont toutefois faits en se fixant une température ambiante T_{amb} constante tout au long de la journée choisie.

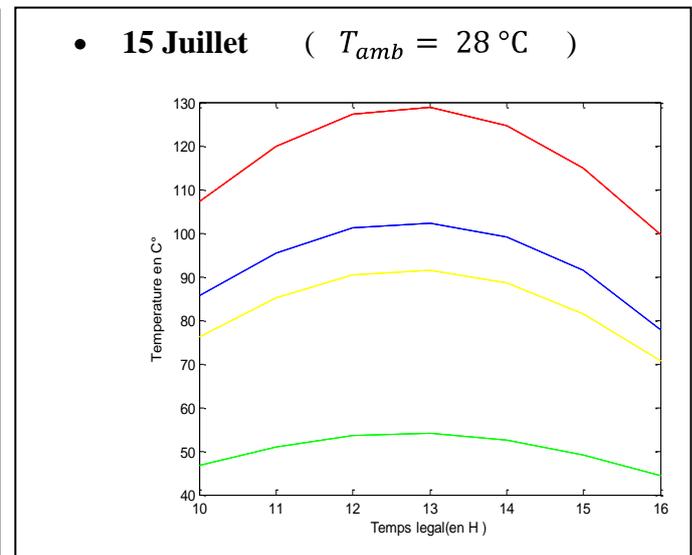
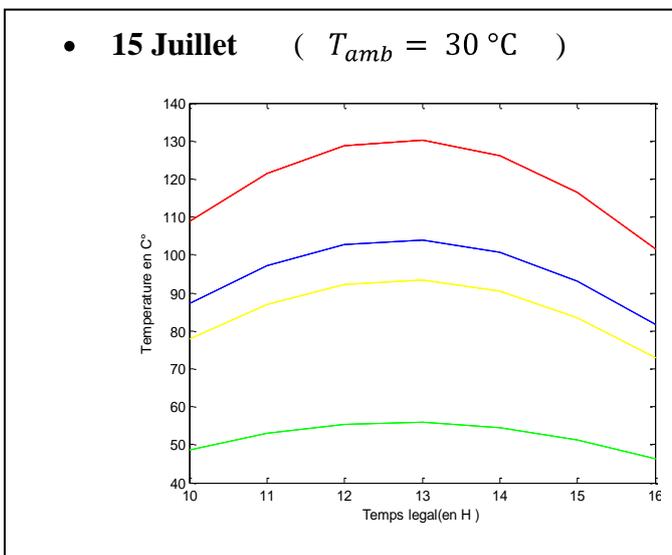
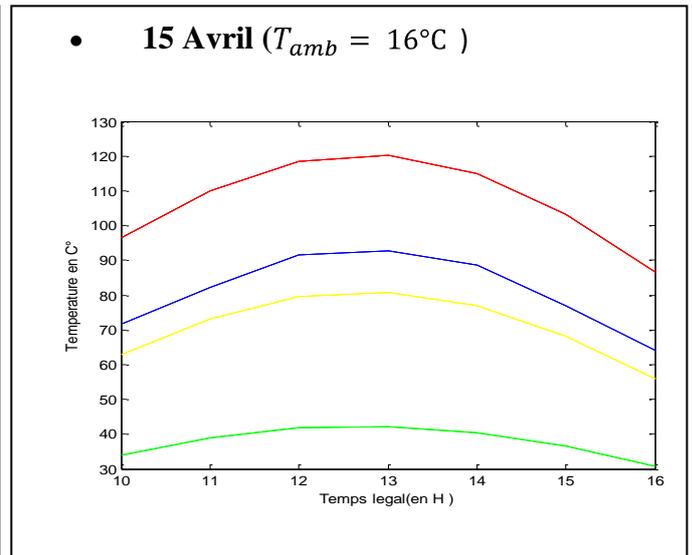
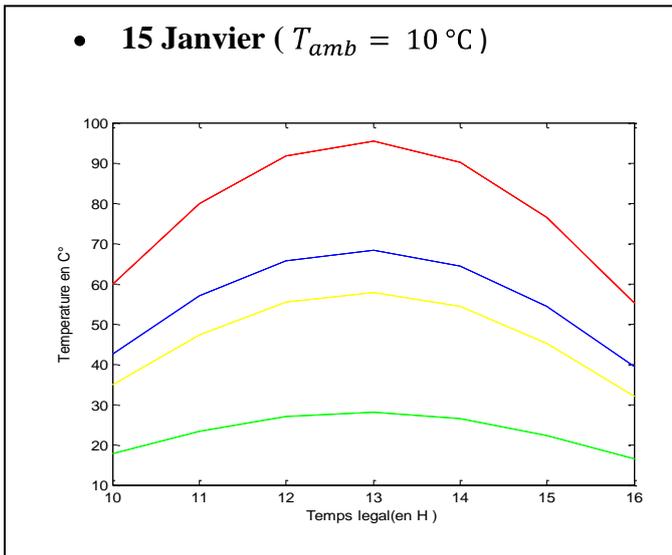
Le programme est exploité aussi pour étudier le fonctionnement du cuiseur et son comportement en différents sites du Nord de l'Algérie (Tizi-Ouzou, Tlemcen, El Bayadh).

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de notre travail, de même que leurs interprétations constituent ce dernier chapitre

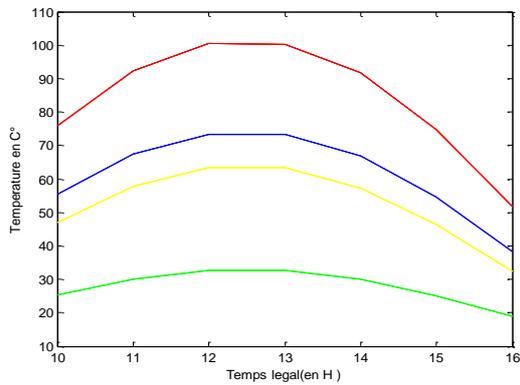
IV-1 Graphes des Températures pour le site de TIZI-OUZOU:

Dans les graphes, nous adopterons pour les températures les couleurs suivantes :

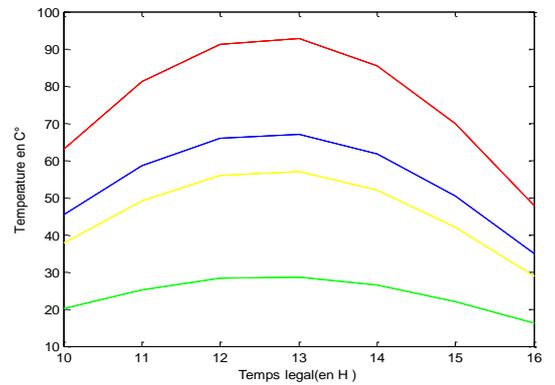
— T_{v_1}
 — T_{v_2}
 — T_a
 — T_{v_2}



- 15 Novembre ($T_{amb} = 14\text{ °C}$)

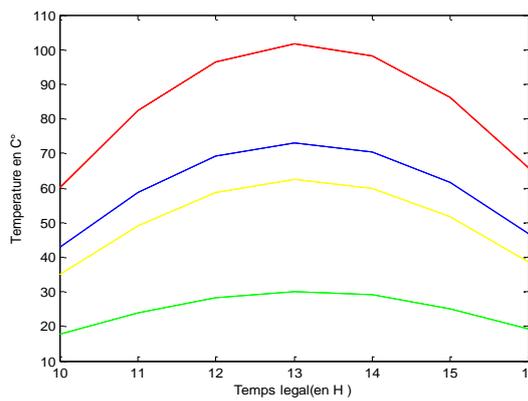


- 15 Decembre ($T_{amb} = 12\text{ °C}$)

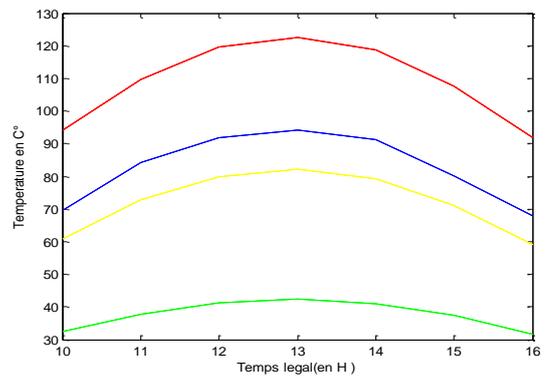


IV.2- Graphes des Températures pour le site de TIEMCEN :

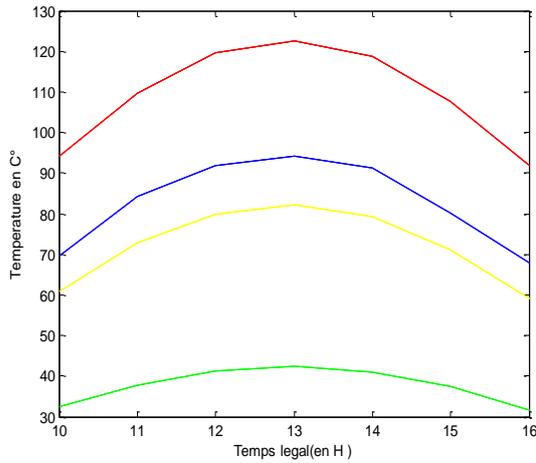
- 15 Janvier ($T_{amb} = 10\text{ °C}$)



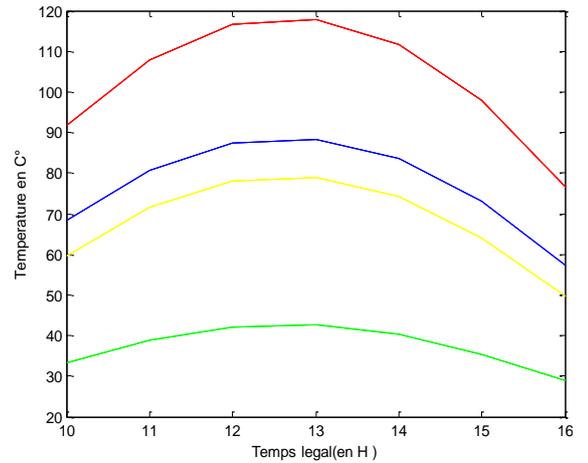
- 15 Avril ($T_{amb} = 15\text{ °C}$)



• **15 Juillet** ($T_{amb} = 24\text{ °C}$)

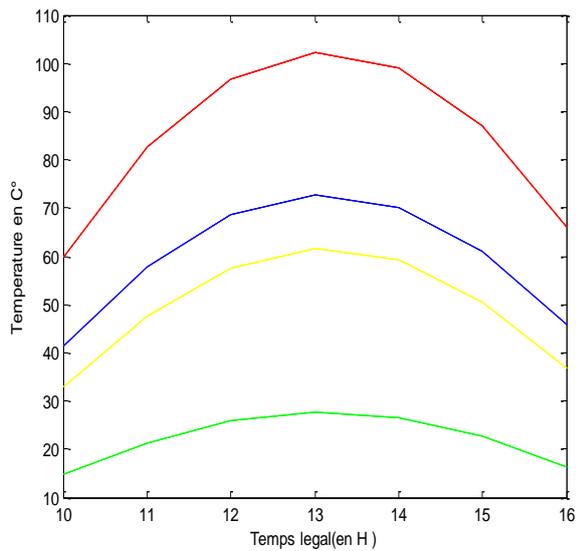


• **15 Octobre** ($T_{amb} = 18\text{ °C}$)

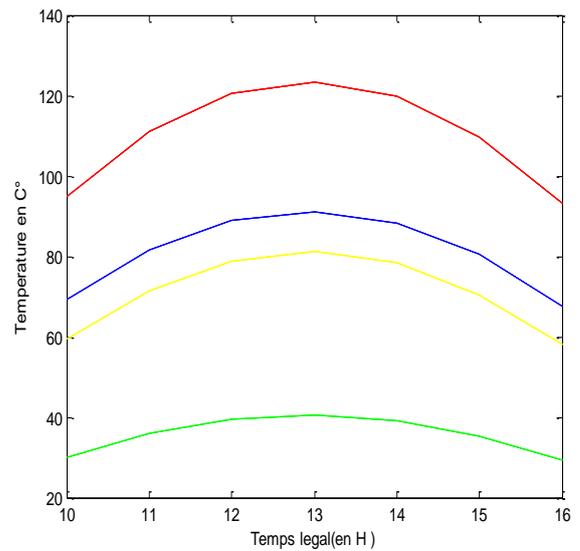


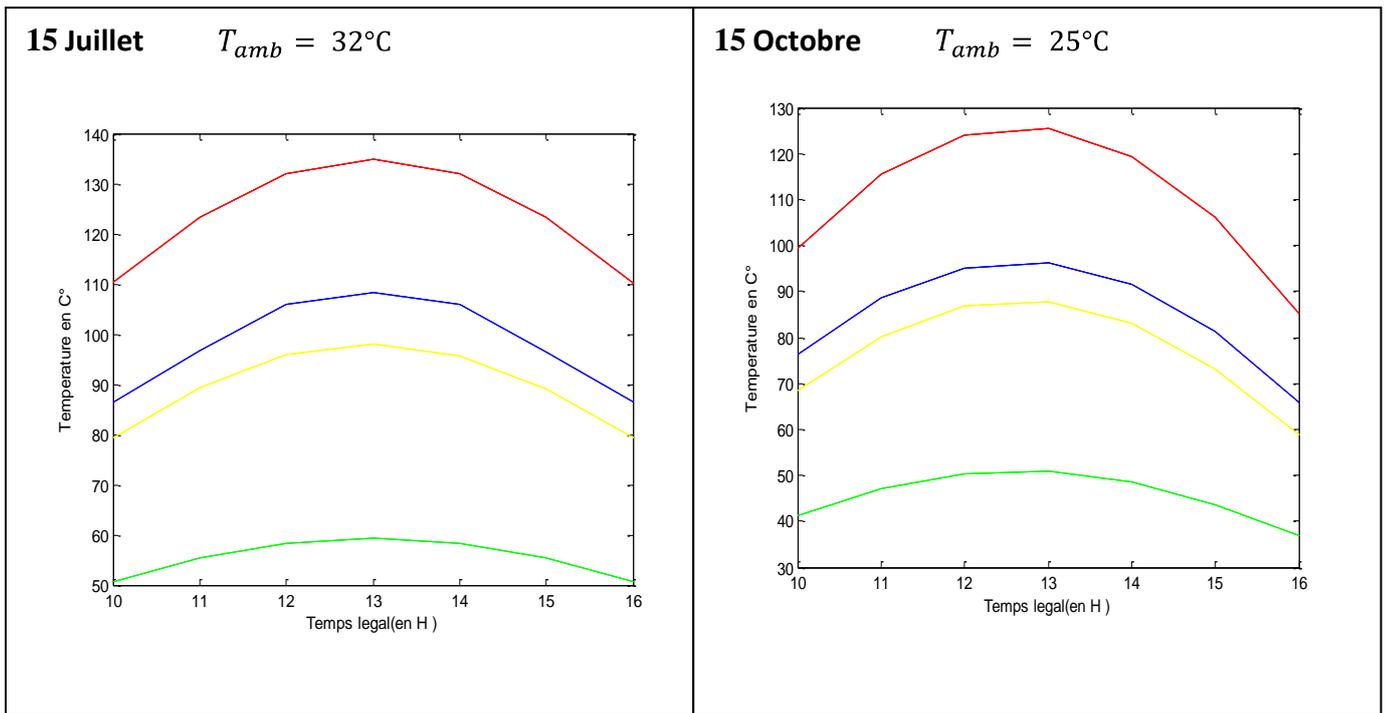
IV-3 .Graphes des Températures pour le site d'EL BAYADH :

15 Janvier $T_{amb} = 6\text{ °C}$



15 Avril $T_{amb} = 12\text{ °C}$





IV.4-Résultats et discussion

L'évolution à Tizi-Ouzou Tlemcen, et El Bayedh des températures des deux vitres, de l'air dans le cuiseur et de l'absorbeur pour des journées choisies à des périodes différentes de l'année sont successivement représentées sur les 14 figures. Ces villes du Nord de l'Algérie ont été choisies pour leurs climats quelque peu différents.

L'allure des courbes est la même pour toutes les journées et tous les sites ; elle suit l'évolution de l'énergie solaire globale : les températures de chacun des composants atteignent leurs valeurs maximales entre 12h et 13h correspondant au moment où le soleil est à sa hauteur maximale.

Comme on peut observer la température de la plaque absorbante est toujours la plus élevée, puis suit celle de l'air du cuiseur qui s'échauffe rapidement à son contact. La température la plus basse est celle de la vitre extérieure, laquelle est en contact avec l'air ambiant et subit l'effet du vent.

L'influence de la température ambiante sur les valeurs des températures est mise en évidence sur la 3^{ème} et la 4^{ème} figure qui montrent que la diminution de celle-ci conduit à une diminution de quelques degrés des températures de tous les composants surtout de la vitre extérieure.

On constate d'après ces résultats, que le modèle de cuiseur étudié peut fonctionner convenablement dans les trois sites pendant toute l'année même pendant la saison d'hiver lorsque la journée est bien claire. En effet, il n'est pas nécessaire d'obtenir de hautes températures pour pouvoir l'utiliser. Le four cuira très bien tant que la température monte aux environs de 90°C.

L'élément de base est la plaque absorbante qui s'échauffe lorsque le rayonnement solaire direct et le rayonnement réfléchi par le miroir y sont absorbés ; L'isolation avant (double vitrage) et arrière se charge d'assurer que la chaleur captée va être transmise à l'aliment à cuire.

.

Conclusion générale

L'énergie solaire propre est non polluante. Elle est disponible sur l'ensemble du globe terrestre, évidemment à différente intensité ; elle est durable et inépuisable (si l'on compte le temps en millions d'années), et n'a pas besoin d'une technologie de pointe pour son utilisation.

Cependant il y a un certain nombre de facteurs qui rendent son exploitation difficile, principalement l'intermittence du rayonnement solaire et sa variation journalière et même suivant l'année. En effet l'énergie solaire reste tributaire des conditions météorologiques ; de plus il y a un déphasage entre les besoins en énergie (chaleur) et les apports générés par l'énergie solaire. Au vu de cette indisponibilité, il faut toujours prévoir un appoint en énergie pour chaque utilisation, ainsi les systèmes solaires sont souvent assistés énergétiquement.

Pour rendre son exploitation plus ou moins facile, on recourt à des techniques et des dispositifs simples, efficaces et non coûteux.

Les différentes technologies de solaire thermique basse température peuvent être considérées comme technologiquement et industriellement matures et proches de la rentabilité.

Actuellement, la cuisson solaire est très répandue à travers le monde. Cependant en Algérie, elle reste méconnue du grand public et peu de chercheurs et d'ingénieurs algériens se penchent encore sur cette problématique.

Dans cette contribution, nous avons tenté d'apporter une analyse sur le comportement thermique d'un cuiseur solaire en boîte simple. Les approches et les procédures utilisées permettent de donner et de fournir des résultats et des fonctions qui déterminent les évaluations des différentes températures.

L'étude numérique montre que la température de la plaque absorbante atteint des valeurs intéressantes, 135°C, obtenues entre 12h et 13h, correspondant au moment où le soleil est à sa hauteur maximale, et pour la période de l'été sur le site d'El Bayadh. Plus au Nord sur le site de Tizi-Ouzou, elle est de 130°C et on atteint 125°C à Tlemcen. En saison hivernale, la température de la plaque et celle de l'air intérieure du cuiseur restent assez bonnes, plus de 90°C sur tous les sites, ce qui permet de mener à terme la cuisson de la plupart des mets. D'après ces résultats, le modèle de cuiseur étudié peut fonctionner convenablement dans les trois sites retenus et donc dans tout le territoire algérien et ce pendant toute l'année, surtout lorsque la journée est bien claire.

Le cuiseur solaire boîte est donc un moyen de cuisson pouvant parfaitement s'intégrer dans le Nord de l'Algérie. Ne pouvant constituer pour des raisons évidentes, une solution de substitution à la cuisinière conventionnelle fonctionnant au bois, au gaz ou à l'électricité, l'utilisation d'un cuiseur solaire, dans la vie quotidienne, fait découvrir cependant une autre façon de préparer la nourriture, moyennant une forme d'énergie qui respecte l'environnement et assure un développement durable. Il permet de faire de réelles économies, à la fois pécuniaires et en terme d'énergie consommée ; le milieu naturel est lui aussi gagnant, puisque les émissions de gaz à effet de serre sont réduites.

Références bibliographiques :

- [1] A. Faye, A. Thiam, V. Sambou, M. Faye, O. Diao, D. Azilinson, M. Adj, « *Evaluation de l'efficacité d'un cuiseur solaire type boîte à changement de phase par des analyses d'énergie et d'exergie* » CIFEM2010 – ART-3-111 ;
- [2] A. Gaur, O.P. Singh, S.K. Singh and G.N. Pandey, « *Performance Study of Solar Cooker with Modified Utensil* » Renewable Energy, Vol. 18, N°1, pp. 121 – 129, 1999.
- [3] A.V. Narasimha Rao, S. Subramanyam, « *Solar Cookers – Part II- Cooking Vessel with Central Annular Cavity* »
- [4] Domanski R, El Sebaï AA et Jaworski M « *Cooking during off-sunshine hours using PCMs as storage media* » Energy 1995;20(7):607–16.
- [5] Terres H, Ortega JA, Gordon M, Morales JR, Lizard A. « *Heating of bee honey, olive oil, milk and water in a solar box type with internal reflectors* » Energy sustainability conference, Long Beach, California, USA; 27–30 June 2007.
- [6] Ozturk HH, Oztekin S, Bascetincelik A. « *Evaluation of efficiency for solar cooker using energy and exergy analyses.* » Int J Energy 2003
- [7] Bello AMA, Makinde V, Sulu HT « *performance tests and thermal efficiency evaluation of a constructed solar box cooker at a Guinea Savannah Station (Ilorin, Nigeria)* » J Am Sci 2010; 6 (2).
- [8] A. Harmim*, M. Boukar et M. Amar « *Etude expérimentale d'un cuiseur solaire de type boîte à trois réflecteurs plans et une surface d'ouverture inclinée* » solar energy Vol. 10 N°1 (2007) 31 – 38
- [9] A. Harmim, M. Boukar, M. Amar, « *Experimental Study of a Double Exposure Solar Cooker with Finned Cooking Vessel* » Solar Energy, Vol. 82, N°4, pp. 287 – 289, 2008
- [10] A. Harmim, M. Belhamel, M. Boukar, M. Amar « *Experimental investigation of a box-type solar cooker with a finned absorber plate* » Energy 2010;35:3799–802.
- [11] A. Harmim, M. Merzouk, M. Boukar et M. Amar « *Design et test expérimental d'un concentrateur parabolique composé non-symétrique pour la cuisson solaire* » Energies Renouvelables Vol. 14 N°4 (2011) 591 – 600
- [12] M. Boubekri, A. Chaker, I. Zeghib « *Contribution numérique à l'étude du rayonnement solaire incident sur un capteur plan pour le site de Constantine* ». Laboratoire de Physique Energétique, Université Mentouri, Constantine (25000), ALGERIE.
- [13] Jacques Bernard, “Energie solaire ; calculs et optimisation“, Ellipses, 2004
- [14] A. Harmim, M. Boukar and M. Amar, ‘*Contribution à l'amélioration des performances d'un cuiseur solaire boîte*’, Solar Energy, Vol. 12 N°3 (2009) 419 – 432

[15] Bekkouche Sidi Mohammed El Amine « Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires » Doctorat en physique option : Electronique et Modélisation, l'université Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen

[16] A.A el Sebaili, Aboul Enein «A box type solar cooker with one step outer reflector » *energy Vol.22 No-5, pp 515-524, 1997.*

[17] O.V. Ekechukwu , N.T. Ugwuoke « Design and measured performance of a plane reflector augmented box-type solar-energy cooker » *Renew Energy 2003;28:1935–52.*

[18] Ziyadou Ahmed « Etude et conception d'un distillateur solaire à effet de serre » Doctorat en physique, université d'Antananarivo faculté des sciences.

[21] I.Haraksingh, I.A.MC Doom «A natural convection flat- plaque collector solar cooker with short term storage» *WREC 1996*

[22] D.Buddhi, LK.Sahoo «Solar cooker with latent heat storage: design and experimental testing» *Energy Convers Manage 1997;38(5):493–8.*

[23] NM .Nahar «Performance and testing of a hot box storage solar cooker» *Energy Conversion and Management 2003; 44:1323–31.*

[24] HMS Hussein, HH El-Ghetany, SA Nada «Experimental investigation of novel indirect solar cooker with indoor PCM thermal storage and cooking unit » *.Energy Conversion and Management 2008;49:2237–46*

[25] Benkhelifa Abdelaziz «Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur» Master en Génie des procédés

Sites d'internet consultés

[19] <http://www.cder.dz>

[20] www.solare-bruecke.org

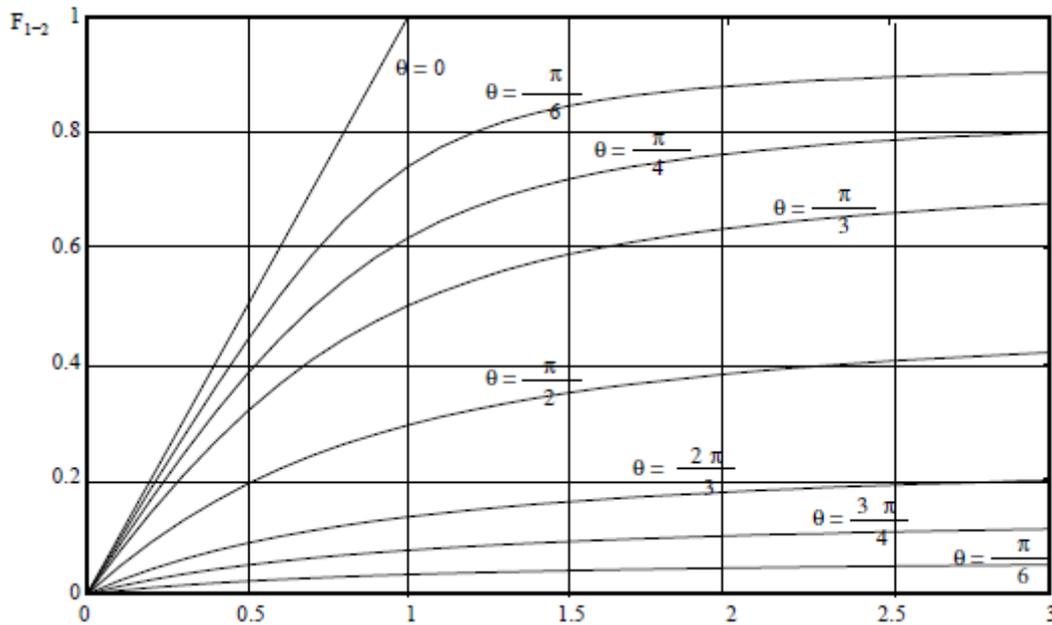
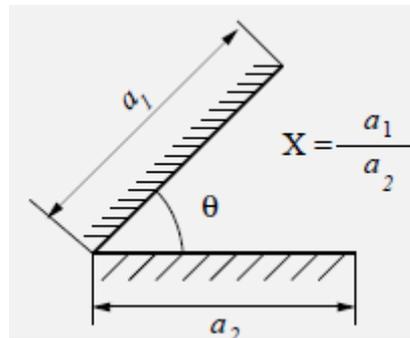
<http://solarcooking.org>

ANNEXE

1) Calcul de facteur de forme géométrique entre le réflecteur et la vitre supérieure

Le réflecteur et la vitre supérieure sont considérés comme deux plaques ayant une arête commune et faisant un angle θ .

$$F = \frac{1}{2a_1} a_1 + a_2 - \sqrt{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos \theta}$$



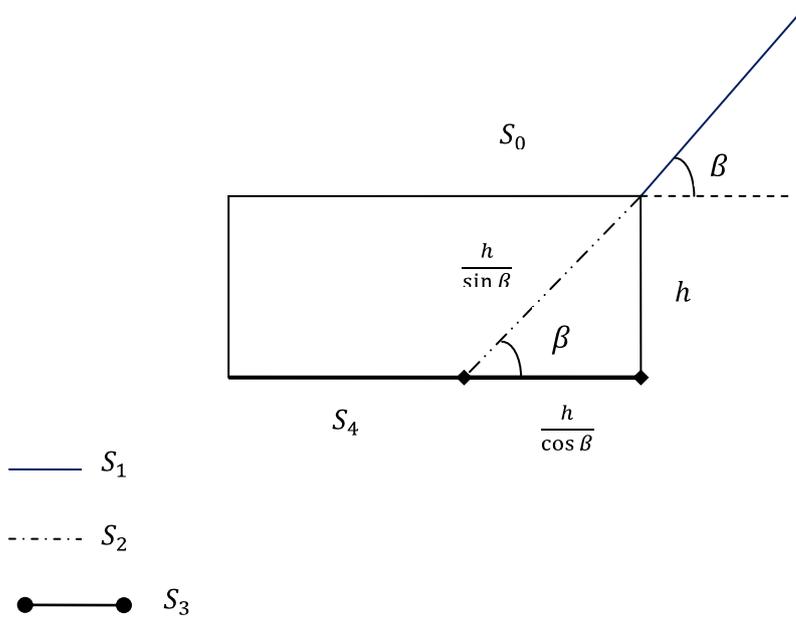
$$f_{mv} = \frac{1}{2 \times \text{largR}} \text{largR} + \text{largV} - \sqrt{\text{largR}^2 + \text{largV}^2 - 2 \times \text{largR} \times \text{largV} \cos(\pi - \beta)}$$

LargR : Largeur de réflecteur.

LargV : Largeur de la vitre

2) Calcul du facteur de forme géométrique entre le réflecteur et la plaque absorbante

Pour le calcul de facteur de forme géométrique entre le réflecteur et la plaque absorbante considérons la configuration suivante :



$$S_1' = S_1 + S_2$$

$$F_{1'0} S_1' = F_{1'0} S_0 = F_{20} S_2 \quad \Rightarrow F_{20} = F_{1'0} \frac{S_1'}{S_2}$$

$$F_{1'0} + F_{1'4} = 1$$

$$\Rightarrow F_{1'0} \frac{S_1'}{S_2} + F_{1'4} \frac{S_1'}{S_2} = \frac{S_1'}{S_2}$$

$$F_{20} + F_{24} = 1; \quad F_{1'0} \frac{S_1'}{S_2} + F_{24} = 1;$$

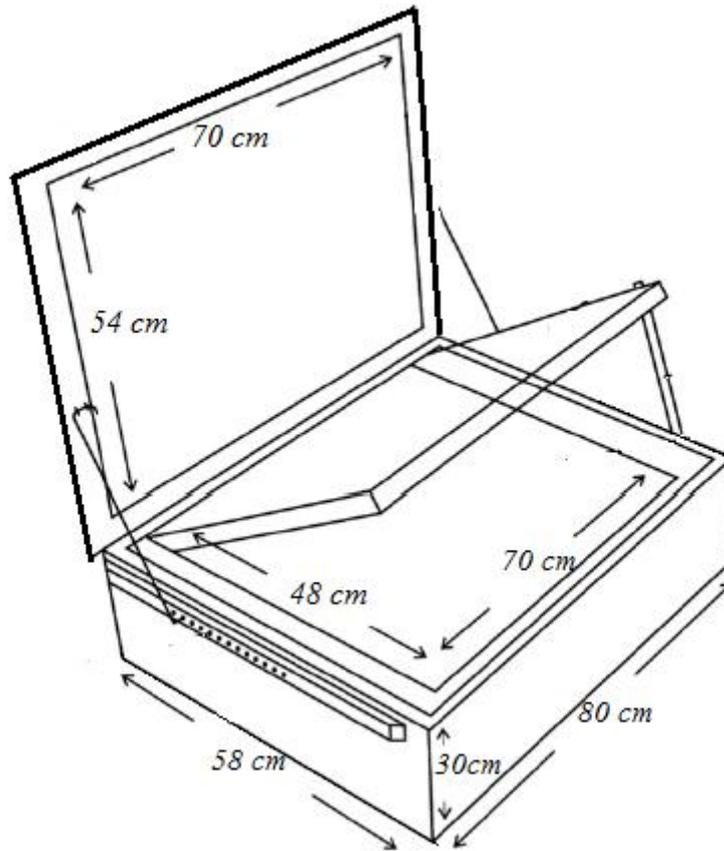
$$F_{24} = 1 - F_{1'0} \frac{S_1'}{S_2} = 1 - F_{1'0} \frac{S_1'}{S_2} = 1 - (1 - F_{1'4}) \frac{S_1'}{S_2} \Rightarrow F_{24} - F_{1'4} \frac{S_1'}{S_2} = 1 - \frac{S_1'}{S_2}$$

$$F_{24} - F_{1'4} + F_{24} \frac{S_1'}{S_2} = 1 - \frac{S_1'}{S_2} \Rightarrow F_{24} \left(1 - \frac{S_1'}{S_2}\right) - F_{1'4} \frac{S_1'}{S_2} = 1 - \frac{S_1'}{S_2}$$

$$F_{1'4} = 1 - \frac{S_1'}{S_2} (1 - F_{24})$$

Et F_{24} est calculé comme celui deux plaques ayant une arête commune et faisant un angle $\pi - \beta$

3) Dimensions du cuiseur solaire de type boîte :



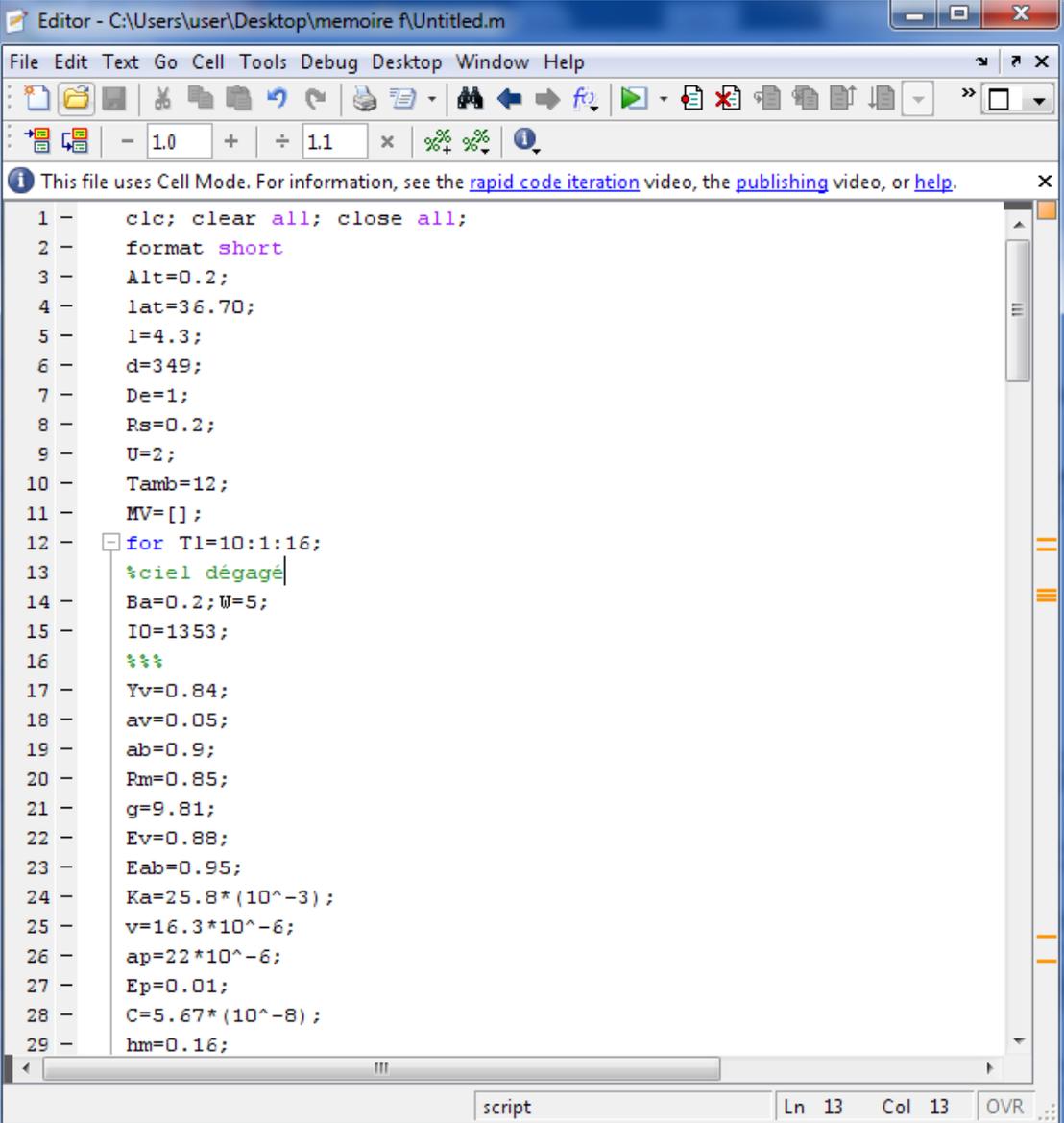
$$e_{v_2-v_1} = 1\text{cm} \quad e_{v_2-ab} = 16\text{cm} \quad e_{isol} = 6\text{cm} \quad e_{isol\ ab} = 13\text{cm}$$

4) Les caractéristiques de cuiseur à étudier

$$\varepsilon_{v_1} = \varepsilon_{v_2} = 0.88 \quad \alpha_{v_1} = \alpha_{v_2} = 0.05 \quad \tau_{v_1} = \tau_{v_2} = 0.84 \quad \rho_m = 0.85$$

$$\varepsilon_{ab} = 0.95 \quad \alpha_{ab} = 0.9$$

5) Programmes Matlab :



The image shows a MATLAB editor window titled "Editor - C:\Users\user\Desktop\memoire f\Untitled.m". The window contains a script with the following code:

```
1 -   clc; clear all; close all;
2 -   format short
3 -   Alt=0.2;
4 -   lat=36.70;
5 -   l=4.3;
6 -   d=349;
7 -   De=1;
8 -   Rs=0.2;
9 -   U=2;
10 -  Tamb=12;
11 -  MV=[];
12 -  for Tl=10:1:16;
13 -      %ciel dégagé
14 -      Ba=0.2; W=5;
15 -      IO=1353;
16 -      %%%
17 -      Yv=0.84;
18 -      av=0.05;
19 -      ab=0.9;
20 -      Rm=0.85;
21 -      g=9.81;
22 -      Ev=0.88;
23 -      Eab=0.95;
24 -      Ka=25.8*(10^-3);
25 -      v=16.3*10^-6;
26 -      ap=22*10^-6;
27 -      Ep=0.01;
28 -      C=5.67*(10^-8);
29 -      hm=0.16;
```

The status bar at the bottom of the window shows "script", "Ln 13", "Col 13", and "OVR".

6)

Editor - C:\Users\user\Desktop\memoire f\Untitled.m*

File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help

1.0 1.1

This file uses Cell Mode. For information, see the [rapid code iteration](#) video, the [publishing](#) video, or [help](#).

```
29 - hm=0.16;
30 - e=0.06;
31 - e1=0.13;
32 - s1=0.3776;
33 - lam=0.04;
34 - sr=0.378; largr=0.54;
35 - s=0.3364; largv=0.48;
36 - sab=0.3364; largab=0.48;
37 - % calcul de la declinaison
38 - D=23.45*sind(360*(284+d)/365);
39 - %calcul de coef u de la Et
40 - u=(d-81)*(360/365);
41 - %equation du temps
42 - Et=9.87*sind(2*u)-7.35*cosd(u)-1.5*cosd(u);
43 - %calcul de temps solaire vrai
44 - TSV=(Tl-De)+((4*1)+Et)/60;
45 - %calcul de l'angle horaire
46 - w=15*(TSV-12);
47 - %calcul du hauteur du soleil
48 - H=asind((sind(D)*sind(lat))+(cosd(w)*cosd(D)*cosd(lat)));
49 - %calcul de du rayonnement direct
50 - I=I0*(1-(sind(D)/11.7));
51 - TL=2.5+16*Ba+0.5*log(W);
52 - k=(TL+36)/33;
53 - mh=(1-0.1*Alt)/(sind(H)+0.15*((H+3.885)^-1.253));
54 - Id=I*exp(-(mh*TL)/(0.9*mh+9.4));
55 - %calcul de du rayonnement diff horizontal;
56 - Dh=(I/25)*sqrt(sind(H))*(TL-0.5-sqrt(sind(H)));
57 - %calcul de du rayonnement global horizontal;
58 - Gh=(1270-(56*TL))*(sqrt(sind(H))^k);
```

script Ln 37 Col 1 OVR


```
Editor - C:\Users\user\Desktop\memoire f\Untitled.m*
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
- 1.0 + ÷ 1.1 x % % 1
This file uses Cell Mode. For information, see the rapid code iteration video, the publishing video, or help.
05 Tabi=V(1);
90 Tv=[Tv1i Tv2i Tai Tabi]';
91 %calcul de coef de rayt entre V1 et le ciel
92 Tc1=0.0552*(Tamb+273)^1.5;
93 Tc=Tc1-273;
94 Hr1=Ev*C*((Tv1i+273)^2+(Tc1^2))*(Tv1i+273+Tc1);
95 %calcul de coef de conv entre V1 et l'ambiance
96 Hc1=5.7+(3.8*U);
97 %calcul de coef de convt entre V1 et V2
98 b=(Tv1i+Tv2i)/2;
99 Ra1=(g*(Tv2i-Tv1i)*(1/(b))*(Ep^3))/(ap*v);
100 Nu=1+(1.44*(1-(1708/Ra1))+((Ra1/5830)^0.333)-1);
101 Hc2=Nu*Ka/Ep;
102 %calcul de coef de rayt entre V1 et V2
103 Hr2=(C*((Tv1i+273)^2+((Tv2i+273)^2))*(Tv1i+273+Tv2i+273))/((2/Ev)-
104 %calcul de coef de rayt entre V2 et absorbeur
105 Hr3=C*((Tv2i+273)^2+(Tabi+273)^2)*((Tv2i+273)+(Tabi+273));
106 %calcul de coef de convt entre V2 et l'air interieur
107 B=(Tv2i+Tai)/2;
108 Ra2=(g*(Tai-Tv2i)*(1/(B))*(hm^3))/(ap*v);
109 NU=1+(1.44*(1-(1708/Ra2))+((Ra2/5830)^0.333)-1);
110 Hc3=NU*Ka/hm;
111 %calcul de coef de convt entre absorbeur et l'air interieur
112 z=(Tai+Tabi)/2;
113 Ra3=(g*(Tabi-Tai)*(1/(z))*(hm^3))/(ap*v);
114 nu=1+(1.44*(1-1708/Ra3))+((Ra3/5830)^0.333)-1);
115 Hc4=nu*Ka/hm;
116 %lllllll
117 a11=(Hr1+Hc1+Hc2+Hr2);
118 a12=-(Hc2+Hr2);
119 a13=0;
```

script Ln 37 Col 1 OVR

```
Editor - C:\Users\user\Desktop\memoire f\Untitled.m*
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
- 1.0 + ÷ 1.1 x % % 1
This file uses Cell Mode. For information, see the rapid code iteration video, the publishing video, or help.
119 - a13=0;
120 - a14=0;
121 - a21=-(Hc2+Hr2);
122 - a22=Hc2+Hr2+Hr3+Hc3;
123 - a23=-Hc3;
124 - a24=-Hr3;
125 - a31=0;
126 - a32=Hc3;
127 - a33=-Hc3-((sab/s)*Hc4)-((s1/s)*(lam/e));
128 - a34=(sab/s)*Hc4;
129 - a41=0;
130 - a42=-Hr3;
131 - a43=-Hc4;
132 - a44=(Hc4+Hr3+(lam/e1));
133 - b1=(Gve+(Hr1*Tc)+(Hc1*Tamb));
134 - b2=Gvi;
135 - b3=(-(s1/s)*(lam/e)*Tamb);
136 - b4=(Gab+(((lam/e1)*Tamb));
137 - A=[a11,a12,a13,a14;a21,a22,a23,a24;a31,a32,a33,a34;a41,a42,a43,a44];
138 - B=[b1;b2;b3;b4];
139 - V=A\B
140 - i=i+1;
141 - end
142 - i=i+1;
143 - format short;
144 - MV=[MV V];
145 - end
146 - TLL=10:1:16;
147 - for i=1:4;
148 -     plot(TLL,MV(1,:), 'g')
149 -     plot(TLL,MV(2,:), 'r')
```

script Ln 37 Col 1 OVR

Editor - C:\Users\user\Desktop\memoire f\Untitled.m*

File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help

1.0 1.1

This file uses Cell Mode. For information, see the [rapid code iteration](#) video, the [publishing](#) video, or [help](#).

```
125 - a31=0;
126 - a32=Hc3;
127 - a33=-Hc3-((sab/s)*Hc4)-((s1/s)*(lam/e));
128 - a34=(sab/s)*Hc4;
129 - a41=0;
130 - a42=-Hr3;
131 - a43=-Hc4;
132 - a44=(Hc4+Hr3+(lam/e1));
133 - b1=(Gve+(Hr1*Tc)+(Hc1*Tamb));
134 - b2=Gvi;
135 - b3=(-(s1/s)*(lam/e)*Tamb);
136 - b4=(Gab+((lam/e1)*Tamb));
137 - A=[a11,a12,a13,a14;a21,a22,a23,a24;a31,a32,a33,a34;a41,a42,a43,a44];
138 - B=[b1;b2;b3;b4];
139 - V=A\B
140 - i=i+1;
141 - end
142 - i=i+1;
143 - format short;
144 - MV=[MV V];
145 - end
146 - TLL=10:1:16;
147 - for i=1:4;
148 -     plot(TLL,MV(1,:), 'g')
149 -     plot(TLL,MV(2,:), 'y')
150 -     plot(TLL,MV(3,:), 'b')
151 -     plot(TLL,MV(4,:), 'r')
152 -     hold on
153 -     xlabel('Temps legal(en H)');
154 -     ylabel('Temperature en C°');
155 - end
```

script Ln 37 Col 1 OVR


```
Editor - C:\Users\user\Desktop\memoire \Temp_hCST.m*
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
- 1.0 + ÷ 1.1 x % % ?
61 - Hc1=5.7+(3.8*U);
62 - Hr1=5.9;
63 - Hc2=5.4;
64 - Hr2=7.3;
65 - Hc3=12.4;
66 - Hr3=9.2;
67 - Hc4=13.8;
68 - %111111
69 - a11=(Hr1+Hc1+Hc2+Hr2);
70 - a12=-(Hc2+Hr2);
71 - a13=0;
72 - a14=0;
73 - a21=-(Hc2+Hr2);
74 - a22=Hc2+Hr2+Hr3+Hc3;
75 - a23=-Hc3;
76 - a24=-Hr3;
77 - a31=0;
78 - a32=Hc3;
79 - a33=-Hc3-((sab/s)*Hc4)-((s1/s)*(lam/e));
80 - a34=(sab/s)*Hc4;
81 - a41=0;
82 - a42=-Hr3;
83 - a43=-Hc4;
84 - a44=(Hc4+Hr3+(lam/e1));
85 - b1=(Gve+(Hr1*Tc)+(Hc1*Tamb));
86 - b2=Gvi;
87 - b3=(-(s1/s)*(lam/e)*Tamb);
88 - b4=(Gab+((lam/e1)*Tamb));
89 - A=[a11,a12,a13,a14;a21,a22,a23,a24;a31,a32,a33,a34;a41,a42,a43,a44];
90 - B=[b1;b2;b3;b4];
91 - VT=A\B;
```