

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA



FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° : ph /ENR/03/2020

DOMAINE : Sciences de la matière

FILIERE : Physique

OPTION : Physique Energétique

et Energies Renouvelables

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Réaliser Par:

● **Foudili serine**

● **Gaid saida**

**Etude numérique d'un capteur solaire
thermique plan à air en régime transitoire**

JURY :

MR. A.NAHOU
MR. Z.TORKI
MR. Z.HADDAD

Université de M'sila
Université de M'sila .
Université de M'sila

Encadreur
Président
Examineur

Année universitaire : 2019/2020

Remerciement

Nous remercions avant tout le Dieu de nous garder en bonne santé afin de nous mener à bien ce projet de fin d'étude.

Au terme de notre travail, nous tenons à remercier très sincèrement Dr:NAHOUI Azzedine et Dr:TORKI Zohir et Dr :HADDAD Zakaria

Pour avoir guidés la réalisation de cette étude et sa disponibilité à nous écouter à tout moment.

Nous remercions également les membres des jurys pour l'effort qu'ils feront dans le but d'examiner ce modeste travail

Et finalement nous remercions nos professeurs de physique énergétique.

إهداء

أهدي عملي المتواضع إلى جناحي :

إلى روح أبي وكلماته التي رافقتني في خطواتي

والى قلب أمي وصبرها وقدرتها على شحني بالطاقة الايجابية في أوقات

ضعفي

إلى أختي ميساء الراحة بعد أمي

إلى إخوتي صالح, فاتح, نسان الأمان بعد أبي

إلى رفيقاتي وكل صديقاتي في مشواري الدراسي, ولكل من أمدني

بكلمة طيبة وابتسامة صادقة



Dédicace

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé pendant ce temps de covid-19.

À l'âme de

Mes parents et ma grande mère, à qui je leur souhaite le paradis

À mes chères sœurs

A mes chers frères

A toute ma famille et ma grande famille Gaid, pour tous leurs efforts et sacrifices.

Et à

Mon encadreur M. NAHOUI Azzedine

A tous mes amis sans exception.

A tous mes enseignants chacun avec son nom

Enfin je le dédie ce travail à:

A ma promotion de physique énergétique

À toute personne qui m'a aimé ou m'a respecté.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale	1
CHAPITRE I : ENERGIE SOLAIRE	
I.1. Le soleil	3
I.2. Historique	3
I.3. Définition de l'énergie solaire	4
I.4. Les différents types d'utilisation d'énergie solaire	4
I.4.1. L'énergie solaires photovoltaïques	4
I.4.2. Les centrales solaires thermodynamiques	5
I.4.3. L'énergie solaire thermique :	5
I.5. Les avantages et L'inconvénients de l'énergie solaire	5
a) Les avantages	5
b) Les inconvénients	5
I.6. Potentiel Solaire en Algérie	5
I.7. Les besoins d'énergie des personnes	7
I.8. Energie solaire en l'Algérie	8
I.9. L'effet de serre	9
I.9.1. Principaux gaz à effet de serre	9
I.10. Les paramètre de position	9
a. Les coordonnées géographiques	9
b. Les coordonnées équatoriales	10
c. Les coordonnées horizontales	11
I.11. Capteurs solaire thermiques	12
I.11.1. Définition	12
I.11.2. Types de capteurs solaires	12
I.11.2.1. Capteurs plans non vitrés	12
I.11.2.2. Capteurs plans	12
I.11.2.3. Capteurs à tubes sous vide	13
I.11.3. Principaux composants d'un capteur plan	14
• La couverture transparente	14
• L'absorbeur	14
• Isolation	14
I.11.4. Principe de fonctionnement du capteur solaire thermique plan	15
I.11.5. L'orientation et l'inclinaison du capteur	16
I.11.6. Les application du capteur solaire thermique	16

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

II.1. Bilan thermique du capteur solaire plan	17
• La puissance absorbée par la vitre	17
• Puissance absorbée par l'absorbeur	18
II.1.1. Bilans thermiques	18
II.1.1.1. Echange thermique avec la vitre	18
La vitre reçoit	18
La vitre cède	18
II.1.1.2. Echange thermique avec l'absorbeur	18
L'absorbeur reçoit	18
L'absorbeur cède	18
II.1.1.3. Echange thermique avec le fluide caloporteur	19
Le fluide reçoit	19
II.2. Hypothèses simplificatrices	19
II.3. Bilan thermique du capteur en régime transitoire	19
II.3.1. Bilan thermique de la vitre	20
La vitre reçoit	20
La vitre cède	20
La vitre accumule	20
II.3.2. Bilan thermique de l'absorbeur	20
L'absorbeur reçoit	20
L'absorbeur cède	20
La vitre accumule	20
II.3.3. Bilan thermique du fluide caloporteur	21
Le fluide caloporteur reçoit	21
Le fluide caloporteur cède	21
Le fluide caloporteur accumule	21
II.4. Définition des coefficients d'échange thermique	21
II.4.1. Echange thermique par conduction	21
II.4.2. Echange thermique par rayonnement	21
II.4.3. Echange thermique par convection	21
II.5. Définitions des coefficients d'échange thermiques	21
II.5.1. Echange par rayonnement	21
II.5.1.1. Echange vitre-ciel	21
II.5.1.2. Echange isolant-ciel	22
II.5.1.3. Echange isolant-ciel	22
II.5.2. Echange par convection	22
II.5.2.1. Echange vitre-air ambiant	22
II.5.2.2. Echange absorbeur-vitre	23
• Calcul du nombre de Nusselt	23

CHAPITRE III :ETUDE NUMERIQUE

III.1. Discrétisation des équations	24
III.1.1. Discrétisation de l'équation de la vitre	24
III.1.2. Discrétisation de l'équation de l'absorbeur	24
III.1.3. Discrétisation de l'équation du fluide caloporteur	25
III.2. Réarrangement des équations discrétisées	25
III.2. 1. Equation de la vitre	25
III.2. 2. Equation de l'absorbeur	25
III.2. 3. Equation du fluide caloporteur	25
III.3. Méthode de résolution	27
III.4. Méthode résolution	27
III.4.1. Méthode de Gauss-Seidel	27
III.4.1.1. Principe de la méthode de Gauss-Seidel	27
III.4.2. Conditions de convergence	29
III.5. Principe de simulation en régime transitoire	29
III.5.1. La première étape	29
III.5.2. La deuxième étape	29
III.5.3. La troisième étape	29
III.5.3.1. Les propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur à savoir :	29
III.5.3.2. Les coefficients d'échange thermique, à savoir :	29
III.5.4. La quatrième étape	30

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Irradiation solaire	31
IV.2. Température ambiante	31
IV.3. Vitesse du vent	32
IV.4. Température de l'absorbeur	33
IV.5. Température du fluide caloporteur	34
IV.6. Température de La vitre	34
Conclusion générale	36
Références	37

INTRODUCTION GENERALE

Liste des figures

Figure I .1 : La structure du soleil	3
Figure I.2: Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011).....	6
Figure I. 3 : Energie renouvelable en l'Algérie	8
Figure I.4: Les coordonnées géographiques.....	10
Figure I.5 : Les coordonnées équatoriales.....	11
Figure I.6 : Les coordonnées horizontale.....	11
Figure I.7 : Capteurs plans non vitrés.....	12
Figure I.8 :Capteurs plans vitrés.....	13
Figure I.9 : Capteurs à tubes sous vide.....	13
Figure I.10 : Les composants d'un capteur plan.....	14
Figure I.11 : Principe de fonctionnement du capteur solaire thermique plan....	15
Figure IV . 01 : Irradiation solaire 21/04/2018.....	31
Figure IV.02 : Température ambiante 21/04/2018.....	32
Figure IV. 03 : Vitesse du vent 21/04/2018.....	32
Figure IV. 04 : Température absorbeur 21/04/2018.....	33
Figure IV.05 : Température du fluide caloporteur 21/04/2018.....	34
Figure IV.06 : Température de la vitre 21/04/2018.....	34

Symbole	Désignation	Unité
C_p	Chaleur spécifique de l'eau	$J/kg^{\circ}C$
G	Rayonnement global incident	W/m^2
a	Azimut du soleil	Degré
H	Hauteur angulaire du soleil	Degré
I_0	La constante solaire	W/m^2
c_{pi}	Chaleur spécifique d'un corps d'indice i	$J/kg.K$
E_i	Epaisseur d'un corps d'indice i	m
$h_{c,i-j}$	Coefficient d'échange thermique par convection entre deux systèmes d'indice i et j	$W/m^2.K$
$h_{r,i-j}$	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre deux systèmes d'indice i et j	$W/m^2.K$
$Q_{cv,i-j}$	Flux de chaleur échangé par convection entre deux systèmes d'indice i et j	W
$Q_{r,i-j}$	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre deux systèmes d'indice i et j	W
$Q_{cd,i-j}$	Flux de chaleur échangé par conduction entre deux systèmes d'indice i et j	W
G	Rayonnement solaire global	W/m^2
m_i	Masse d'un corps d'indice i	kg
P_i	Puissance solaire absorbée par un corps d'indice i	W
T_i	Température d'un corps d'indice i	$^{\circ}K$
A	Surface	m^2
W	L'anglehoraire	Degré
T.S.M	Le Temps Solaire Moyen	Heure
N	Nombre de jour	-
φ	Longitude	Degré
θ	Latitude	Degré
δ	La déclinaison du soleil	Degré

Indices

Indices	Désignation
A	Air
Ab	Absorbeur
Am	Ambient
F	Fluide caloporteur
Fe	Fluide à l'entrée du capteur
Fs	Fluide à la sortie du capteur
Vint	Vitre intérieur
Vext	Vitre extérieur

Lettres Grecques

Lettres Grecques	Désignation	Unité
α	Facteur d'absorption	-
β	Inclinaison du capteur	$^{\circ}$
ε	Emissivité d'un corps	-
η	Rendement instantané	-
λ	Conductivité thermique	$\text{W/m}^2.\text{K}$
μ	Viscosité dynamique	Kg/m.s
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
τ	Facteur de transmission	-
σ	Constante de Stefan Boltzmann	$\text{W/m}^2.\text{K}^{-4}$

Introduction Générale

Dans les pays en développement, la consommation de combustibles fossiles et d'électricité augmente chaque jour et génère davantage de pollution environnementale. Compte tenu de ce qui précède, il est nécessaire de développer une énergie alternative à faible coût. L'énergie solaire est l'un des meilleurs moyens de produire de l'énergie. Le collecteur d'air à plaque plate solaire (SFPTAC) est largement utilisé pour de nombreuses applications solaires. Le séchage des produits alimentaires agricoles est une application attrayante et rentable de l'énergie solaire, qui devient un substitut potentiellement viable pour le bois de chauffage dans les pays en développement du monde. Un SFPTAC a une surface de $2 \times 1 \text{ m}^2$ et une feuille d'aluminium de 5 mm d'épaisseur est recouverte d'une peinture noire. Un collecteur isolé d'environ 10 cm d'épaisseur et à l'intérieur est recouvert de laine de verre d'une épaisseur de 25 mm utilisé sur la surface de l'enceinte. Ces tests ont été conduits pour recueillir des données de différentes conditions atmosphériques. Les résultats obtenus ont été examinés à la fois par convection libre et forcée [1].

En raison de l'insuffisance de l'échange thermique réalisée dans le capteur solaire plan à air entre le fluide et l'absorbeur l'utilisateur est amené à apporter des améliorations pour de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique. Dans cette étude expérimentale, par la simulation de l'énergie solaire, ils ont cherché à améliorer le couple Rendement-Ecart de température du capteur en introduisant des chicanes (obstacles) lesquelles sont déposées dans la veine dynamique du capteur. Les transferts thermiques, la température de sortie et le rendement du capteur sont nettement améliorés. Une application des meilleurs systèmes est présentée pour sécher l'oignon jaune et le hareng dans des temps intéressants [2].

F. MOKHTARI et D. SEMMAR Sont présenté les résultats des essais effectués sur le capteur solaire à air. En premier lieu, ont donné la méthode de réalisation du prototype expérimental en se référant aux modèles standards des

capteurs à air, ensuite une campagne de mesures a été menée afin de juger les performances thermiques de ce système. Les paramètres mesurés ont leur permis d'appuyer l'analyse théorique, valoriser leur capteur solaire à air, et pour une éventuelle utilisation de leur capteur dans le séchage des produits agro-alimentaires [3].

K. AOUES et al ont présenté dans cet article, une série de tests expérimentaux menés sur un capteur solaire plan, d'une surface de captation de 1.74 m², conçu au laboratoire et expérimenté dans la région de Biskra. L'installation expérimentale complète comprend la mesure du rayonnement solaire global, la vitesse du vent, le débit d'air et les températures ambiante et de l'air à l'entrée et à la sortie. Afin d'optimiser les performances thermiques, le capteur a été garni dans sa veine d'air dynamique de rugosités artificielles de différentes formes (model-1 et model-2) et différents arrangements (A et B). Le capteur solaire a été orienté face au sud, incliné d'un angle égal à la latitude de Biskra et soumis aux conditions environnementales. Ainsi, cette étude comparative a abouti au choix d'une configuration, parmi les quatre étudiées, permettant d'obtenir le meilleur rendement du capteur [4].

S. OUDJEDI a montré qu'en régime quasi-stationnaire les équations de bilan thermique des composants du capteur cascaded en une équation différentielle ordinaire de premier ordre, qui à elle seule régit le comportement thermique du capteur. La solution de cette équation différentielle est écrite sous la forme d'une expression explicite de la température locale du fluide caloporteur en fonction du flux solaire variable dans le temps. L'influence de divers paramètres tels que la température d'entrée du fluide, sa vitesse et la hauteur du canal d'écoulement d'air sur les performances thermiques du capteur solaire à air est aussi étudiée [5].

Le capteur à air étudié dans cette mémoire de fin d'étude est un isolateur à simple passe entre l'absorbeur et la vitre. Une analyse des échanges thermiques instationnaires dans un tel capteur est présentée.

Le présent travail porte sur l'étude et la conception d'un capteur solaire à air destiné à la production d'air chaud. Pour effectuer ce travail, D. SEMMAR et al ont adopté une approche théorique [6] ; qui consiste à simuler le comportement en question par un programme informatique de simulation basé sur un modèle mathématique approprié où tous les paramètres caractérisant la performance du système sont évalués instantanément durant la période d'ensoleillement. Les résultats obtenus par l'étude expérimentale ont été comparés avec les résultats obtenus par simulation numérique. Enfin une interprétation des résultats obtenus est faite pour valider le modèle utilisé.

Pour ce faire, nous avons réparti le travail en quatre chapitres :

Le première chapitre, l'étude bibliographique pour faire une aperçu autour l'énergie solaire et les capteurs solaire et ses applications.

Afin de modélisé le phénomène physique, le transfert thermique au niveau du capteur solaire à air, le deuxième chapitre pour but d'établir les bilans thermiques du capteur solaire en régimes permanent et transitoire. Ainsi la définition de différents coefficients d'échange thermique.

Le troisième chapitre consacré à résoudre par la méthode de différences finies Le système d'équations qui réagit les bilans thermiques des différents composants du capteur en découpant le capteur en temps et en espace. La conversion de l'énergie solaire en chaleur au profit d'un fluide caloporteur.

Le quatrième chapitre présente les résultats de simulations obtenu à l'aide code de calcul FORTRAN.

Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des résultats obtenus.

ENERGIE SOLAIRE

Energie solaire

I.1. Le soleil

Le soleil, source de l'énergie (Sol en latin, Helios ou Ἥλιος en grec) est un astre de diamètre km et de masse, avec une luminosité de.

Il est composé de plasma, d'hydrogène (70%) et d'hélium (28%). Chaque seconde, 700 millions de tonnes d'hydrogène sont convertis en hélium par une réaction thermonucléaire. La température de la surface du soleil est estimée à 6000 K et atteint à l'intérieur quelques millions de degrés. La température effective du corps noir du soleil est de 5762 K.

La terre reçoit une fraction de l'énergie émise par le soleil de l'ordre de. L'énergie de 84 minutes d'ensoleillement sur la surface de la terre pourrait permettre la couverture des besoins énergétiques du monde sur la période d'une année [7].

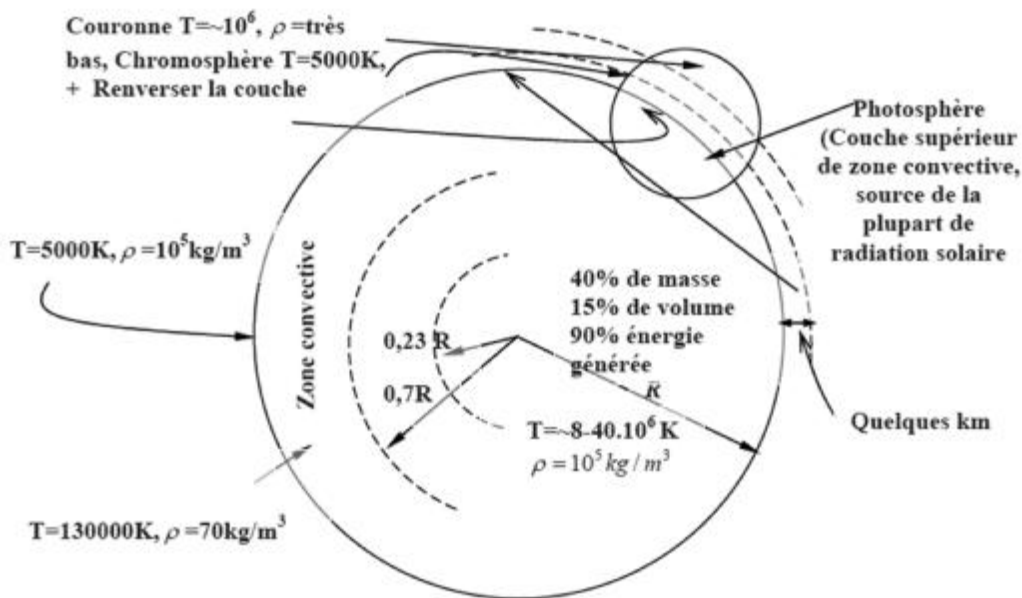


Fig. I.1 : Structure du soleil [8]

I.2. Historique

L'Antiquité, les hommes avaient très tôt découvert qu'il était possible de concentrer l'énergie solaire pour obtenir de hautes températures. Ainsi, selon ce qui constitue plus une légende qu'une vérité historique, Archimède aurait réussi, en utilisant des miroirs paraboliques, à incendier les vaisseaux romains ennemis lors du siège de Syracuse en 213 avant Jésus-Christ,

au cours de la deuxième guerre Punique. Ce type de miroir était désigné sous le nom de « miroir ardent ».

Après la Renaissance, en particulier au 17^{ème} et au 18^{ème} siècle, que des miroirs ardents de grande taille ont été construits par les physiciens férus d'optique comme Jean-Dominique Cassini (1625-1712), François Vilette (1621-1698) ou Edme Mariotte (1620-1684). Plus tard, Antoine Lavoisier (1743-1794), en particulier, a utilisé de tels instruments pour fondre de nombreux corps. en 1839 Antoine-César Becquerele découverte La transformation de la lumière du soleil en courant électrique. En (1857-1913) le physicien genevois Horace-Benedict utilise l'effet de serre. Il est le premier à avoir décrit le concept d'un vitrage placé au-dessus d'un absorbeur, lui-même au-dessus d'un caisson isolé [9].

En 1955 que les chercheurs de Bel Téléphone Laboratoires (aux Etats-Unis) soient capables de produire la cellule qui avait le rendement de conversion énergétique au moins 6% (ratio entre l'énergie utilisé pendant la fabrication et l'énergie que le système est capable de produire) [9].

En 2000, les statistiques ont annoncé que 83% de la consommation mondiale de l'énergie est représentée par les combustibles fossiles, seulement 6% provient des centrales hydrauliques et nucléaires et 10% de la biomasse (l'ensemble des matières organiques qui peuvent servir de source d'énergie). Les autres sources renouvelables étaient au-dessous de 1%. Mais au cours du 21^{ème} siècle les sources renouvelables montrent un accroissement qui, pour l'instant, ne cesse d'augmenter [10].

I.3. Définition de l'énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable provenant du rayonnement du soleil. Elle permet de produire de l'électricité et de se chauffer. Il existe trois types d'énergie solaire : photovoltaïque, thermique et thermodynamique [11].

I.4. Différents types d'utilisation d'énergie solaire

I.4.1. Energie solaire photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » (PV) est composé de deux mots ; « photo » qui veut dire lumière et « voltaïque » (d'après le nom du physicien italien Alessandro Volta (1745-1825) qui a découvert la première batterie électrochimique) qui veut dire électricité.

Donc la définition de la conversion photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque. La principale source lumineuse inépuisable étant le soleil [12].

I.4.2. Centrales solaires thermodynamiques :

Le solaire thermodynamique est un terme regroupant toutes les techniques de transformation des rayons du soleil en chaleur. Grâce à un dispositif optique de concentration du rayonnement solaire, il est possible de chauffer des fluides à très hautes températures. Une fois produite, cette chaleur peut être utilisée pour générer de l'hydrogène ou produire de l'électricité [13].

I.4.3. Energie solaire thermique :

La conversion photothermique est le processus le plus simple. Il consiste en une transformation du rayonnement solaire en forme thermique (chaleur), qu'on peut utiliser :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire [14].

I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

a) Avantages

- C'est une source d'énergie renouvelable
- L'énergie solaire peut soit réduire drastiquement, soit éliminer totalement vos factures d'électricité
- L'énergie solaire augmente la valeur de votre bâtiment

b) Inconvénients

- Un coût élevé
- L'énergie solaire est une source d'énergie intermittente
- L'installation nécessite beaucoup d'espace [15].

I.6. Potentiel Solaire en Algérie

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

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m au Grand Sud [16].

Régions	Régions Côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie %	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3000
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.1 : Potentiel solaire dans l'Algérie [17].

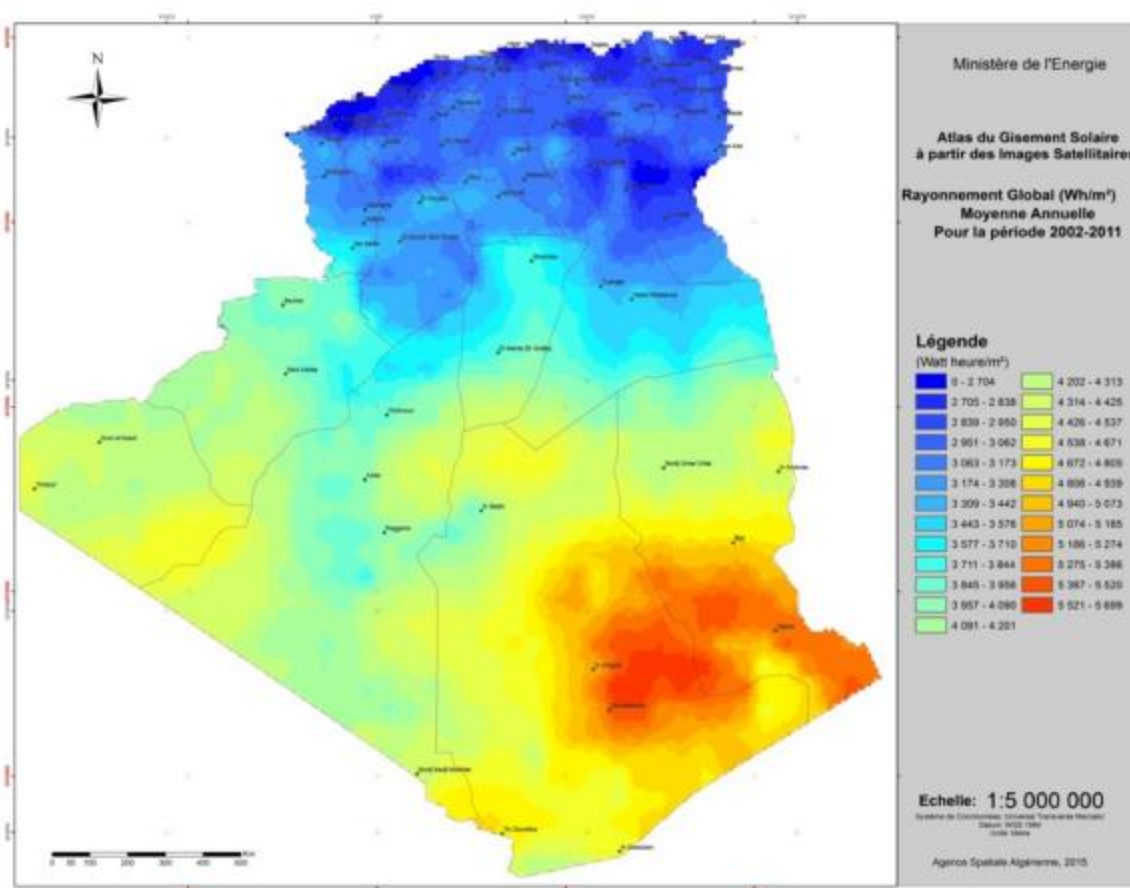


Fig. I.2: Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (2002-2011).

I.7. Besoins d'énergie des personnes

La notion même de besoin réel que l'énergie permet de satisfaire est ambiguë, et demande à être clarifiée. À la base, on retrouve bien sûr une notion physiologique : manger, boire, dormir, être à l'abri, mais au fur et à mesure que les sociétés progressent, la notion de besoin change. Elle englobe de façon croissante des dimensions culturelles et sociales [18].

Typologie des besoins humains que l'énergie permet de satisfaire	
Fonction socio-économique	<ul style="list-style-type: none"> – préparation des repas – conservation des aliments – nettoyage, séchage
Alimentation	<ul style="list-style-type: none"> – préparation des repas – conservation des aliments – nettoyage, séchage
« Tanière » (confort, santé, sécurité)	<ul style="list-style-type: none"> – préparation des repas – conservation des aliments – nettoyage, séchage
Loisirs, temps pour soi	<ul style="list-style-type: none"> – culture – information – communication – jeux
Mobilité	<ul style="list-style-type: none"> – accession au travail – accession aux aménités courantes: école, magasins, lieux de culture, de culte, ... – lien social et familial – escapades, vacances

Tableau I.2 : Typologie des besoins humains que l'énergie permet de satisfaire.

I.8. Energie solaire en l'Algérie

Le 9 décembre 2011, la société algérienne de l'électricité et du gaz (Sonelgaz et DesertecIndustry),Initiative ont signé à Bruxelles un accord de coopération visant au

renforcement des échanges d'expertise technique, a l'examen des voies et moyens pour l'accès aux marchés extérieurs et à la promotion commune du développement des énergies renouvelables en Algérie et à l'international.

Pour que l'Algérie préserve les réserves énergétiques actuelles (pétrole et gaz), le pays a opté pour le développement et l'exploitation de l'énergie solaire. Afin de concrétiser son programme d'exploitation de l'énergie solaire, l'Algérie a chargé la Sonelgaz de construire la centrale électrique mixte de HassiR'Mel, mise en service en 2011 à Tilghemt dans la wilaya de Laghouat dans le sud du pays, d'une capacité de 150 mégawatts (30 MW solaire

Thermodynamique + 120 MW gaz). C'est la société New Énergie Alegria (NEA), qui est chargée du secteur des énergies nouvelles et renouvelables.

La première usine privée algérienne de fabrication de panneaux solaires est opérationnelle à partir du mois de mars 2012 avec un taux d'intégration nationale de 90 %. L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie non polluante. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture [19].

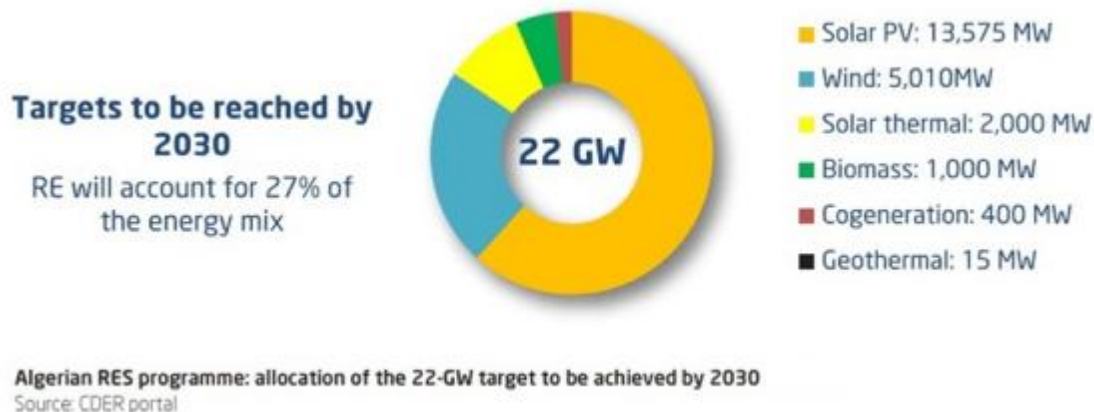


Fig. I. 3 : Energie renouvelable en l'Algérie.

I.9. Effet de serre

Sur Terre, 30% du rayonnement solaire sont directement renvoyés vers l'espace sous l'effet de la réverbération, environ 20% sont absorbés par l'atmosphère et un peu plus de 50% par la croûte terrestre et les océans. La chaleur emmagasinée est ensuite restituée vers l'atmosphère par convection et sous forme de rayonnement infrarouge c'est là qu'intervient le phénomène [20]. L'effet de serre est originellement un phénomène naturel qui vise à résorber le

rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre et maintenu sous forme de chaleur dans la partie inférieure de l'atmosphère. Avec la surabondance de gaz à effet de serre, ce phénomène fragile tend à transformer la Terre en véritable étuve.

I.9.1. Principaux gaz à effet de serre

Naturellement présents dans l'atmosphère, les gaz à effet de serre sont nombreux, mais seuls quelques-uns participent activement à résorber les rayonnements infrarouges depuis la troposphère. Parmi ceux-là, la vapeur d'eau est la plus importante : elle représenterait à elle seule près de 70 % de ce phénomène naturel. On trouve ensuite le dioxyde de carbone (le CO₂), généré notamment par les éruptions volcaniques ou les feux de forêt. Certes moins concentré, il y a également le méthane, plus puissant que le CO₂. Celui-ci se forme par les processus naturels de fermentation (digestion des ruminants, marécages, etc.). Enfin, on trouve l'ozone qui protège aussi du rayonnement solaire ultraviolet (UV) [21].

I.10. Paramètres de position

a. Les coordonnées géographiques

Les coordonnées géographiques permettent de localiser un lieu sur la Terre grâce à trois mesures : l'altitude, la longitude et la latitude.

- **Longitude φ**

Une longitude donnée, matérialisée par un cercle appelé méridien, est l'angle formé entre le plan du méridien d'un lieu et le plan du méridien de Greenwich (méridien origine, de longitude 0 degré). Elle varie de + 180 degrés vers l'ouest à - 180 degrés vers l'est [22].

- **Latitude θ**

La latitude d'un lieu est l'angle que ce dernier forme avec l'**équateur** et le parallèle sur laquelle se trouve le lieu. On compte les latitudes de 0° (à l'équateur) et 90° (aux pôles) [23].

- **Altitude**

Élévation verticale, hauteur (d'un point) par rapport au niveau moyen de la mer : la pression atmosphérique diminue avec l'altitude [22].

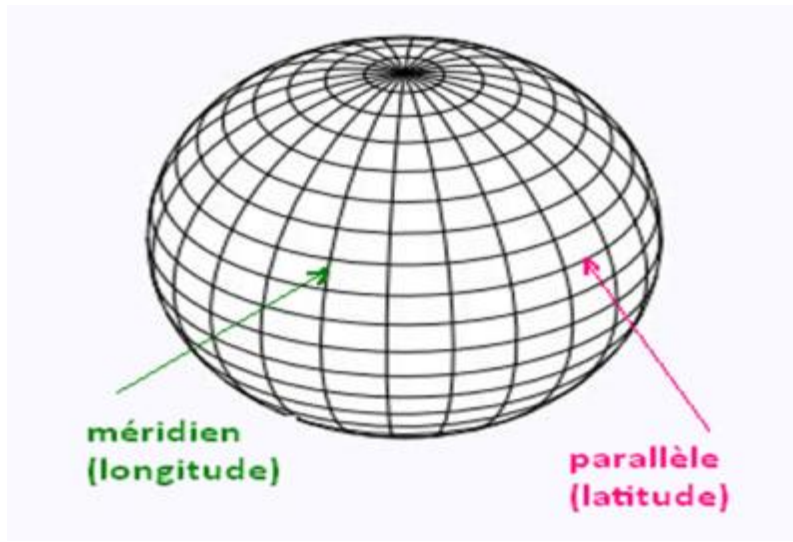


Fig. I.4: Cordonnées géographiques.

b. Coordonnées équatoriales

Le système de coordonnées équatoriales est essentiellement la projection du système de coordonnées de latitude et de longitude que nous utilisons ici sur terre, sur la sphère céleste à l'aide de deux angles : Déclinaison solaire δ , Angle horaire W .

• La déclinaison du soleil δ :

La déclinaison est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. La déclinaison du soleil varie quotidiennement selon la relation : [24]

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365} \cdot (N + 284)\right] \dots \dots \dots (1)$$

• L'angle horaire W :

L'angle horaire (ω) du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. Cet angle est exprimé en ($^{\circ}$) et est donné par l'expression suivante [25]

$$W = 15 \cdot (TSV - 12) \dots \dots \dots (2)$$

Notons que : $W = 0$ au midi solaire vrai

Si $W < 0$, c'est la matinée, si non $W > 0$, c'est l'après-midi.

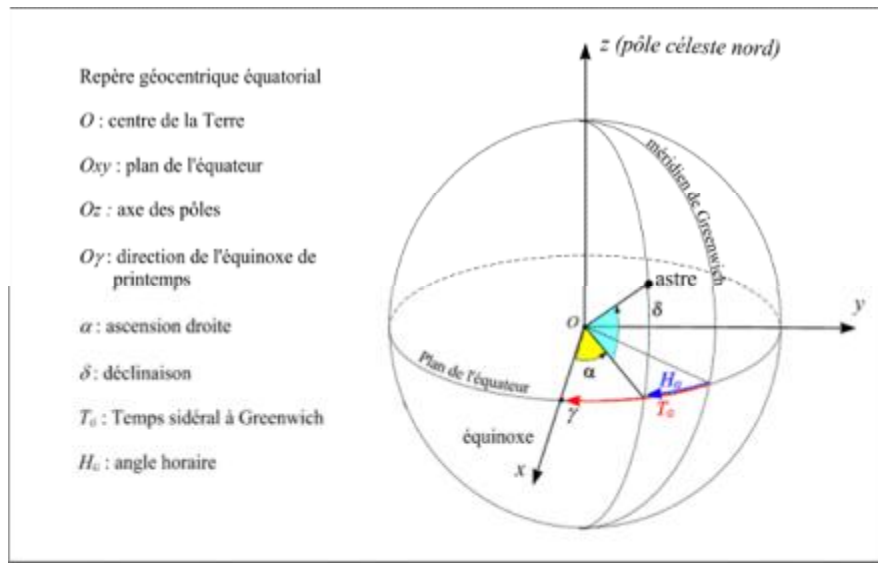


Fig. I.5 : Coordonnées équatoriales.

c. Coordonnées horizontales

Le système de coordonnées horizontales, est un système de coordonnées célestes utilisé en astronomie par un observateur situé au sol.

• **L’Azimut (a)**

C’est l’angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud.

Il est compté de 0° à 360° d’Ouest en Est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l’ouest. La relation qui donne l’azimut est donnée par la relation ci-dessous [26]:

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cos \omega \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi}{\cos \gamma} \dots \dots \dots (3)$$

• **Hauteur du soleil (h)**

C’est l’angle que fait la direction du soleil avec sa projection, elle est donnée par la formule suivante [27] :

$$\sin(h) = \sin(\gamma) \times \sin(\delta) + \sin(\gamma) \times \cos(\delta) \times \cos(w) \dots \dots \dots (4)$$

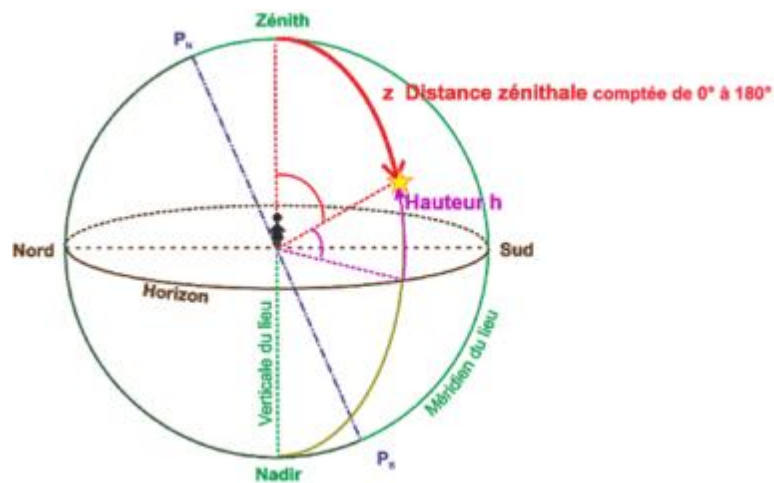


Fig. I.6 : Coordonnées horizontales

I.11. Capteurs solaires thermiques

I.11.1. Définition

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...).

Le principe de conversion du rayonnement solaire en énergie thermique est basé sur la paroi absorbante qui s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident, et l'effet de serre qui consiste à accumuler la chaleur dans un capteur pour la transférer directement ou par l'intermédiaire d'un fluide qui circule sous cette paroi et récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température ($T_{fs} - T_{fe}$) à la traversée du capteur [28].

I.11.2. Types de capteurs solaires

I.11.2.1. Capteurs plans non vitrés

Ce sont des capteurs simples de grande surface de collecte produisant de températures relativement basses et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement.

Ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et de l'eau sanitaire



Fig. I.7 : Capteurs plans non vitrés.

I.11.2.2. Capteurs plans vitrés

Ce sont des systèmes destinés à générer de l'air chaud pour le séchage ou la production de l'eau chaude sanitaire. Ils sont constitués d'éléments plans montés en parallèle. Sa couverture transparente plane souvent en verre reçoit le maximum de rayonnement qu'il transmet partiellement à l'absorbeur qui est en tôle peinte en noir pour absorber le maximum de rayonnement solaire. Il est isolé sur les faces latérales et arrière comme l'indique la figure 1.3. Ce type de capteur est installé proche des stations thermiques, ses températures de fonctionnement peuvent aller jusqu'à 100°C [29].



Fig. I.8 : Capteurs plans vitrés.

I.11.2.3. Capteurs à tubes sous vide

Le capteur solaire à tubes sous vide est constitué des rangées de tubes de verre parallèles, reliées à un tuyau d'en-tête comme illustré à la figure. L'air à l'intérieur de chaque tube est retiré est atteint des pressions de vide autour de 10-3 mbar. Cela crée des conditions

d'isolation élevées pour éliminer les pertes de chaleur par convection et par rayonnement, pour atteindre des températures plus élevées. Dans les tubes à passage direct, le fluide s'écoule à travers l'absorbeur. Ces capteurs sont classés en fonction de leurs nœuds de liaison-matériaux ; par exemple verre-métal ou verre-verre et par l'agencement des tubes (concentriques ou tube en U). À l'intérieur de chaque tube une ailette métallique plane ou incurvée est attachée à un tube de cuivre. L'ailette est revêtue d'un film mince dont les propriétés optiques sélectives permettent d'atteindre une forte absorbance du rayonnement solaire et réduite les pertes de chaleur par rayonnement [30].



Fig. I.9 : Capteurs à tubes sous vide.

I.11.3. Principaux composants d'un capteur plan

La figure I.11 représente un module qui est le composant du prototype de capteur solaire à plaque plate étudié. Ce module mesure 2 m de long, 20 cm de large et 6,2 cm d'épaisseur. Un module est constitué d'un coffre, une couverture transparente, absorbeur, fluide caloporteur, isolant.

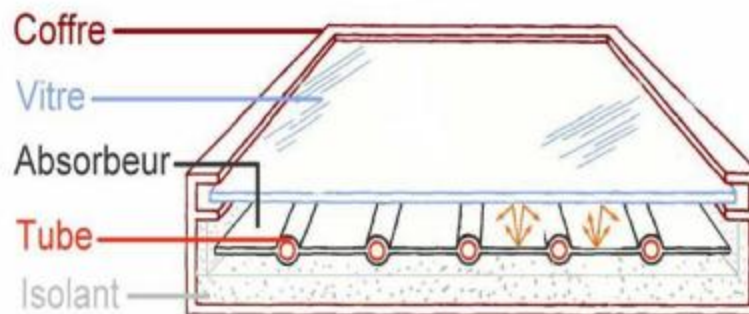


Fig. I.10 : Composants d'un capteur plan.

· Couverture transparente

La couverture a une fonction de protection de l'absorbeur, mais elle joue aussi un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur. Habituellement, on utilisera le verre comme couverture transparente. Un tel dispositif représente donc un véritable piège au rayonnement solaire, qui peut être amélioré en munissant le capteur d'une double couverture. Comme couvertures transparentes utilisées dans la conception des capteurs solaire plans, on distingue : verre, plastique [31].

· Absorbeur

Le rôle principal d'un absorbeur est le captage du rayonnement solaire et sa conversion en énergie calorifique. Il est généralement peint en noir pour absorber tous les rayonnements dans le spectre du visible, du l'ultraviolet et une faible quantité dans l'infrarouge.

L'absorbeur est choisi selon les caractéristiques suivantes [32] :

- ü Un bon coefficient d'absorption
- ü Une bonne conductivité thermique
- ü Une bonne résistance à la corrosion

· Isolant

L'isolation joue un rôle très important dans les applications thermiques de l'énergie solaire, pour limiter les pertes par conduction et convection vers le milieu environnant, au niveau des côtés et en bas du capteur. L'isolant doit être opaque aux rayonnements de grandes longueurs d'onde, dans le domaine de l'infrarouge émis par la plaque rayonnante (absorbeur). Un bon isolant doit avoir les qualités suivantes [33] :

- Une faible conductivité thermique
- Une faible densité (pour une faible inertie thermique)
- La chaleur massique doit être basse

I.11.4. Principe de fonctionnement du capteur solaire thermique plan

Le principe de la technologie solaire thermique est :

Une surface absorbante, en contact avec des tubes alimentés en fluide caloporteur, va capter les rayons du soleil. Le fluide caloporteur est très souvent composé d'eau et d'antigel. Afin d'accentuer la chaleur dans le caisson, un vitrage permet de créer un effet de serre. Enfin, un isolant est placé en dessous de l'ensemble des éléments afin d'éviter que la chaleur ne

s'échappe par le bas ou par les bords. Cet isolant doit bien sûr résister à de fortes températures pour éviter qu'il ne brûle. Tout est donc fait pour que la chaleur transmise au fluide caloporteur soit maximale. Les capteurs plans vitrés sont aujourd'hui les plus plébiscités sur le marché des particuliers [34].

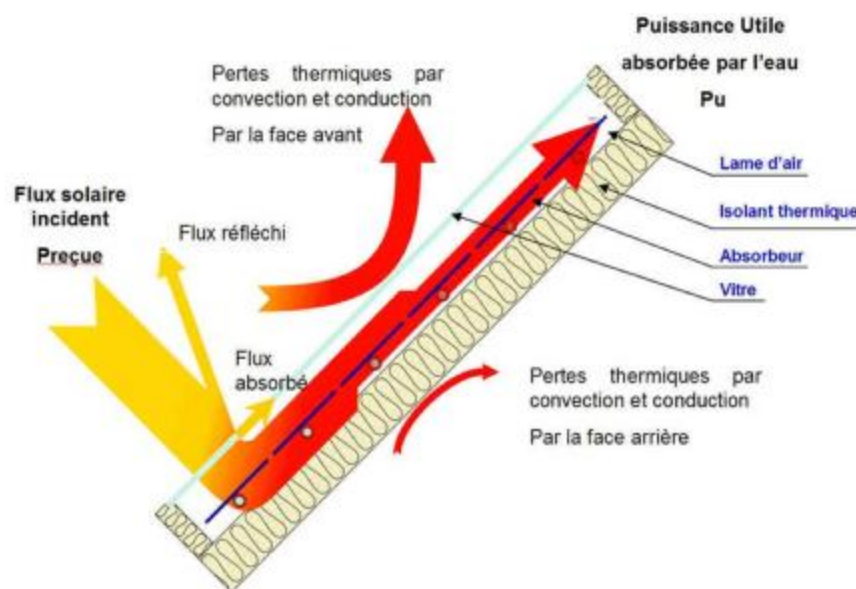


Fig. I.11 : Principe de fonctionnement du capteur solaire thermique plan.

I.11.5. Orientation et l'inclinaison du capteur

L'influence de l'orientation d'un capteur et de son inclinaison avec l'horizontal est due au fait que ces deux dernières changent le rayonnement solaire atteignant la surface du capteur. Huseyin Gunerhan et Arif Hepbasli (2007) ont trouvé que la meilleure orientation du capteur solaire est de l'orienter directement au sud. L'angle optimum d'inclinaison est appliqué à une variété de systèmes, tels que, les capteurs plans ou paraboliques, les panneaux photovoltaïques, maisons solaires et serres installées dans une position fixe. Cet angle joue un rôle important en augmentant la collection d'énergie par les capteurs solaires [35].

I.11.6. Application du capteur solaire thermique

Les capteurs solaires thermiques sont utilisés dans un grand nombre d'applications, étant donné les avantages qu'ils apportent à l'environnement et la consommation d'énergie réduite dans de nombreux processus industriels et maisons. Voici les principales applications :

- **Séchage solaire**

Le séchage thermique convectif est une opération unitaire qui a pour but d'éliminer par évaporation, dans le cas du séchage thermique, l'eau contenue dans un produit afin de le transformer en un produit dont la teneur en eau résiduelle est faible. Il fait appel à deux phénomènes: [36]

- **Ü** un transfert de chaleur de l'air vers le produit dû à la différence de température entre le produit et l'air,
- **Ü** un transfert de l'eau du sein du produit vers sa surface. Ce transfert est régi par les mécanismes de diffusion. L'évolution, au cours du temps, de la teneur en eau du produit est décrite par la courbe de séchage

CHAPITR II

MODELISATION MATHEMATIQUE
MODELISATION MATHEMATIQUE

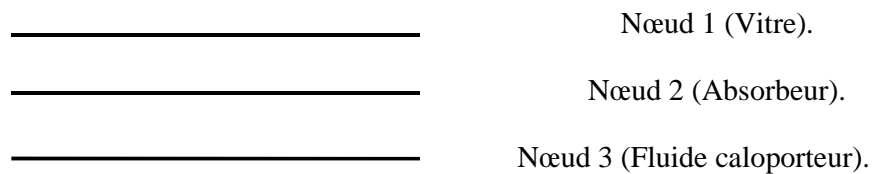
Modélisation mathématique

II.1. Bilan thermique du capteur solaire plan

On se propose d'établir les bilans thermiques du capteur solaire en régimes permanent et transitoire.

A cet effet, on considère que chaque constituant est représenté par un nœud, sur lequel on procède à l'établissement un bilan thermique.

Le schéma suivant matérialise en nœuds le capteur solaire tel que,



Le bilan thermique au nœud i est donné par l'équation suivante

$$m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^{i=n} q_{ij} + P_i \quad (\text{II.1})$$

m_i : Masse du composant i .

C_{p_i} : Chaleur spécifique du composant i .

T_i : Température du composant i .

q_{ij} : Quantité de chaleur échangée avec le composant j .

P_i : Terme source ou puits.

n : 3.

· **La puissance absorbée par la vitre**

$$P_v = \alpha_v \cdot G \cdot A_v \quad (\text{II.2})$$

P_v : Puissance absorbée par la vitre.

α_v : Absorptivité de la vitre.

G : Radiation solaire.

A_v : Surface de la vitre.

- **Puissance absorbée par l'absorbeur**

$$P_{ab} = \alpha_{ab} \cdot \tau_v \cdot G \cdot A_{ab} \quad (II.3)$$

P_{ab} : Puissance absorbée par l'absorbeur.

α_{ab} : Absorptivité de l'absorbeur.

τ_v : Transmissivité de la vitre.

A_{ab} : Surface de l'absorbeur.

II.1.1. Bilans thermiques

II.1.1.1. Echange thermique avec la vitre

La vitre reçoit

- Un flux thermique rayonné par le soleil, P_v ,

$$P_v = \alpha_v \cdot G \cdot A_v$$

- Un flux thermique cédé par rayonnement par l'absorbeur,

$$Q_{ab-v}^r = h_{ab-v}^r \cdot A_v \cdot (T_{ab} - T_v) \quad (II.4)$$

- Un flux thermique cédé par convection par l'absorbeur,

$$Q_{ab-v}^c = h_{ab-v}^c \cdot A_v \cdot (T_{ab} - T_v) \quad (II.5)$$

La vitre cède

- Un flux thermique cédé par convection au milieu ambiant,

$$Q_{v-a}^c = h_{v-a}^c \cdot A_v \cdot (T_v - T_a) \quad (II.6)$$

- Un flux thermique cédé par rayonnement au ciel,

$$Q_{v-c}^r = h_{v-c}^r \cdot A_v \cdot (T_v - T_c) \quad (II.7)$$

II.1.1.2. Echange thermique avec l'absorbeur

L'absorbeur reçoit

- Un flux thermique rayonnée par le soleil et transmis par la vitre,

$$P_{ab} = \alpha_{ab} \cdot \tau_v \cdot G \cdot A_{ab} \quad (II.8)$$

L'absorbeur cède

- Un flux thermique cédé par convection au fluide,

$$Q_{ab-f}^c = h_{ab-f}^c \cdot A_{abf} \cdot (T_{ab} - T_f) \quad (II.9)$$

- Un flux thermique cédé par convection à la vitre,

$$Q_{ab-v}^c = h_{ab-v}^c \cdot A_v \cdot (T_v - T_a) \quad (II.10)$$

- Un flux thermique cédé par rayonnement à la vitre,

$$Q_{ab-v}^r = h_{ab-v}^r \cdot A_v \cdot (T_{ab} - T_v) \quad (II.11)$$

II.1.1.3. Echange thermique avec le fluide caloporteur

Le fluide reçoit

- Un flux thermique cédé par convection par l'absorbeur,

$$Q_{ab-f}^c = h_{ab-f}^c \cdot A_{abf} \cdot (T_{ab} - T_f) \quad (II.9)$$

II.2. Hypothèses simplificatrices

Il est nécessaire d'avancer certaines hypothèses afin d'avoir une simulation approchée du système étudié en régime permanent

- Le soleil est assimilé à un corps noir.
- Le régime d'écoulement est permanent.
- Les propriétés des matériaux sont supposées constantes.
- La température du sol est prise égale à la température de l'ambiance.
- Le vent est supposé soufflant parallèlement aux faces du système.
- Les surfaces d'échange thermiques sont supposées grises et diffusantes.
- Le rayonnement diffus atmosphérique est supposé isotrope.
- La température de la plaque absorbante est supposée égale à celle des tubes.
- Les différents milieux solides ont une température uniforme dans un plan normal au sens de l'écoulement.
- Les flux de chaleur sont unidimensionnels.
- La couverture transparente est propre.
- Les parois latérales sont supposées à des températures constantes.
- Le fluide caloporteur utilisé est de l'eau pure.

II.3. Bilan thermique du capteur en régime transitoire

1. Bilan thermique au niveau de la vitre
2. Bilan thermique au niveau l'absorbeur
3. Bilan thermique au niveau du fluide caloporteur

Il est important de rappeler que le bilan thermique d'un appareil thermique est souvent par

$$\text{Accumulation} + \text{Génération} = \text{Réception} + \text{Perditiion}$$

Comme le capteur traité dans cette étude ne génère pas de l'énergie ni perd, le terme génération saute de l'équation précédente.

L'accumulation dépend du régime thermique, en effet, cette accumulation est négligeable si le régime est stationnaire.

Mais pour le régime transitoire, l'accumulation est toujours là.

Donc l'équation devient

$$\text{Accumulation} = \text{Réception} + \text{Perditiion}$$

II.3.1. Bilan thermique de la vitre

La vitre reçoit :

- Un flux de chaleur par rayonnement de la part du soleil
- Un flux de chaleur par rayonnement de la part de l'absorbeur
- Un flux de chaleur par convection de la part de l'absorbeur

La vitre cède :

- Un flux de chaleur par rayonnement au ciel
- Un flux de chaleur par convection à l'ambiance extérieure

La vitre accumule :

- Un flux de chaleur s'accumulant en fonction du temps

Tous ces flux de chaleur peuvent être mis en équation avec signe plus pour tout ce qui est reçu et signe moins pour ce qu'est perdu ;

$$\frac{M_V C_{pV}}{S_V} \frac{\partial T_V}{\partial t} = \alpha_V G - h_{V-a}^c (T_V - T_a) - h_{V-S}^r (T_V - T_S) + h_{ab-V}^c (T_{ab} - T_V) + h_{ab-V}^r (T_{ab} - T_V) \quad (\text{II.12})$$

II.3.2. Bilan thermique de l'absorbeur

L'absorbeur reçoit :

- Un flux de chaleur par rayonnement de la part du soleil.

L'absorbeur cède :

- Un flux de chaleur par rayonnement à la vitre ;
- Un flux de chaleur par convection à la vitre ;
- Un flux de chaleur par convection au fluide caloporteur.

La vitre accumule :

- Un flux de chaleur s'accumulant en fonction du temps

Tous ces flux de chaleur peuvent être mis en équation avec signe plus pour tout ce qui est reçu et signe moins pour ce qu'est perdu ;

$$\frac{M_{ab} C_{pab}}{S_{ab}} \frac{\partial T_{ab}}{\partial t} = \tau_V \alpha_{ab} G - h_{ab-F}^c (T_{ab} - T_F) - h_{ab-v}^c (T_{ab} - T_v) + h_{ab-v}^r (T_{ab} - T_v) \quad (\text{II.13})$$

II.3.3. Bilan thermique du fluide caloporteur

Le fluide caloporteur reçoit :

- Un flux de chaleur par convection de la part de l'absorbeur

Le fluide caloporteur cède :

- Un flux de chaleur dit flux de chaleur utile.

Le fluide caloporteur accumule :

- Un flux de chaleur s'accumulant en fonction du temps

Tous ces flux de chaleur peuvent être mis en équation avec signe plus pour tout ce qui est reçu et signe moins pour ce qu'est perdu ;

$$\frac{M_F C_{pF}}{S_F} \frac{\partial T_F}{\partial t} = h_{ab-F}^c (T_{ab} - T_F) + \frac{\dot{m} C_{pF}}{S_F} \frac{\partial T_F}{\partial t} \quad (\text{II.14})$$

II.4. Définition des coefficients d'échange thermique

Les échanges thermiques entre les différents constituants et leurs entourages peuvent être par

- **Conduction**
- **Rayonnement**
- **Convection**

II.4.1. Echange thermique par conduction

La vitre qu'on a choisie est d'une épaisseur faible, donc l'échange thermique par conduction est négligeable.

Cette hypothèse est aussi valable pour l'absorbeur.

II.4.2. Echange thermique par rayonnement

- Vitre-ciel
- Absorbeur-vitre

II.4.3. Echange thermique par convection

- Vitre-ambiance
- Absorbeur-vitre
- Absorbeur-fluide

II.5. Définitions des coefficients d'échange thermiques

II.5.1. Echange par rayonnement

II.5.1.1. Echange vitre-ciel

$$h_{v-c}^r = \sigma (T_{ve} + T_c) (T_{ve}^2 + T_c^2)$$

Avec

h_{v-c}^r : Coefficient d'échange radiatif vitre-ciel.

σ : Constante de Boltzmann.

T_{ve} : Température de la face externe de la vitre.

T_c : Température du ciel.

Bien qu'il existe plusieurs formules de calcul de température du ciel, la formule suivante est largement utilisée,

$$T_c = 0,552 \cdot T_a^{1,5}$$

II.5.1.2. Echange isolant-ciel

$$h_{i-c}^r = \sigma (T_{ie} + T_c) (T_{ie}^2 + T_c^2)$$

Avec

h_{i-c}^r : Coefficient d'échange radiatif isolant-ciel.

T_{ie} : Température de la face externe de l'isolant.

II.5.1.3. Echange isolant-ciel

$$h_{ab-v}^r = \sigma \frac{(T_{ab} + T_{vi})(T_{ab}^2 + T_{vi}^2)}{\frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} + 1 + \frac{1 - \varepsilon_{ab}}{\varepsilon_{ab}}}$$

Avec

h_{ab-v}^r : Coefficient d'échange radiatif absorbeur-vitre.

T_{ab} : Température de l'absorbeur.

T_{vi} : Température de la face interne de la vitre.

ε_v : Emissivité de la vitre.

ε_{ab} : Emissivité de l'absorbeur.

II.5.2. Echange par convection

II.5.2.1. Echange vitre-air ambiant

$$h_{v-a}^c = 5,67 + 3,86 \cdot V_{vent}$$

h_{v-a}^c : Coefficient d'échange convectif vitre-air ambiant.

V_{vent} : Vitesse du vent en m/s.

II.5.2.2. Echange absorbeur-vitre

$$h_{ab-v}^c = Nu \frac{\lambda_a}{b}$$

h_{ab-v}^c : Coefficient d'échange convectif absorbeur-vitre.

Nu : Nombre de Nusselt.

b : Distance entre la vitre et l'absorbeur.

λ_a : Conductivité thermique de l'air.

· **Calcul du nombre de Nusselt**

1. Si $0 < \varphi < \varphi^0$

$$Nu = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708}{Gr \cdot Pr \cdot \cos \varphi} \right) \left[1 - \frac{1708(\sin(1,8 \cdot \varphi))^{1,6}}{Gr \cdot Pr \cdot \cos \varphi} \right] + \left[\left(\frac{Gr \cdot Pr \cdot \cos \varphi}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

ϕ : Inclinaison.

2. Si $\varphi^0 < \varphi < 90^\circ$

$$Nu = (\sin(1,8 \cdot \varphi))^{0,25} Nu(90^\circ)$$

3. Si $90^\circ < \varphi < 180^\circ$

$$Nu = 1 + (Nu(90^\circ) - 1) \sin(1,8 \cdot \varphi)$$

Avec

$$\varphi^0 = \tan^{-1}(4800 \cdot Pr)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L}{\nu^2}$$

$$Pa = Gr \cdot Pr$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda}$$

CHAPITR III

ETUDE NUMERIQUE
ETUDE NUMERIQUE

Etude numérique

Après avoir modélisé le phénomène physique, le transfert thermique au niveau du capteur solaire à air, en passant par la conversion de l'énergie solaire en chaleur au profit d'un fluide caloporteur qui va servir par la suite au séchage ou bien au chauffage.

Le système d'équations II- II- peut être discrétisé par la méthode de différence finies et résolu par l'une des méthodes numériques telles que la méthode inverse, la méthode de Newton, de Gauss-Seidel ou la méthode de Runge-Kutta.

Le système d'équations précédent obtenu exprimant les bilans thermiques des différents composants du capteur en découpant le capteur en temps et en espace (une seule dimension celle de l'écoulement du fluide caloporteur).

En régime transitoire, on va utiliser une simulation dite pas à pas, qui tient compte de l'évolution de températures de tous les éléments du capteur dans le temps.

Cette méthode nécessite des calculs numériques qui rendent aussi indispensable l'usage de l'ordinateur [12].

III.1. Discrétisation des équations

III.1.1. Discrétisation de l'équation de la vitre

$$\frac{M_V C_{pV}}{S_V} \frac{(T_V^{t+\Delta t}(j) - T_V^t(j))}{\Delta t} = \alpha_V G^{t+\Delta t} + h_{ab-V}^c (T_{ab}^{t+\Delta t}(j) - T_V^{t+\Delta t}(j)) + h_{ab-V}^r (T_{ab}^{t+\Delta t}(j) - T_V^{t+\Delta t}(j)) - h_{V-a}^c (T_V^{t+\Delta t}(j) - T_a^{t+\Delta t}) - h_{V-s}^r (T_V^{t+\Delta t}(j) - T_S^{t+\Delta t}) \quad (III.1)$$

$$\frac{M_V C_{pV}}{S_V} \frac{(T_V^{t+\Delta t} - T_V^t)}{\Delta t} = \alpha_V G^{t+\Delta t} + h_{ab-V}^c (T_{ab}^{t+\Delta t} - T_V^{t+\Delta t}) + h_{ab-V}^r (T_{ab}^{t+\Delta t} - T_V^{t+\Delta t}) - h_{V-a}^c (T_V^{t+\Delta t} - T_a^{t+\Delta t}) - h_{V-s}^r (T_V^{t+\Delta t} - T_S^{t+\Delta t}) \quad (III.2)$$

III.1.2. Discrétisation de l'équation de l'absorbeur

$$T_V^{t+\Delta t}(j) \left(\frac{M_V C_{pV}}{S_V \Delta t} + h_{ab-V}^c + h_{ab-V}^r + h_{V-a}^c + h_{V-a}^r \right) - T_{ab}^{t+\Delta t}(j) (h_{ab-V}^c + h_{ab-V}^r) = \alpha_V G^{t+\Delta t} + h_{V-a}^c (T_a^{t+\Delta t}) + h_{V-a}^r (T_S^{t+\Delta t}) + \frac{M_V C_{pV}}{S_V \Delta t} (T_V^t(j)) \quad (III.3)$$

$$\begin{aligned} T_V^{t+\Delta t} \left(\frac{M_V C_{pV}}{S_V \Delta t} + h_{ab-V}^c + h_{ab-V}^r + h_{V-a}^c + h_{V-a}^r \right) - T_{ab}^{t+\Delta t} (h_{ab-V}^c + h_{ab-V}^r) = \alpha_V G^{t+\Delta t} + \\ h_{V-a}^c (T_a^{t+\Delta t}) + h_{V-a}^r (T_S^{t+\Delta t}) + \frac{M_V C_{pV}}{S_V \Delta t} (T_V^t) \end{aligned} \quad (III.4)$$

III.1.3. Discrétisation de l'équation du fluide caloporteur

$$\begin{aligned} \frac{M_{ab} C_{pab}}{S_{ab}} \frac{(T_{ab}^{t+\Delta t}(j) - T_{ab}^t(j))}{\Delta t} = \tau_V \alpha_{ab} G^{t+\Delta t} - h_{ab-F}^c (T_{ab}^{t+\Delta t}(j) - T_F^{t+\Delta t}(j)) - h_{ab-V}^c (T_{ab}^{t+\Delta t}(j) - \\ T_V^{t+\Delta t}(j)) - h_{ab-V}^r (T_{ab}^{t+\Delta t}(j) - T_V^{t+\Delta t}(j)) \end{aligned} \quad (III.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{M_{ab} C_{pab}}{S_{ab}} \frac{(T_{ab}^{t+\Delta t} - T_{ab}^t)}{\Delta t} = \tau_V \alpha_{ab} G^{t+\Delta t} - h_{ab-F}^c (T_{ab}^{t+\Delta t} - T_F^{t+\Delta t}) - h_{ab-V}^c (T_{ab}^{t+\Delta t} - T_V^{t+\Delta t}) - \\ h_{ab-V}^r (T_{ab}^{t+\Delta t} - T_V^{t+\Delta t}) \end{aligned} \quad (III.6)$$

III.2. Réarrangement des équations discrétisées

III.2. 1. Equation de la vitre

$$\begin{aligned} -T_V^{t+\Delta t}(j) (h_{ab-V}^c + h_{ab-V}^r) + T_{ab}^{t+\Delta t}(j) \left(\frac{M_{ab} C_{pab}}{S_{ab} \Delta t} + h_{ab-F}^c + h_{ab-V}^c + h_{ab-V}^r \right) - \\ T_F^{t+\Delta t}(j) (h_{ab-F}^c) = \tau_V \alpha_{ab} G + \frac{M_{ab} C_{pab}}{S_{ab} \Delta t} (T_{ab}^t(j)) \end{aligned} \quad (III.7)$$

III.2. 2. Equation de l'absorbeur

$$\begin{aligned} \frac{M_F C_{pF}}{S_F} \frac{(T_F^{t+\Delta t}(j) - T_F^t(j))}{\Delta t} = h_{ab-F}^c (T_{ab}^{t+\Delta t}(j) - T_F^{t+\Delta t}(j)) + \frac{\dot{m} C_{pF}}{S_F} \frac{(T_F^{t+\Delta t}(j-1) - T_F^{t+\Delta t}(j))}{\Delta t} \\ \text{Avec} \quad T_F^{t+\Delta t}(j=0) = T_a^{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (III.8)$$

III.2. 3. Equation du fluide caloporteur

$$\begin{aligned} -T_{ab}^{t+\Delta t}(j) (h_{ab-F}^c) + T_F^{t+\Delta t}(j) \left(\frac{M_F C_{pF}}{S_F \Delta t} + h_{ab-F}^c + \frac{\dot{m} C_{pF}}{S_F \Delta t} \right) = \frac{M_F C_{pF}}{S_F \Delta t} (T_F^t(j)) + \frac{\dot{m} C_{pF}}{S_F \Delta t} (T_F^{t+\Delta t}(j-1)) \end{aligned} \quad (III.9)$$

Toutes ces équations discrétisées peuvent être mises en forme matricielle, tel que

$$A T = B \quad (III.10)$$

Plus explicitement,

$$a_{ij} T_j = b_i \quad (III.11)$$

T_j : Températures des différents éléments du capteur (vitre, absorbeur et fluide caloporteur).

a_{ij} : Coefficients des différentes températures.

b_i : Termes sources.

Donc, l'équation précédente peut être réécrite sous la forme suivante

$$[a_{ij}]\{T_j\} = \{b_i\} \quad (\text{III.12})$$

Comme il y a trois éléments du capteur, on se contente seulement de trois températures (vitre, absorbeur et fluide caloporteur) et par conséquent, l'équation précédente prend une forme plus précise ;

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_V \\ T_{ab} \\ T_F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Tous les éléments de la matrice et ceux du vecteur-source sont définis ci-dessous ;

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{M_V C_{pV}}{S_V \Delta t} + h_{V-a}^c + h_{V-s}^r + h_{ab-v}^c + h_{ab-v}^r \\ a_{12} &= -(h_{ab-v}^c + h_{ab-v}^r) \\ a_{13} &= 0 \\ a_{21} &= -(h_{ab-v}^c + h_{ab-v}^r) \\ a_{22} &= \left(\frac{M_{ab} C_{pab}}{S_{ab} \Delta t} + h_{ab-F}^c + h_{ab-v}^c + h_{ab-v}^r \right) \\ a_{23} &= -(h_{ab-F}^c) \\ a_{31} &= 0 \\ a_{32} &= -(h_{ab-F}^c) \\ a_{33} &= \left(\frac{M_F C_{pF}}{S_F \Delta t} + h_{ab-F}^c + \frac{\dot{m} C_{pF}}{S_F \Delta t} \right) \\ b_1 &= \alpha_V G^{t+\Delta t} + h_{V-a}^c (T_a^{t+\Delta t}) + h_{V-s}^r (T_S^{t+\Delta t}) + \frac{M_V C_{pV}}{S_V \Delta t} (T_V^t(j)) \\ b_2 &= \tau_V \alpha_{ab} G^{t+\Delta t} + \frac{M_{ab} C_{pab}}{S_{ab} \Delta t} (T_{ab}^t(j)) \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

$$b_3 = \frac{M_F C_{pF}}{S_F \Delta t} (T_F^t(j)) + \frac{\dot{m} C_{pF}}{S_F \Delta t} (T_F^{t+\Delta t}(j-1))$$

III.3. Méthode de résolution

Ainsi, tous les éléments de la matrice et du vecteur sont bien définis.

Après avoir défini tous éléments du système d'équations II.30, il est impératif de le résoudre pour pouvoir déterminer les performances du capteur via la détermination des différentes températures.

Les différentes étapes de résolution mathématique peuvent être organisées en un organigramme.

III.4. Méthode résolution

Le système d'équations II. peut être résolu par plusieurs méthodes telles que la méthode de Gauss-Seidel, méthode de Newton, méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 ou la méthode de la matrice inverse.

Comme la méthode de Gauss-Seidel est largement utilisée dans ce domaine, donc on préfère de l'utiliser.

III.4.1. Méthode de Gauss-Seidel

Pour résoudre un problème mathématique, la solution analytique n'est pas toujours facile à obtenir, donc on doit recourir à une méthode numérique. Parmi les méthodes numériques les plus utilisées dans le domaine de calcul des distillateurs est la méthode de Gauss Seidel comme il a été mentionné plus haut.

III.4.1.1. Principe de la méthode de Gauss-Seidel

On veut résoudre le système linéaire suivant

$$A \times T = B \quad (\text{III.15})$$

Où

A: est une matrice carrée d'ordre $n \times n$

B: est la matrice colonne du deuxième membre d'ordre n .

T: est le vecteur des inconnus.

La matrice A peut se mettre sous la forme

$$A = M - N \quad (\text{III.16})$$

Où

$$M = D - L \tag{III.17}$$

$$N = U \tag{III.18}$$

Avec

D: matrice diagonale

L: matrice inférieure

U: matrice supérieure

Alors le système (B.1) peut s'écrire :

$$(M-N) \times T = B \tag{III.19}$$

Dans la méthode de Gauss-Seidel, on réécrit (4.5) à partir d'un vecteur initial $T^{(0)}$, de la manière suivante:

$$T^{(1)} = (D-L)^{-1} \times U \times T^{(0)} + (D-L)^{-1} \times B \tag{III.20}$$

Comme l'inverse de $(D - L)$ peut être compliqué à calculer, on préfère écrire le système comme suit:

$$(D-L) \times T^{(1)} = U \times T^{(0)} + B \tag{III.21}$$

Soit encore

$$D \times T^{(1)} = L \times T^{(1)} + U \times T^{(0)} + B \tag{III.22}$$

Où

$$T^{(1)} = D^{-1} \times L \times T^{(1)} + D^{-1} \times U \times T^{(0)} + D^{-1} \times B \tag{III.23}$$

Ce qui est équivalent à:

$$T = D^{-1} \times L \times T + D^{-1} \times U \times T_p + D^{-1} \times B \tag{III.24}$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient

$$T_1 = (b_1 - a_{12} \times T_2 - a_{13} \times T_3 - \dots - a_{1n} \times T_n) / a_{11}$$

$$T_2 = (b_2 - a_{21} \times T_1 - a_{23} \times T_3 - \dots - a_{2n} \times T_n) / a_{22}$$

.....

$$T_n = (b_n - a_{n1} \times T_1 - a_{n2} \times T_2 - \dots - a_{nn-1} \times T_{n-1}) / a_{nn}$$

III.4.2. Conditions de convergence

Le système d'équations converge si

- $|T_i - T_{pi}| < \text{eps}$ (III.25)
- $\frac{|T_i - T_{pi}|}{|T_i|} < \text{eps}$ (III.26)

Ou bien

- $\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{pi})^2} < \text{eps}$ (III.27)

III.5. Principe de simulation en régime transitoire**III.5.1. La première étape :**

L'entrée des données et calcul des constantes.

III.5.2. La deuxième étape :

Le calcul des différents échanges thermiques indépendants de la température, qui sont :

Les coefficients d'échange par conduction entre les deux faces de la vitre, les deux faces de l'isolant, entre l'absorbeur et l'isolant ainsi que le coefficient d'échange convectif entre le capteur et le vent.

III.5.3. La troisième étape :

On suppose qu'initialement les températures des différents composants du capteur sont à la température ambiante à l'exception des températures de l'absorbeur et du fluide caloporteur qui sont à des températures légèrement supérieures, et on calcule pour les températures initiales :

III.5.3.1. Les propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur à savoir :

- La masse volumique.
- La conductivité thermique.
- La viscosité cinématique.
- La chaleur massique.
- Le nombre de Prandtl.

III.5.3.2. Les coefficients d'échange thermique, à savoir :

- Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste.
- Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur.

- Le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'absorbeur.
- Le coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.
- Le coefficient d'échange par convection entre le fluide caloporteur et l'isolant.

Résolution du système d'équations par la méthode de Gauss-Seidel.

III.5.4. La quatrième étape :

Le calcul du rendement instantané du capteur.

Le programme principal a été développé en langage Fortran 90.

CHAPITR IV

RESULTATS ET DISCUSSION
RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats et discussion

Le jour du 21/04/2018 est choisi d'une façon aléatoire, comme les données métrologiques de cette journée sont disponibles, on essaye alors de présenter les variations de l'irradiation solaire, de la température ambiante et la vitesse du vent.

Le code établi a permis de déterminer les variations temporelles des températures de l'absorbeur, du fluide caloporteur traversant le capteur solaire et enfin la variation de la température du vitre.

IV.1. Irradiation solaire

L'irradiation solaire est sensible à la variation du temps, elle augmente pendant la phase matinale jusqu'à midi, puis elle commence à diminuer pendant l'après midi. Ceci est bien conforme avec la théorie.

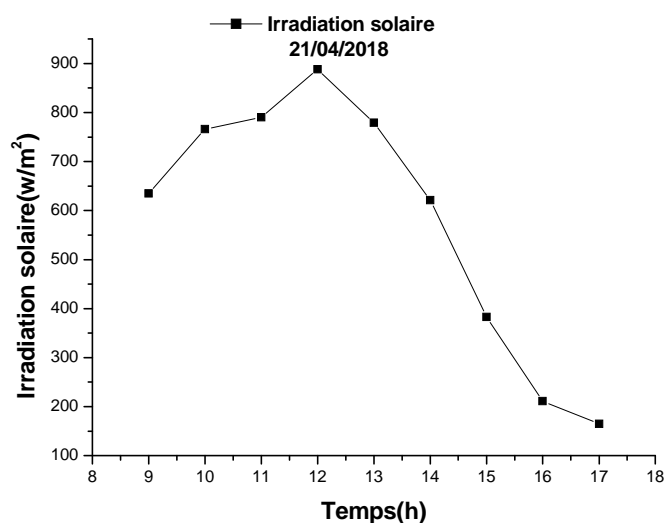


Fig. IV. 01 : Irradiation solaire 21/04/2018.

IV.2. Température ambiante

La variation de la température ambiante en fonction du temps est représenté sur la Fig. IV.02, on distingue qu'elle a augmenté de 9 heure jusqu'à 15 heure, puis elle a diminué jusqu'à 17 heure.

Pendant cette journée, la meilleure période de fonctionnement du capteur est située entre 13h et 17h, où la température ambiante a pris des valeurs plus élevées.

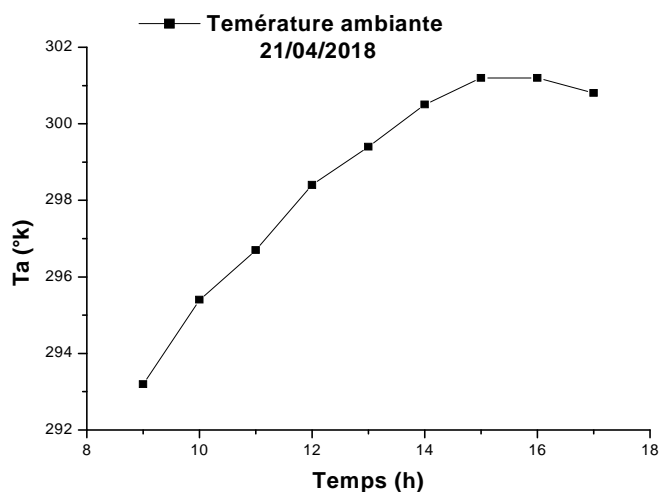


Figure IV.02 : Température ambiante 21/04/2018.

IV.3. Vitesse du vent

La variation de la vitesse du vent pendant la journée considérée est représentée en fonction du temps. Cette variation est presque aléatoire, en effet, elle diminue et puis elle augmente, ce qui influe sur les performances du capteur.

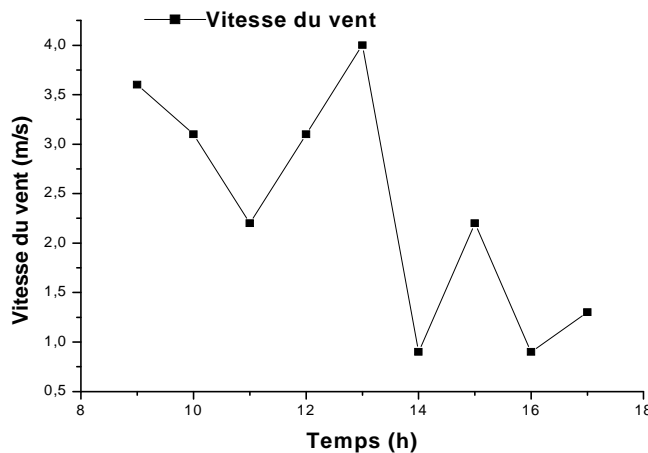


Fig. IV. 03 : Vitesse du vent 21/04/2018.

IV.4. Température de l'absorbeur

La température de l'absorbeur en fonction du temps est représentée sur la Fig. IV. 04. En effet, elle a augmenté de plus en plus durant une partie importante de la journée considérée, mais à la fin de la journée, elle a commencé à rechuter.

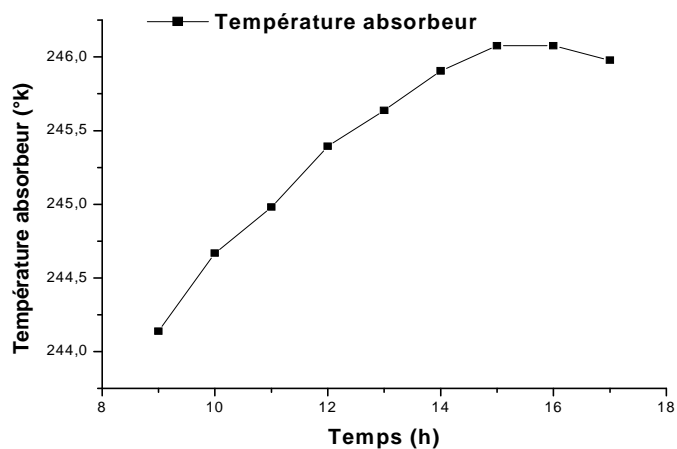


Fig. IV. 04 : Température absorbeur 21/04/2018.

IV.5. Température du fluide caloporteur

La température du fluide caloporteur en fonction du temps est représentée sur la Fig. IV. 05. En effet, elle a augmenté progressivement durant une partie importante de la journée considérée, mais à la fin de la journée, elle a commencé à rechuter.

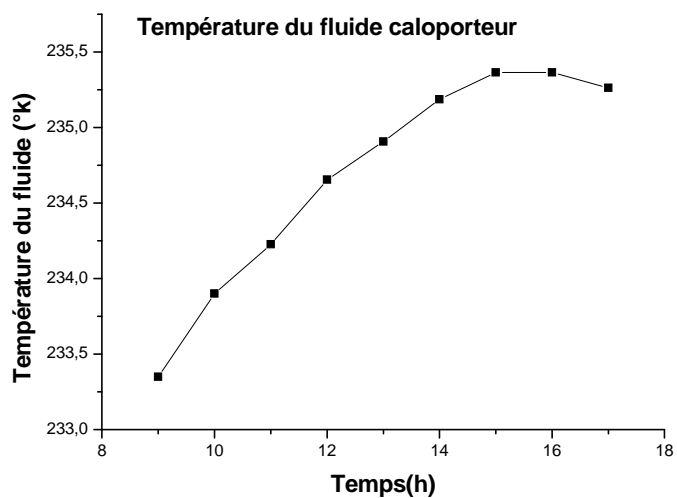


Fig. IV.05 : Température du fluide caloporteur 21/04/2018.

IV.6. Température de la vitre

La température du fluide caloporteur en fonction du temps est représentée sur la Fig. IV. 06. En effet, elle a augmenté progressivement durant une partie importante de la journée considérée, mais à la fin de la journée, elle a commencé à rechuter.

En conclusion, les températures de l'absorbeur, du fluide caloporteur et celle de la vitre varient dans le même sens et d'une façon similaire.

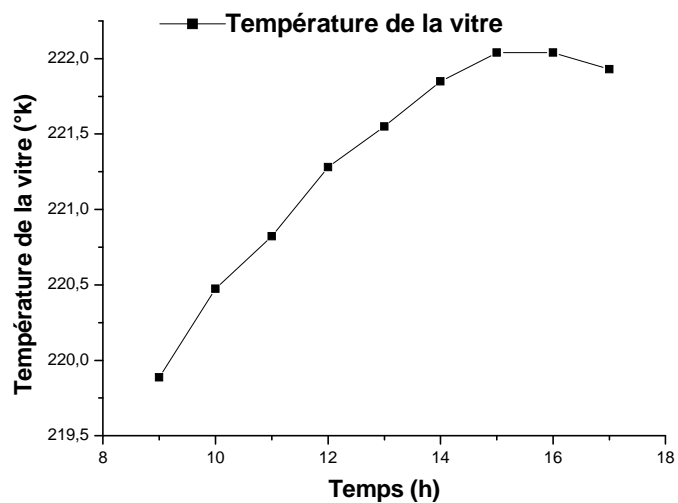


Fig. IV.06 : Température de la vitre 21/04/2018.

**CONCLUSION
GENERALE**

CONCLUSION GENERALE

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable, gratuite et disponible dans toute la nature avec des taux de radiation liés intimement à l'endroit à ensoleiller.

Parmi ses utilisations de cette énergie solaire, le séchage que l'homme utilisait depuis l'Antiquité.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important surtout dans tout le territoire national et surtout dans le sud.

Cette énergie est largement suffisante à la demande énergétique en séchage des produits agroalimentaires.

Une étude numérique du comportement thermique d'un capteur solaire plan a été menée en introduisant des mesures de l'irradiation solaire, de la température ambiante et la vitesse du vent.

Les températures de la vitre, du fluide caloporteur et celle de l'absorbeur ont été déterminées et représentées.

Références

- [1] S. BABU SASI KUMAR AND M. CHINNAPANDIAN, “ The performance study of a solar flat plate type air collector with natural and forced convection”, Journal of Industrial Pollution Control 33(2) (2017) pp 1155-1162. India.
- [2] A. Ahmed-SAID, « Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans à Air: Application au Séchage de l'oignon Jaune et du Hareng », Rev. Energ. Ren. Vol.4, 2001.
- [3] A. LABED, « Performances thermiques et pertes de charges de différentes configurations de capteurs solaires plans à air Etude expérimentale dans la région de Biskra, Algérie », Revue des Energies Renouvelables Vol. 18 N°2 209 – 216, 2015.
- [4] K. AOUES, « Amélioration des performances thermiques d’un capteur solaire plan à air: Etude expérimentale dans la région de Biskra », Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 237 – 248 237, 2009.
- [5] S. OUDJEDI, « Etude paramétrique d’un capteur solaire plan à air destiné au séchage », Revue des Energies Renouvelables SMSTS’08 Alger 255 – 266 255, 2008.
- [6] D. SEMMAR, « Etude et Réalisation d’un Capteur Solaire à Air », Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique 33 – 38, 1998.
- [7] O.SOTEHI, « Modes de conversion de l’énergie solaire (Conversions photothermique et photovoltaïque) et leurs utilisations dans l’habitat », université des frères MENTOURI Constantine 1, 04/06/2018.
- [8] M. KHALED, « Conception et réalisation d’un concentrateur sphérique », mémoire de magister, Constantine, 2008.
- [9] Joly Jean-Pierre, « Histoire mondiale de l’énergie - Solaire thermique et photovoltaïque: une brève histoire », Encyclopédie de l’énergie, 2019.
- [10] Bc. Monika Kokrdová, « L’ENERGIE SOLAIRE », mémoire magister, République tchèque, 2011.
- [11] Blaise Meo, « l’énergie solaire », <https://www.geo.fr>, France, 09/04/2012
- [12] A. Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes. », thèses doctorat, Mostaganem, 2017.

Références

- [13] Géraldine Marcheteau, « solaire thermodynamique : fonctionnement et types de centrales », , <https://www.lenergiesoutcompris.fr>, 2017
- [14] A. OUDRANE, « Contribution à la Modélisation et au Développement des Systèmes de Chauffage Solaire à Usage Individuel », thèses, Oran, 2018.
- [15] Emmanuel Gallay, « ÉNERGIE SOLAIRE : LES AVANTAGES ET LES INCONVÉNIENTS », <https://www.idelecplus.com>, 25\06\2019.
- [16] Ministère de L'énergie, <https://www.energy.gov.dz> à revoir
- [17] SADI MOHAMMED EL AMINE, HAMLAT ZOHRA, « L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV»,2013-2014
- [18] Château Bertrand, « Usages de l'énergie - Les besoins d'énergie », <https://www.encyclopedie-energie.org>, 2015.
- [19]Z. KHADRAOUI, « Etude d'une centrale solaire thermique », mémoire magister, Annaba, 2017.
- [20] 19 Décembre 2019, <https://youmatter.world>
- [21] Par La rédaction - Publié le 23/11/2018, <https://www.geo.fr>
- [22] Larousse 2006, <https://www.larousse.fr>
- [23] Par WEBMASTER, le 30/08/2010, <http://www.univers-astronomie.fr>
- [24] NAIM Hocine, « Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique », thèses, Oran, 2016.
- [25] Dr. OUDRANE Abdellatif, Pr. Aour BENAOUMEUR, Pr. HAMOUDA Masaoud « Étude et Analyse du Gisement Solaire Pour une Région Désertique : Type Adrar », Communication Science & Technology N°21. January 2019.
- [26] SAAD Arezki, DAMOUS Hakim, « Etude et conception d'un chauffe-eau solaire », mémoire magister, Tizi-Ouzou, 2017/2018.
- [27] R. YAICHE, « Logiciel de calcul des paramètres astronomiques à l'usage des installations solaires », Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen 343 – 348, 2007.
- [28] : NOUN MOHAMED SEDIK « Etude des paramètres impactant sur le rendement d'un capteur solaire » Annaba, 2018.

Références

- [29] Mor Diarra NDIAYE, « Optimisation d'un capteur solaire double passe à air et estimation des échanges de chaleur paroi-fluide », , thèse, France, 2019.
- [30] I.TABET « Etude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire », Thèse, Constantine, 2016.
- [31] BEMER, C., Durst, F., Mc Eligot, « Numerical study of fluid flow and heat transfer in a parallel plate channel with baffles », Journal of Heat Transfer, pp. 106-743, 22/12/2015.
- [32] AGHILAS BRAHIMI, « Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau », France, 2018.
- [33] Chafika ZIDANI, « Conception et modélisation des systèmes photothermiques. Applications aux systèmes photothermiques alimentés par fibres optiques », TLEMEN, Déc 2012
- [34] Ecrit par Théo, « Fonctionnement d'un panneau solaire thermique », <https://www.hellowatt.fr>, 2017.
- [35] M. SANDALI, « Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux », Tlemcen, 2014.
- [36] AUMPORN Orawan, « Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase », France, 2017.

Résumé

Une revue bibliographique sur le séchage solaire, les séchoirs solaires et le produit à sécher est faite. Des mesures de l'irradiation solaire, de la température ambiante et de la vitesse du vent ont été prises comme données pour mettre en marche un code de calcul élaboré en Fortran. Les résultats obtenus ont montré que les variations des températures de la vitre, du fluide caloporteur et celle de l'absorbeur en régime transitoire sont bien conformes avec la théorie.

Mots clés : capteur, séchoir, solaire, transitoire.

Abstract

A bibliographical review on solar drying, solar dryers and the product to be dried is made. Measurements of solar irradiation, ambient temperature and wind speed were taken as data to activate a computer code developed in Fortran. The results obtained showed that the variations in the temperatures of the glass, the heat transfer fluid and that of the absorber in transient conditions are well in accordance with the theory.

Keywords: collector, dryer, solar, transient.

ملخص

تم عمل مراجعة ببليوغرافية عن التجفيف الشمسي والمجففات الشمسية والمنتج المراد تجفيفه. تم أخذ قياسات الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة الحيوية وسرعة الرياح كمعطيات لتشغيل برنامج حساب بلغة فورتران. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن التغيرات في درجات حرارة الزجاج ، ومائع نقل الحرارة وكذا درجة حرارة الخاصة بالممتص في الظروف الانتقالية تتوافق جيداً مع الجانب النظري.

الكلمات المفتاحية: لوح ، مجفف ، شمسي ، انتقالي.