



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET

DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA

FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° d'ordre :/Master/2016.

Série :/GM/2016.

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de master

en Génie Mécanique

OPTION :

Mécanique Energétique

**Modélisation en régime transitoire des performances
d'un capteur solaire plan**

Par : **DERMECHE Chahinaz**

MERROUCHE Ahmed

Soutenu le : 29 / 06 /2016

Devant le jury composé de :

Président : Mr. MESSAI Tarek

Université Bouira

Rapporteur : Mr. DJELLAL Slimane

Université Bouira

Examineurs :

M^r. MOUSSAOUI Mohamed

Université Bouira

M^r. HAMIMID Saber

Université Bouira

Remerciements

Au terme de ce travail, nous devons remercier tout d'abord dieu qui nous a donné la force et le courage de suivre nos études et d'arriver à ce stade et à nos parents qui nous ont beaucoup soutenus pendant tous le long de notre parcours.

*Un grand merci à mon encadreur **Dr.DJELLAL Slimane Salim** qui nous a beaucoup aidé, soutenu et nous a permis d'arriver à ce niveau-là et pour ses excellents conseils et surtout pour son temps passé avec nous et sa patience, sans lui on n'aurait pas pu réaliser ce modeste travail et pour sa confiance en nous.*

Nous tenons aussi à remercier les membres de jury qui nous ont fait honneur d'examiner ce travail.

Enfin, nous renouvelons nos remerciements à ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour réaliser ce travail sans oublier les enseignants qui ont contribué à notre formation.



Dédicace

Merci mon dieu de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail :

A ma mère celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager à me donner l'aide et à me protéger.

A mon frère Abderrahmane à Iyad à Rafik et à mes sœurs, je vous souhaite un avenir plein de joie de bonheur de réussite et de sérénités, je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

A tous les membres de ma famille, petite et grande.

A mes chers ami(e)s : Dalila , Nadjlaa , Fatima , Asma , Latifa et à mon binôme Ahmed, à mes chers camarades de EN et GP . . .

A mon encadreur Mr DJELLAJ Slimane.

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

Chahinaz DERMECHE

Dédicace

Merci mon dieu de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail :

A ma mère celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager à me donner l'aide et à me protéger.

A mes frères, Mohamed « Hamida, Sami » et Md Arab mes fidèles compagnons les plus délicats de cette vie mystérieuse, je vous souhaite un avenir plein de joie de bonheur de réussite et de sérénités, je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

A tous les membres de ma famille, petite et grande.

A mes chers ami(e)s : Karim , Takfarinas , Aimad , Sami , Wahab , Hicham , Dalila et mon binôme Chahinaz , à mes chers camarades de EN, EM et GC. . .

A mon encadreur Mr DJELLAL Slimane.

Ahmed MERROUCHE

Remerciement	
Dédicace	
Nomenclature	
Listes des tableaux et des figures	
Introduction générale	01

Chapitre I : Energie solaire

I.1 Introduction	04
I.2 Historique et chronologie	04
I.3 Le soleil	05
I.3.1 Présentation générale	05
I.4 Mouvements de la Terre	06
I.4.1 Déclinaison	06
I.4.2 L'angle horaire ω	07
I.5 Le gisement solaire en Algérie	08
I.6 Le soleil comme un corps noir	09
I.6.1 Définition d'un corps noir	09
I.7 Le rayonnement solaire	09
I.8 Les différents modes d'utilisation de l'énergie solaire	11
I.8.1 L'énergie solaire photovoltaïque	11
I.8.2 L'énergie solaire passive	12
I.8.3 L'énergie solaire thermique	12
I.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire	12
I.9.1 Avantages	12
I.9.2 Inconvénients	13
I.10 Conclusion	13

Chapitre II : Capteur solaire

II.1 Introduction	14
II.2 Différents types de capteurs solaires	15
II.3 Classification des capteurs solaires	15
II.3.1 Le fluide de travail utilisé	15
II.3.2 L'orientation des capteurs	15
II.4 Le choix d'un capteur solaire	16

II.5	Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire.....	16
II.5.1	Les paramètres internes.....	16
II.5.2	Paramètres externes.....	17
II.6	Avantages et inconvénients d'un capteur solaire.....	17
II.6.1	Avantages.....	17
II.6.2	Inconvénients.....	17
II.7	Définition et principe d'un capteur solaire plan.....	18
II.8	Les types de capteurs plans.....	19
II.8.1	Capteurs plan à air.....	19
II.8.2	Capteur sous vide.....	19
II.8.3	Capteur plan à eau.....	20
II.9	Les modèles d'un capteur solaire plan.....	21
II.9.1	Capteurs plans non vitrés.....	21
II.9.2	Les capteurs à hautes performances.....	22
II.9.3	Capteurs plan vitrés.....	22
II.10	Principaux éléments constituant un capteur plan.....	23
II.10.1	Couverture.....	23
II.10.2	Absorbeur.....	25
II.10.3	Isolant.....	26
II.11	Les différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaires plans.....	27
II.11.1	Paramètres externes.....	27
II.11.2	Paramètres internes.....	28
II.12	Les avantages et les inconvénients d'un capteur plan.....	29
II.12.1	Avantage.....	29
II.12.2	Inconvénients.....	29
II.13	Conclusion.....	29

Chapitre III : Bilan thermique

III.1	Introduction.....	30
III.2	Rappels sur les transferts de chaleur.....	30
III.3	Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire plan.....	30
III.3.1	Conduction.....	31
III.3.2	Convection.....	32

III.3.3 Le rayonnement.....	34
III.4 Régime d'écoulement.....	35
III.5 Perte globale d'énergie.....	35
III.5.1 Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur.....	36
III.5.2 Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur.....	36
III.5.3 Coefficient de pertes thermiques latérales.....	36
III.6 Modélisation mathématique.....	37
III.6.1 Hypothèses.....	37
III.6.2 Modèle mathématique.....	37
III.7 Rendement du capteur.....	42
III.8 Conclusion.....	43

Chapitre IV : Calcul et Interprétation des résultats

IV.1 Introduction.....	44
IV.2 Environnement de programmation MATLAB.....	44
IV.3 Intégration numérique.....	44
IV.4 Cas d'étude.....	46
IV.5 Etapes de calcul.....	47
IV.6 L'organigramme général du calcul.....	49
IV.7 Résultats et Interprétation.....	51
IV.7.1 Rayonnement global.....	51
IV.7.2 Températures des différents composants du capteur.....	51
IV.7.3 Rendement du capteur.....	55
IV.7.3.1 Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur.....	55
IV.7.3.2 Effet du débit du fluide caloporteur.....	56
IV.7.3.3 Effet de la température ambiante.....	57
IV.7.3.4 Effet de rayonnement global.....	58
IV.8 Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	60
Références Bibliographie.....	61
Annexe.....	64
Résumé.....	67

Symbole	Désignation	Unité
A_c	Surface du capteur	$[m^2]$
C_p	Chaleur spécifique du fluide	$[J/kg\ K]$
D	Diamètre	$[m]$
D_{if}	Rayonnement diffus	$[W/m^2]$
g	Gravité	$[m/s^2]$
G	Rayonnement global	$[W/m^2]$
Gr	Nombre de Grashof	$[-]$
H	Coefficient de convection	$[w/m^2\ K]$
h_a	Hauteur du soleil	$[m]$
I	Rayonnement direct	$[W/m^2]$
J	Numéro du jour de l'année	$[Jours]$
L	La longueur de capteur	$[m]$
M	Débit massique	$[Kg/s]$
Nu	Nombre de Nusselt	$[-]$
Pr	Nombre de Prandtl	$[-]$
Q	Le flux de chaleur	$[W]$
Q_u	Le flux d'énergie utile	$[W]$
Ra	Nombre de Rayleigh	$[-]$
Re	Nombre de Reynolds	$[-]$
S	La surface	$[m^2]$
T	Température	$[K]$
T_p	La température de surface de solide	$[K]$
TSV	Temps solaire vrais	$[Heurs]$
T_∞	La température du fluide avant son contact avec le solide	$[K]$
U	Coefficient de pertes thermiques	$[W/m^2\ ^\circ C]$
U_m	Vitesse moyenne	$[m/s]$
V	Vitesse	$[m/s]$
V	Volumes	$[m^3]$
W	La largeur de capteur	$[m]$
x	Variable d'espace dans la direction du flux	$[m]$



Nomenclatureur

Lettres grecques	Désignation	Unité
α	Coefficient d'absorption	[-]
β	Inclinaison d'un plan par rapport à un plan Horizontal.	[°]
δ	La déclinaison	[°]
ε	Emissivité	[-]
η	Rendement d'un capteur Solaire	[-]
λ	Conductivité thermiques	[W / m °C]
μ	Viscosité dynamique	[Kg/m s]
ν	La viscosité cinématique	[m ² /s]
ρ	Masse volumique	[Kg/m ³]
σ	Coefficient de Stefan Boltzmann (5,667x10 ⁻⁸)	[W/m ² K ⁴]
τ	Coefficient de transmission	[-]
ω	L'angle horaire	[°]
φ	Coefficient de réflexion	[-]

Indices	Désignation
a	Air confiné
abs	Absorbeur
amb	Ambiant
av	Avant
arr	Arrière
c	Convection
cd	Conduction
ciel	Ciel
e	Epaisseur
éch	Echange
f	Fluide
i	Entrée
in	Intérieur
isol	Isolant
j	Sortie
lat	Latérale
max	Maximale
P	Pertes
r	Rayonnement
tube	Tube
V	Vitre
vent	Vent



Chapitre I

Figure I.1 : Illustration du soleil.....	05
Figure I.2 : Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil	06
Figure I.3 : La maximale au solstice d'été (21 Juin) et la minimale au solstice d'hiver (21 Décembre).....	07
Figure I.4 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen (kWh/m ² an).....	08
Figure I.5 : Spectre de rayonnement solaire	09
Figure I.6 : Rayonnement direct, diffus et global	10
Figure I.7 : Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque	11

Chapitre II

Figure II.1 : Installation utilisant les capteurs solaires.....	14
Figure II.2 : Illustration d'un capteur plan.....	18
Figure II.3 : Capteur a air.....	19
Figure II.4 : Capteur à vide.....	20
Figure II.5 : Capteur a eau.....	21
Figure II.6 : Capteurs solaires plans sans vitrage.....	21
Figure II.7 : Capteur plan vitré.....	22
Figure II.8 : Coupe schématique d'un capteur solaire plan.....	23

Chapitre III

Figure III.1 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan.....	31
Figure III.2 : Schéma du transfert de chaleur par conduction.....	32
Figure III.3 : Schéma du transfert de chaleur par convection.....	33
Figure III.4 : Schéma du transfert de chaleur radiatif.....	35
Figure III.5 : Mécanisme des échanges de chaleur détaillé.....	38
Figure III.6 : Echange thermique au niveau de la vitre.	38



Figure III.7 : Echange thermique au niveau de l'air confiné.....	39
Figure III.8 : Echange thermique au niveau de l'absorbeur.....	40
Figure III.9 : Echange thermique au niveau du fluide caloporteur.....	40

Chapitre IV

Figure IV.1 : Variation du flux solaire pour les solstices en fonction du temps.....	51
Figure IV.2 : Variations des températures dans le capteur solaire pendant le solstice d'hiver.....	52
Figure IV.3 : Variations des températures dans le capteur solaire pendant le solstice d'été.....	53
Figure IV.4 : Distribution simultanée de la température du fluide caloporteur selon la direction de l'écoulement (solstice d'hiver).....	54
Figure IV.5 : Distribution simultanée de la température du fluide caloporteur selon la direction de l'écoulement (solstice d'été).....	55
Figure IV.6 : Effet de la variation de la température du fluide à l'entrée sur le rendement.....	56
Figure IV.7 : Effet de la variation de débit du fluide caloporteur sur le rendement.....	57
Figure IV.8 : Effet de la variation de la Température ambiante sur le rendement.....	58
Figure IV.9 : Effet de la variation de rayonnement global sur le rendement.....	59



Chapitre I

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil.....	06
Tableau I.2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	08
Tableau I.3 : Répartition spectrale du rayonnement thermique.....	10

Chapitre II

Tableau II.1 : Taux de concentration et température du différent capteur.	16
Tableau II.2 : Quelques caractéristiques optiques des verres.	24
Tableau II.3 : Caractéristiques optiques des matériaux.	24
Tableau II.4 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.....	25
Tableau II.5 : Revêtements des surfaces d'absorbeur.....	26
Tableau II.6 : Propriétés des isolants.....	27

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Caractéristiques du capteur solaire plan	46
Tableau IV.2 : Les propriétés de l'air et de fluide caloporteur.....	47

Annexe

Tableau 1 : Caractéristiques thermophysiques des matériaux métalliques	64
Tableau 2 : Propriétés optiques de quelques surfaces sélectives.....	64
Tableau 3 : Propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes.....	65
Tableau 4 : Degré d'émissivité de quelques matériaux	65
Tableau 5 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants	66



La consommation énergétique mondiale ne cesse d'augmenter, la grande partie de cette énergie consommable provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon,.....etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement.

L'énergie a toujours constituée un enjeu vital pour l'homme et les sociétés humaines.

Les comportements humains sont fortement induits par la disponibilité ou la non disponibilité de l'énergie, par son abondance ou sa pénurie.

De ces comportements vont découler de nouveaux enjeux, en particulier pour l'environnement et les équilibres socio- économiques.

La prise de conscience de l'importance de ces enjeux (réchauffement climatique, épuisement des ressources, augmentation des coûts de la santé, ...) devrait, nous l'espérons, permettre de tendre vers une utilisation plus rationnelle de l'énergie, une optimisation des processus énergétiques que nous mettons en œuvre tous les jours.

L'Algérie grâce à sa situation géographique dispose d'un des gisements solaires 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 acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²/an au nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays.

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 à la suite de la signature du protocole de Kyoto, protocole qui prévoit notamment une baisse de 5.2% des émissions de gaz à effet de serre des pays riche sur la période 2002-2012 par rapport à 1990.

Les principaux avantages qui rendent cette source d'énergie renouvelable très intéressante sont les points suivantes :

- Energie gratuite.
- Disponibilité sur une grande partie du globe (Gisement solaire).
- Absence des risques d'épuisement (au moins à l'échelle humaine).
- Pas de rejets polluants.
- Pas de danger radioactif et déchets encombrants.

Parmi les énergies renouvelables, nous citons l'énergie solaire, une énergie exploitée depuis les millénaires.

Les techniques d'exploitation de cette ressource ont vu ces dernières années une mutation remarquable faisant intervenir une technologie de pointe, rendant ainsi les coûts d'exploitation de plus en plus attractifs, notamment dans la production l'énergie thermique.

En effet l'énergie thermique produit par voie solaire est une forme d'énergie très écologique sans émission de CO₂.

De ce fait substitution des charbons, gaz naturelle et autres réduisent sans aucun doute les effets désastreux des systèmes énergétiques classiques.

L'énergie solaire, elle est disponible partout à la surface du globe, en quantité égale dans l'année, et a un bon rendement grâce à la technologie actuelle, elle est de plus facile à exploiter, elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir.

L'énergie solaire est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique.

Cette transformation peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique).

Les systèmes solaires thermiques sont utilisés dans différentes applications solaires comme par exemple, le chauffage des locaux industriels ou à usage d'habitation, ainsi que dans la réfrigération solaire.

L'évolution rapide des procédés modernes d'utilisation de l'énergie solaire a conduit au développement de plusieurs types de systèmes de chauffe-eau solaire tel que les capteurs solaires plans, les capteurs à tube sous vide et les concentrateurs cylindro parabolique.

Dans cette étude, on s'intéresse particulièrement aux capteurs solaires plans à eau, ces derniers, transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par eau en écoulement dans le capteur.

L'intérêt de ce travail est l'étude des performances des capteurs solaires plans à eau en régime transitoire et de fournir les informations les plus pertinentes en terme de conception, d'évaluation et d'installation, pour ce faire, un modèle mathématique décrivant tous les modes de transferts thermiques impliqués a été établi.

Il est complété par une analyse de l'influence de quelques paramètres sur le rendement du capteur solaire plan.

A cet effet, un système d'équation régissant le comportement thermique du capteur et les différents coefficients d'échange thermique est établi.

Une simulation mathématique nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion, en plus d'une conclusion générale.

Le présent travail comporte quatre chapitres.

➤ Le premier chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.

➤ Lors du second chapitre, nous procéderons à l'étude théorique des capteurs solaires et notamment le capteur solaire plan à eau en régime transitoire et ses différents composants.

➤ Le troisième chapitre est consacré à l'étude des différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur solaire plan et les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système en régime transitoire.

➤ La simulation numérique du comportement du système en utilisant la méthode de Runge Kutta d'ordre 4 avec MATLAB ainsi que les principaux résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.

Une introduction générale, une conclusion générale et une annexe se rapportant au travail, complètent ce mémoire.

I.1 Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et abondante qui peut nous aider à combler une bonne partie de nos besoins en énergie.

Une bonne partie de cette énergie solaire peut être donc utilisée pour produire de la chaleur.

Dans ce cas, on parle de système solaire thermique.

La production d'eau chaude sanitaire est parmi les applications de l'utilisation de cette énergie renouvelable.

De nombreuses recherches ont été effectuées ces dernières années afin d'améliorer les performances énergétiques des installations solaires. [1]

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'homme. [2]

I.2 Historique et chronologie

L'utilisation de l'énergie solaire remonte à l'Antiquité, par exemple, les Grecs allumaient la flamme olympique grâce à un système de miroirs concentrant les rayons du Soleil.

Au XVII^e siècle, François Vilette, opticien au palais de Versailles, conçoit un miroir en bronze (appelé miroir ardent) d'un mètre de diamètre, grâce auquel il fait des démonstrations de fusion d'objets.

En 1747, Georges-Louis de Buffon expérimente un miroir qui concentre la lumière du soleil en un seul point focal. Il arrive à faire fondre un morceau d'argent (la température de fusion de l'argent est de 1 044 °C).

À la fin du XVIII^e siècle, grâce à une lentille à liquide qui concentre les rayons solaires, Antoine Lavoisier construit un four solaire qui atteint la température de 1 800 °C.

Dans les années 1780, Horace-Bénédict de Saussure invente un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du soleil qu'il nomme « hélio thermomètre » ; cet instrument utilise l'effet de serre obtenu par un vitrage placé au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé ; il crée ainsi un capteur solaire thermique à basse température.

En Novembre 2015 une « Alliance internationale pour l'énergie solaire » ou (ISA) « International solar alliance » a été créée.

Cette alliance doit réunir les États disposant d'importantes ressources solaires afin de mieux coordonner le développement de leur exploitation (thermique et photovoltaïque) via des actions de formation.

I.3 Le soleil

Le soleil est une étoile résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité.

Ce type de nuage est essentiellement composé presque totalement d'hydrogène, d'hélium, et dans une moindre mesure de carbone, d'azote et d'autres éléments. [3]

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent.

Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ($E=mc^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.10^{22} KW.

La terre étant à une distance de 150.10^6 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de $1,8.10^{14}$ KW. [3]

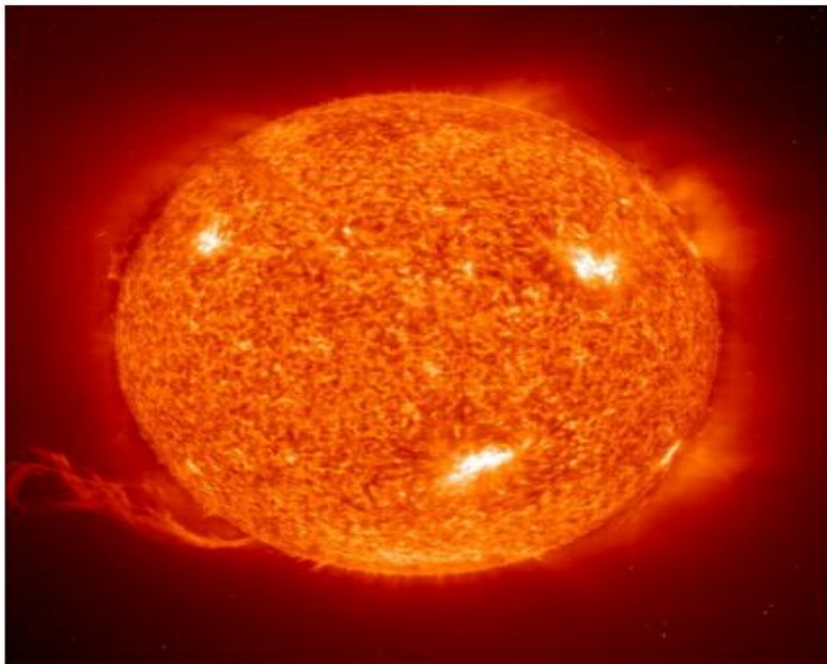


Figure I.1 : Illustration du soleil.

I.3.1 Présentation générale

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus [4], [5].

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau I.1 :

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	2.10^{30}
Surface (km²)	$6,09.10^{12}$
Volume (km³)	$1,41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2,5.10^{17}$

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil.

I.4 Mouvements de la Terre

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (la déclinaison et horaire)

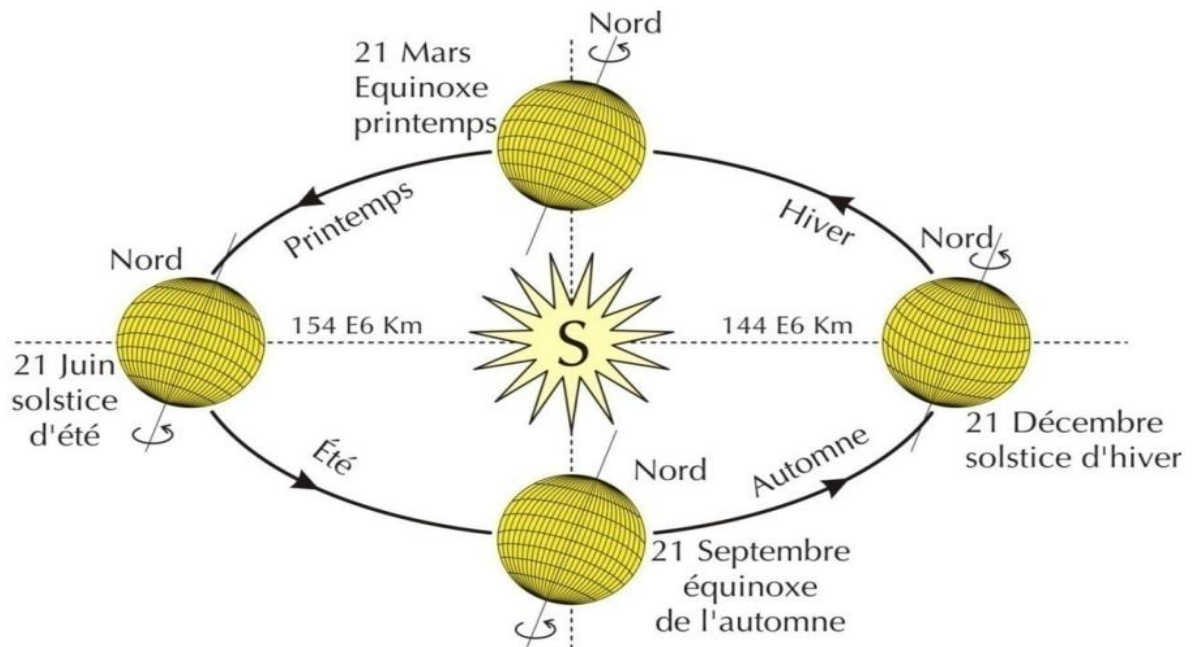


Figure I.2 : Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil.[6]

I.4.1 Déclinaison

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers.

Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149\,675.10^6$ km.

L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de $23,27^\circ$ par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre).

On appelle déclinaison δ l'angle forme par l'axe Terre soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année.

La déclinaison vaut donc $+23,45^\circ$ au solstice d'été, $-23,45^\circ$ au solstice d'hiver, et nulle aux équinoxes. [7]

Plusieurs relations existent pour calculer la déclinaison, on peut calculer sa valeur, à toute époque de l'année par la formule :

$$\delta = 23.45^\circ \sin [0.980(J + 284)] \tag{I.1}$$

Avec :

J : Numéro du jour de l'année.

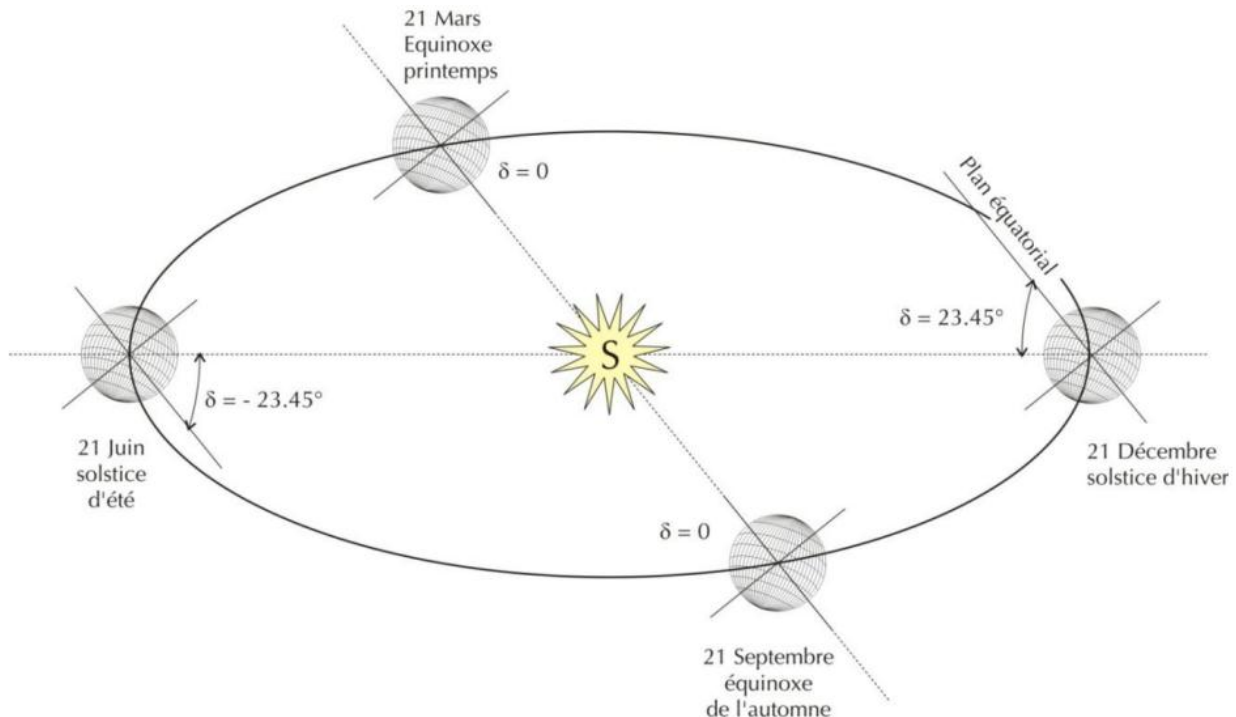


Figure I.3 : La maximale au solstice d'été (21 Juin) et la minimale au solstice d'hiver (21 Décembre).

I.4.2 L'angle horaire ω

C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel.

L'angle horaire est de 0 à midi qui est donne par la formule suivante :

$$\omega = 15^\circ (\text{TSV} - 12) \text{ [degré]} \tag{I.2}$$

TSV : temps solaire vrai.

I.5 Le gisement solaire 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. [8]

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.3 :

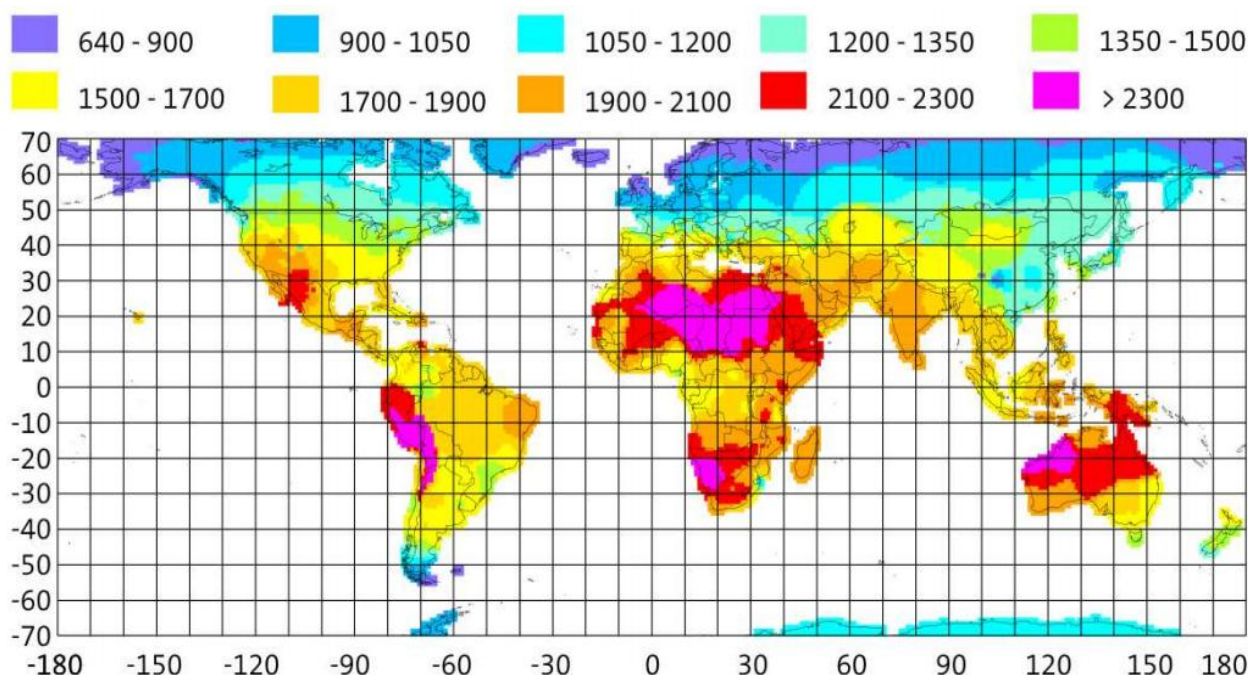


Figure I.4 : Carte du monde de l'enseillent moyen (kWh/m² an).

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.2 selon l'enseillement reçu annuellement [9] :

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'enseillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² an)	1700	1900	2650

Tableau I.2 : Enseillement reçu en Algérie par régions climatiques.

I.6 Le soleil comme un corps noir

I.6.1 Définition d'un corps noir

Un corps noir par définition est un corps idéal parfaitement absorbant pour la lumière et parfaitement émissif pour le rayonnement thermique.

On dit que la radiation électromagnétique absorbée par les parois de l'enceinte est en équilibre thermique.

Tous les photons sont absorbés en permanence quelle que soit leur longueur d'onde et les photons réémis ont une distribution spectrale qui ne dépend que de la température des parois du corps noir.

Il obéit à la fois aux lois de Lambert, de Stefan et de Wien. [10]

I.7 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2µm) à l'infrarouge (2.5µm).

L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m² dans l'espace hors atmosphère terrestre.

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre à la suite de phénomène d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières.

Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux prévenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. [11]

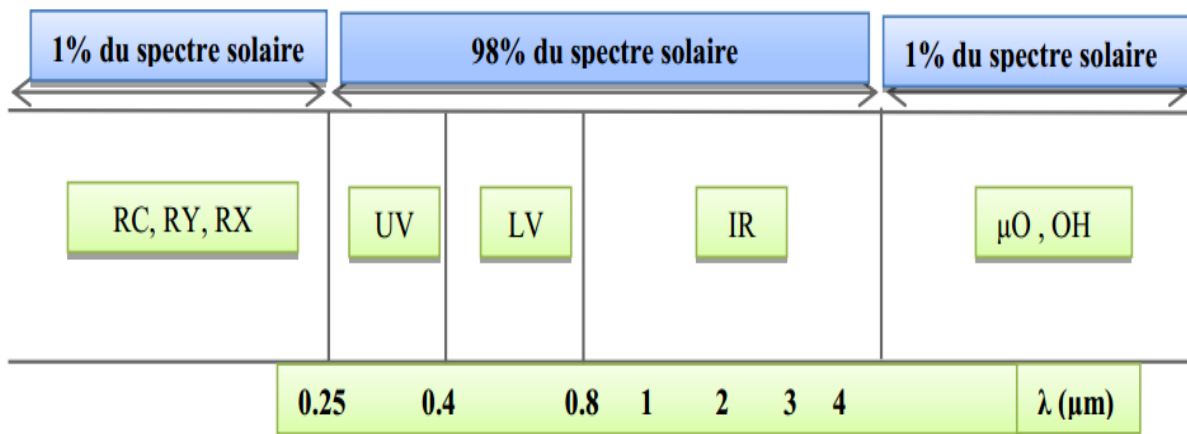


Figure I.5 : Spectre de rayonnement solaire. [12]

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau I.3 : [13]

Longueur d'onde (µm)	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie (W/m ²)	87	656	623

Tableau I.3 : Répartition spectrale du rayonnement thermique.

Ce rayonnement peut être distingué sous forme de 3 flux : global, direct, diffus.

- Le rayonnement solaire global : est le rayonnement émis par le soleil incident sur une surface donnée.
- Le rayonnement direct : est le rayonnement solaire incident sur un plan donné et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire.
- Le rayonnement diffus : est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct.

Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice. [14]

Les ondes arrivant sur terre couvrent un domaine spectral allant du rayon X (Ultraviolet=200-400nm) aux infrarouges de basses longueurs d'onde (800-2400nm).

Les trois quantités, le rayonnement direct noté I, le rayonnement diffus D_{if}, et le rayonnement global G, sont reliés par la relation suivante :

$$G = I \cdot \sin(h_a) + D_{if} \tag{I.3}$$

Où h_a est la hauteur du soleil.

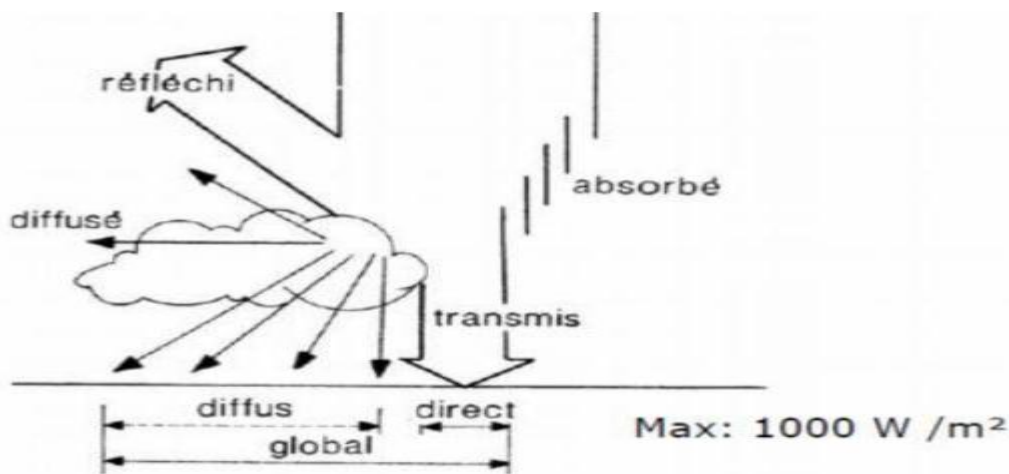


Figure I.6 : Rayonnement direct, diffus et global.

I.8 Les différents modes d'utilisation de l'énergie solaire

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées.

On peut distinguer le solaire passif, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique.

I.8.1 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore.

Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -) pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bord.

Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium.

Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique. [15]

Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique, l'effet photovoltaïque découvert par Antoine Becquerel en 1839, ou la technologie associée.

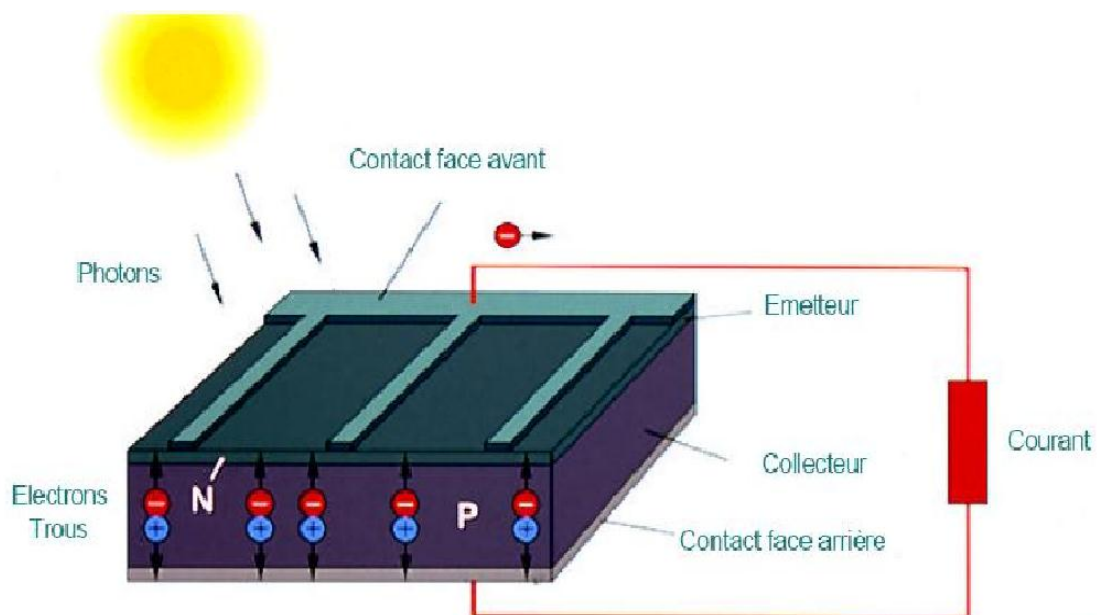


Figure.I.7 : Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque.

I.8.2 L'énergie solaire passive

La plus ancienne utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire passive.

Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du Soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, orientation vers le sud, surfaces vitrées, etc...).

L'isolation thermique joue un rôle important pour optimiser la proportion de l'apport solaire passif dans le chauffage et l'éclairage d'un bâtiment.

Dans une maison solaire passive, l'apport solaire passif permet de faire des économies d'énergies importantes.

Dans les bâtiments dont la conception est dite bioclimatique, l'énergie solaire passive permet aussi de chauffer tout ou partie d'un bâtiment pour un coût proportionnel quasi nul.

L'énergie solaire passive, capable de fonctionner seule sans apport d'énergie extérieure. [16]

I.8.3 L'énergie solaire thermique

Le solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire, il se décline de différentes façons :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires.
- En usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire et centrales solaires thermodynamiques.

I.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire

I.9.1 Avantages [17]

- L'énergie solaire est propre.
- Elle ne dégage pas de gaz à effet de serre.
- Il ne produit pas de déchets toxiques.
- Elle adopte une énergie inépuisable et pratiquement gratuite.
- Elle peut être revendue à différents fournisseurs d'énergie.

I.9.2 Inconvénients

- L'investissement est couteux.
- Le réseau de distribution du matériel à mettre en place.
- Le nombre de personnes a formé pour l'installation.
- Le manque d'infrastructure et d'installation permettant de distribue et d'utiliser l'électricité solaire produite.
- Cette source d'énergie ne produit rien pendant la nuit.

I.10 Conclusion

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

L'Algérie est l'un des pays de monde qui dispose d'un potentiel solaire exceptionnel avec plus de 3000 heures/an d'ensoleillement et une superficie de 2381745 Km² a décidé de mettre en place une stratégie pour développer différentes applications de l'énergie solaire.

Cependant il y a un certain nombre de facteurs rendent son exploitation difficile, principalement l'intermittence du rayonnement solaire et sa variation journalière et même suivant l'année.

II.1 Introduction

Un panneau solaire ou capteur solaire est un échangeur de chaleur qui fonctionne entre une source radiante (le soleil) et un fluide, destiné à récupérer une partie de l'énergie du rayonnement solaire pour la convertir en une forme d'énergie calorifique utilisable par l'homme : électrique ou thermique.

Selon la conversion d'énergie on distingue deux catégories de capteurs solaires : [18]

- Capteurs solaires thermiques.
- Capteurs solaires photovoltaïques.

Dans notre travail on s'intéressera uniquement au capteur thermique (capteur plan à eau)

Les panneaux solaires thermiques, appelés capteurs solaires thermiques, convertissent la lumière en chaleur récupérée et utilisée sous forme d'eau chaude.

La chaleur collectée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur qui circule dans des canalisations qui servent à transporter la chaleur du capteur vers le point d'utilisation.

L'histoire des capteurs solaires à basse température remonte à Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) qui met en évidence l'effet de serre obtenu par un vitrage au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé.

Il faut cependant attendre 1910 pour voir apparaître les premiers chauffe-eau solaires en Californie. [19]

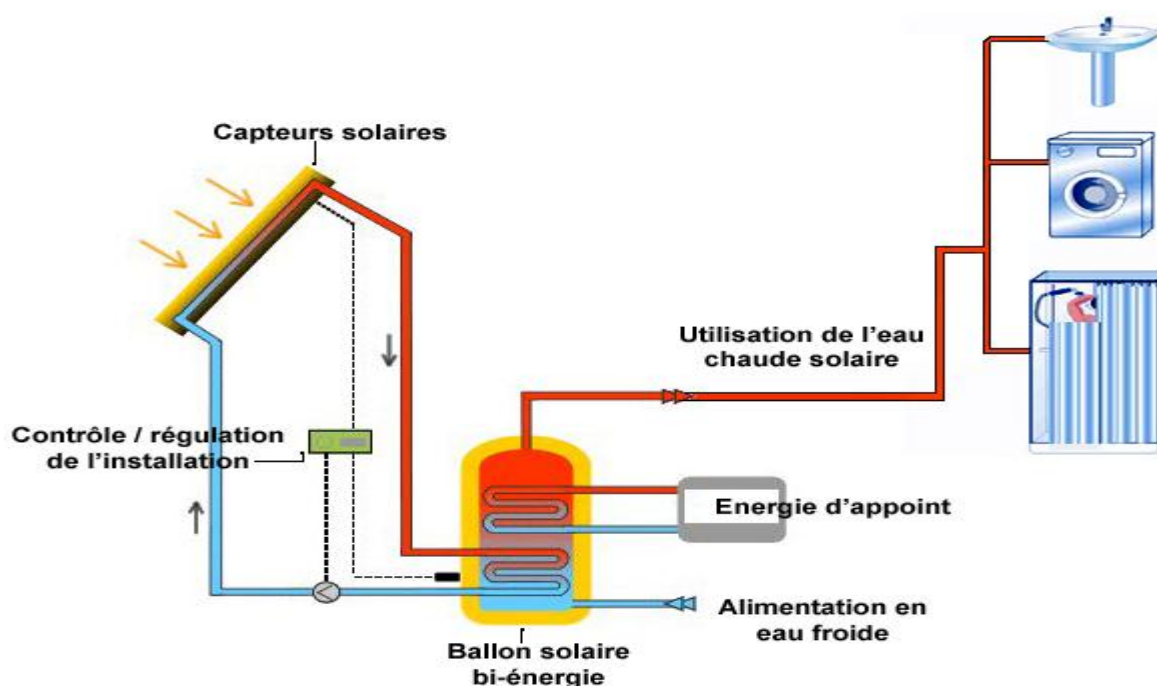


Figure II.1 : Installation utilisant les capteurs solaires.

II.2 Différents types de capteurs solaires

Il existe non seulement plusieurs manières de fournir de l'énergie solaire, mais également différentes méthodes pour capter l'énergie solaire provenant d'un rayonnement incident.

La liste ci-dessous présente les types les plus répandus des capteurs solaires : [17]

- Capteurs plans de types vitrés.
- Capteurs plans sans vitrage.
- Capteurs à plaque perforée sans vitrage.
- Capteurs solaires à passage retour.
- Capteurs solaires à concentration.
- Capteurs solaires à air.
- Capteurs solaires intégrés.
- Capteurs solaires à circulation de liquide.
- Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique.
- Systèmes de centrale à tour.
- Capteurs solaires fixes à concentration.
- Capteurs sous vide.

II.3 Classification des capteurs solaires

On peut classer les capteurs selon : [20]

II.3.1 Le fluide de travail utilisé

II.3.2 L'orientation des capteurs

Les capteurs solaires peuvent être :

- Des capteurs fixes, ces capteurs ne bougent pas dans la journée, ce qui est le cas des chauffe-eaux solaires domestiques qui présentent les propriétés suivantes :
 - La simplicité et la fiabilité.
 - Un faible entretien.
 - Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).
 - L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas très longtemps chaque jour à son maximum d'efficacité.
- Des capteurs à poursuite : le capteur solaire peut être muni d'un dispositif de guidage automatique dans la direction de provenance du flux lumineux, ce qui va améliorer le rendement du capteur.

II.4 Le choix d'un capteur solaire

Le choix d'un capteur solaire dépend de la température désirée de fluide caloporteur et des conditions climatiques pendant la période d'utilisation du système.

Les technologies les plus courantes sont présentées dont le tableau II.01 :

Type de collecteur	Ranger de température	Taux de concentration
Capteur plan (à air et à eau)	30 – 80	1
Capteur à vide	50 – 200	1
Capteur a parabole composé CPC	60 – 240	1 – 5
Capteur Fresnel	60 – 300	10 – 40
Capteur cylindro-parabolique	60 – 250	15 – 45
Capteur cylindrique	60 – 300	10 – 50
Capteur parabolique	100 – 500	100 – 1000
Centrales solaires à tour	150 – 2000	100 – 1500

Tableau II.1 : Taux de concentration et température du différent capteur. [21]

Donc, il existe deux grandes familles de capteurs solaires thermiques, les capteurs plans qu'ils exploitent directement les rayonnements solaires et les capteurs à concentration qu'ils utilisent un réflecteur pour concentrer les rayonnements solaires.

II.5 Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire

L'efficacité thermique du capteur solaire dépend fortement du matériel, de la forme, des dimensions, de la disposition du capteur et des conditions environnantes.

Tous ces facteurs peuvent être classés en deux catégories principales :

II.5.1 Les paramètres internes

- La vitre.
- L'absorbeur.
- Forme et diamètres des pipes.
- La circulation du fluide caloporteur.
- L'isolation.

- L'orientation et l'inclinaison du capteur.

II.5.2 Paramètres externes

- Obstacles.
- Rayonnement solaire.
- Température extérieure sèche.
- Vitesse du vent sur le capteur.

II.6 Avantages et inconvénients d'un capteur solaire

II.6.1 Avantages

Les capteurs solaires ont de nombreux avantages :

- Du point de vue écologique, ils produisent de l'énergie sans polluer l'environnement: aucun gaz à effet de serre rejeté et aucun déchet radioactif ne produit.
- Les panneaux solaires peuvent être la solution pour rendre autonomes les endroits isolés.
- Les panneaux solaires demandent très peu d'entretien et l'énergie est produite sans interventions de l'homme.
- Les panneaux solaires restent silencieux et non dérangeants pour les riverains voisins, ce qui n'est pas le cas de toutes les sources d'énergie.

II.6.2 Inconvénients

Mais ils présentent également quelques inconvénients :

- Un capteur solaire a une durée de vie de 25 ans environ, au-delà, les rendements diminuent rapidement.
- La production d'énergie est irrégulière, en effet, l'énergie solaire ne produit qu'en journée et en fonction de la météo et non en fonction des besoins énergétiques.
- Son coût est élevé à la fois celui des panneaux solaires mais également celui des installations nécessaires comme les moyens de stockage de l'énergie.
- La taille des installations nécessite de grandes superficies des panneaux solaires pour produire de l'énergie.

II.7 Définition et principe d'un capteur solaire plan

Le capteur solaire plan est tout système exposé au rayonnement solaire afin de le capter et de le transformer en énergie thermique et peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil. [22]

Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur et les pertes de chaleur périphérie du capteur. [23]

Ce système de captage a pour base l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine du visible et proche du l'infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre 0.3 et 3 μm), il traverse la vitre et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante.

L'absorbeur émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible (entre 4 et 30 μm).

Ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne par moitié vers la surface absorbante et par moitié vers l'extérieur.

Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur.

On distingue trois types de capteurs solaires plans : les capteurs à air, à eau et sous vide.



Figure II.2 : Illustration d'un capteur plan.

II.8 Les types de capteurs plans

II.8.1 Capteurs plans à air

Ils sont utilisés pour le chauffage direct de l'air, généralement pour le préchauffage de l'air neuf et lorsque la température désirée n'est pas très haute ($<70^{\circ}\text{C}$), car le rendement baisse fortement avec la hausse de la température de l'air caloporteur.

L'avantage de ces capteurs est leur faible coût ainsi que la faible complexité d'installation.

Des ailettes sont dessinées dans l'absorbeur pour augmenter le coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur (l'air) et l'absorbeur.

La figure II.3 présente les différents composants d'un capteur à air à une seule couverture du verre. [23]

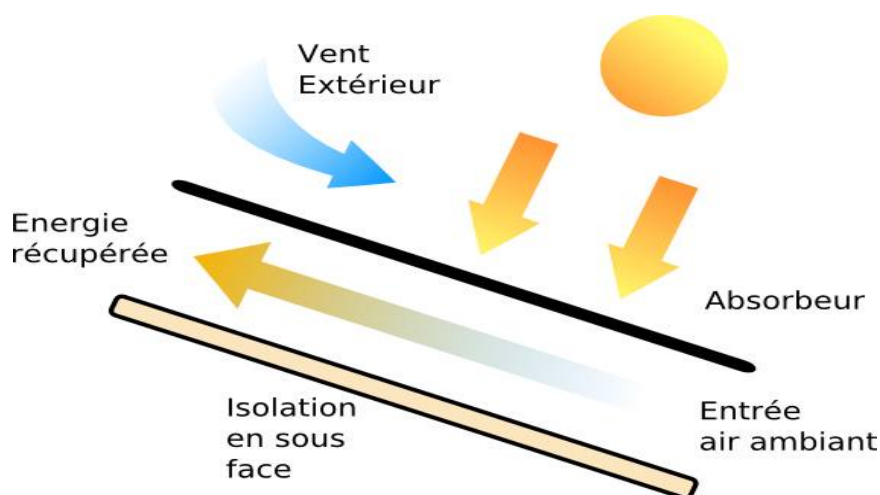


Figure II.3 : Capteur à air.

II.8.2 Capteur sous vide

Ces capteurs diffèrent dans leur conception car ils sont composés de plusieurs tubes en verre dans les quels règne un vide poussé, limitant les échanges convectifs entre l'absorbeur (placé à l'intérieur du tube) et le verre. [23]

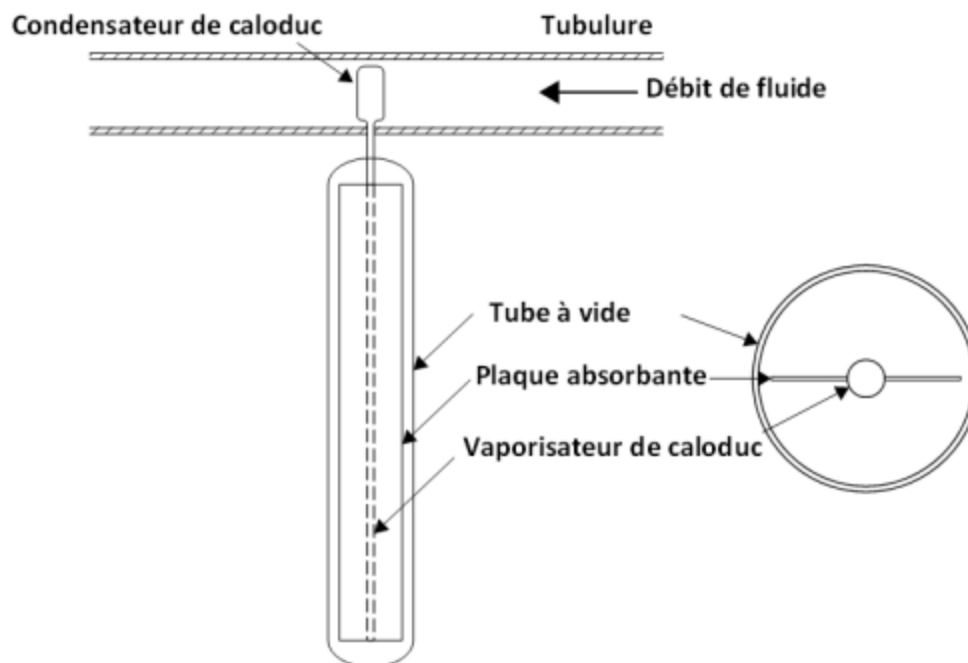


Figure II.4 : Capteur à vide.

II.8.3 Capteur plan à eau

Le capteur plan à eau est constitué d'une plaque de verre sous laquelle est situé des tuyaux contenant l'eau et de l'antigel.

Ce tuyau repose sur une plaque isolante (isolation thermique) peinte en noir afin d'avoir une absorption de l'énergie solaire maximale.

En effet, la couleur noire est la couleur qui absorbe de plus l'énergie solaire (le blanc étant celui qui absorbe le moins).

Le principe de ce capteur est bien connu par les agriculteurs : c'est le principe de l'effet de serre.

En effet, le capteur plan fonctionne donc comme une serre : le rayonnement solaire traverse le vitrage, il est absorbé par le revêtement noir qui s'échauffe, transmet sa chaleur au fluide (eau et antigel) et rayonne dans l'infrarouge (l'IR est piégé par le verre).

L'antigel est utilisé pour éviter le gel de l'eau pendant l'hiver.

Ces capteurs permettent de chauffer un liquide caloporteur (généralement un mélange eau glycol).

Ils sont utilisés généralement pour la production d'eau chaude sanitaire. [23]

Un absorbeur sélectif, ainsi qu'une vitre en verre technique permettent de garder un bon rendement avec des températures de l'ordre de 80°C.

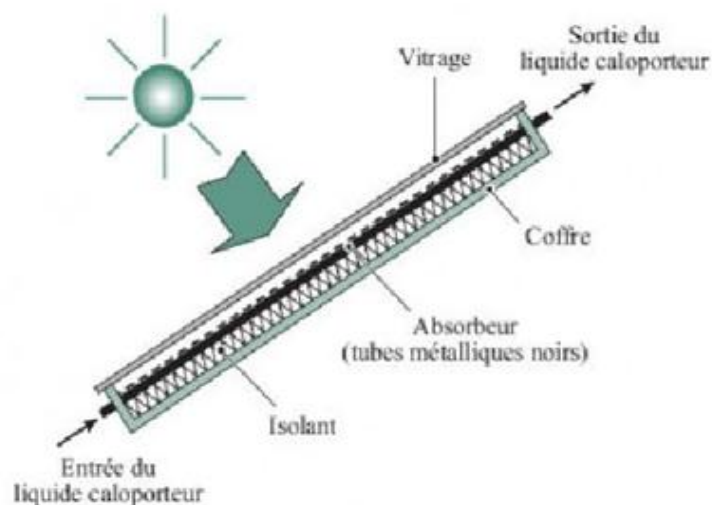


Figure II.5 : Capteur à eau.

II.9 Les modèles d'un capteur solaire plan

Il existe trois modèles de capteurs solaires plans :

II.9.1 Capteurs plans non vitrés

Ils sont utilisés pour la production d'eau chaude à basse température dans des conditions d'utilisation saisonnière (piscines, camping, etc.....) ces capteurs sont métalliques ou en matériaux polymères.

Ils se comportent comme des échangeurs de chaleur sur l'air ambiant, la température moyenne de fonctionnement : 25 à 40°C environ. [24]



Figure II.6 : Capteurs solaires plans sans vitrage. [25]

II.9.2 Les capteurs à hautes performances

Ils sont utilisés pour les applications de climatisation de locaux, pendant la saison hivernale, ils peuvent servir aussi au chauffage.

Ils sont constitués soit d'un revêtement sélectif, réalisé par dépôt chimique ou par traitement électrochimique de la surface permettant de réduire les pertes dans le capteur, ou absorbeur sous vide permettant de réduire les pertes par convection en plaçant l'absorbeur à l'intérieur d'une enceinte en verre dans laquelle un vide d'air a été fait.

Température de fonctionnement : 50 à 100°C environ.

II.9.3 Capteurs plan vitrés

C'est un élément très simple, comportant un absorbeur métallique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, transmet cette chaleur à un liquide caloporteur, cet absorbeur est monté dans un boîtier isolé recouvert d'un verre ou feuille en matière synthétique hautement transparente.

L'absorbeur comporte une couche noire souvent sélective qui absorbe efficacement le rayonnement solaire. [24]

Pour des niveaux de températures de 35° a 90°C, il est nécessaire d'utiliser des capteurs avec vitrage, l'absorbeur est dans ce cas, métallique (en cuivre ou en aluminium), dans un caisson isolé en face arrière, et vitré en face avant.

Le vitrage crée un effet de serre qui permet d'atteindre des températures de 70°C à 90°C et augmente ainsi le rendement.

Le capteur solaire peut avoir une ou plusieurs couvertures transparentes.

Le schéma suivant présente la structure d'un capteur plan vitré. Figure II.7 :

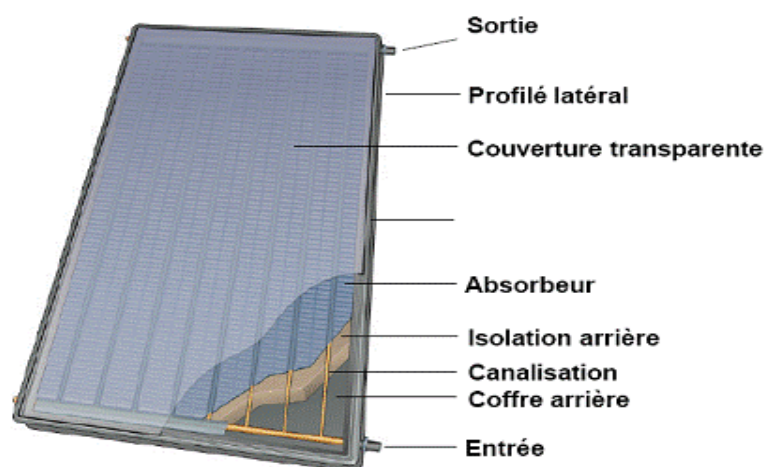


Figure II.7 : Capteur plan vitré.

II.10 Principaux éléments constituant un capteur plan

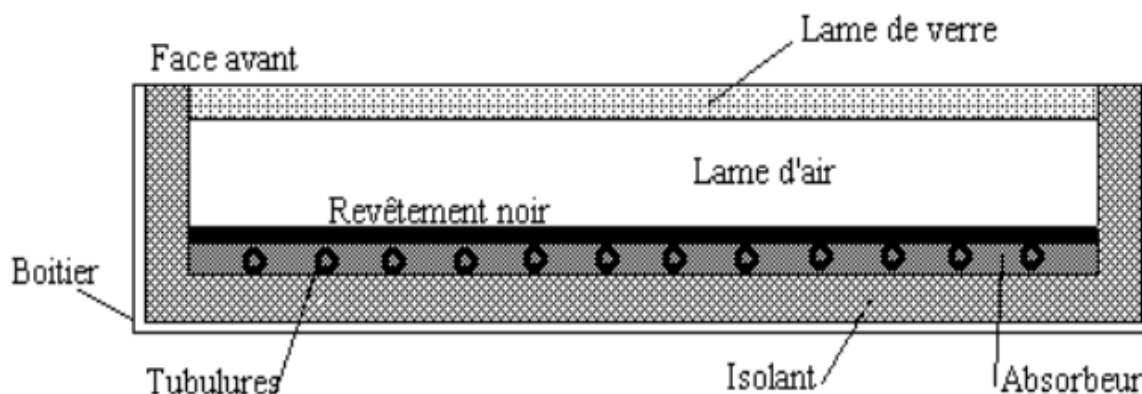


Figure II.8 : Coupe schématique d'un capteur solaire plan. [17]

II.10.1 Couverture

La couverture est l'élément par lequel se fait le maximum d'échange d'énergie.

Elle doit être donc transparente pour laisser passer le rayonnement solaire qui se transforme en chaleur dans l'absorbteur.

Ce dernier compte tenu des températures atteintes, émet des radiations dans le domaine de l'infrarouge, la couverture doit être opaque à ces radiations et doit donc les réfléchir vers l'absorbteur.

Du fait de sa résistance aux chocs, aux contraintes mécaniques (grêle, neige) et aux chocs thermiques (brusque refroidissement en cas d'orage), le verre sécurisé est principalement utilisé comme couverture transparente.

Il est de préférence pauvre en oxyde de fer afin d'être le plus transparent possible à la transmission du rayonnement solaire. Dans le cas de capteurs intégrés en toiture, des matières synthétiques sont parfois utilisées.

Leur durée de vie est plus faible que celle du verre ordinaire, mais elles sont plus légères, moins chères et plus facile à mettre en œuvre.

La plupart du temps le vitrage est légèrement structuré et disperse ainsi la fraction réfléchie du rayonnement solaire incident, afin de diminuer un éventuel éblouissement.

Les caractéristiques essentielles d'un vitrage sont :

- Le coefficient de transmission (τ).
- l'émissivité (ϵ).

Le coefficient de transmission (τ) est essentiellement déterminé par la structure du vitrage (double ou triple, l'épaisseur des vitres, des espaces et la nature du gaz de remplissage).

Les propriétés de divers types de verre sont données au tableau II.2 : [26]

Verre	Réflexion	Absorption	Transmission
Verre clair	8 %	9 %	83 %
Verre basse teneur en Fe_2O_3	8 %	2 %	90 %

Tableau II.2 : Quelques caractéristiques optiques des verres.

Le vitrage n'absorbe que faiblement le rayonnement solaire d'où il transmet donc un maximum d'énergie vers l'absorbeur.

Le tableau II.3 donne les caractéristiques optiques des matériaux, utilisés comme couverture transparente. [27]

Matériaux	Indice de réfraction	Epaisseur (mm)	Transmittivité
Verre	1,518	3-4	0,840
Lexan	1,586	3-4	0,840
Teflon	1,343	0,05	0,960
Tedlar	1,460	0,10	0,920
Mylar	1,640	0,10	0,870
Kynar	1,410	0,10	0,930
Marlex	1,50	0,10	0,920

Tableau II.3 : Caractéristiques optiques des matériaux.

Actuellement le verre le plus utilisé pour les capteurs solaire plan est le verre prismé.

Sa particularité est de diminuer la partie du rayonnement réfléchi (1.5%), contrairement au verre trompé classique.

Lorsque l'angle d'incidence est faible, ce verre peut permettre jusqu'à 96% de transmission.

II.10.2 Absorbeur

L'absorbeur joue le rôle principal dans le capteur solaire plan, généralement c'est un corps noir qui absorbe toutes les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une petite quantité dans l'infrarouge. [27]

Il converti le rayonnement solaire capté en énergie calorifique.

Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes : [27]

- Un bon coefficient d'absorption.
- Une bonne conductivité thermique.
- Une bonne résistance à la corrosion.
- Une faible inertie thermique.

Le choix du matériau et le mode de construction a une grande influence sur la qualité du capteur.

Du fait de leurs conductivités élevées, les absorbeurs sont généralement en cuivre, en Acier ou en aluminium.

Les absorbeurs souvent utilisés ainsi que leurs conductibilités thermiques sont donnés par le tableau suivant : [27]

Matériaux	Coefficient de dilatation	Conductibilité λ (W / m°C)
Aluminium	2,38	230
Cuivre	1,65	380
Zinc	2,9	112
Acier	1,15	52
Inox	1,15	52
Plastique	7-20	0.2-0.4

Tableau II.4 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.

Pour diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont souvent revêtus d'une couche sélective.

Pour la plupart des capteurs, le revêtement sélectif est obtenu à partir de nickel et de chrome.

Les modes de revêtements les plus courants sont donnés au tableau II.5. [27]

Revêtement	Absorption	Emission
Peinture noire	0,92-0,97	0,95
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0,95	0,14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0,91	0,07
Inox (sélectif)	0,95	0,05

Tableau II.5 : Revêtements des surfaces d'absorbeur.

II.10.3 Isolant

L'isolation est d'une importance primordiale dans les applications thermiques.

Dans le cas des capteurs, l'isolant est placé sous l'absorbeur, il est en général opaque au rayonnement visible et toujours opaque à l'infrarouge de grande longueur d'onde.

On distingue trois grandes familles d'isolants :

➤ Isolants minéraux

Les isolants minéraux souvent utilisés sont : la pierre ponce " Feldspath", la laine de verre et la vermiculite.

➤ Isolants végétaux

Le bois sous forme de fibres agglomérées, le liège, la sciure de bois et les cendres des végétaux, sont les matériaux souvent utilisés comme isolants végétaux.

➤ Isolants organiques de synthèse

On cite à titre d'exemple ; la mousse de polyuréthane, la mousse de phénolique, le polystyrène expansé et le chlorure de polyvinyle qui sont les plus souvent utilisés.

Le tableau suivant regroupe certaines propriétés de ces isolants :

Désignation	λ (W/m.k)	ρ (g/m ³)	T _{max} d'utilisation	Observations
Laine de verre	0.034 à 0°C 0.053 à 200°C	70	150	sensible a l'humidité
Mousse de verre	0.057	123	150	*****
Bois	0.13 à 0.40	*****	*****	*****
Bois aggloméré	0.1			
Sciure de bois	0.11			
Vermiculite	0.12 à 0.4	*****	*****	*****
Polystyrène	0.042	15	85	Moulé
	0.04	17	85	comprimé
Liège expansé	0.045	100	110	*****
Polyuréthane	0.035	35	85	Comprimé
Polyuréthane	0.027	35-40	110	mousse

Tableau II.6 : Propriétés des isolants.

II.11 Les différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaires plans [28]

Le rendement d'un capteur solaire plan est un influencé par différents paramètres, on distingue :

II.11.1 Paramètres externes

- Paramètres d'ensoleillement : éclairement, position du soleil, duré d'insolation, l'heur de la journée et la saison.
- Température ambiante.
- Vitesse du vent sur le capteur.

II.11.2 Paramètres internes

➤ Paramètres de position :

- Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
- Capteur fixe ou suiveur de soleil.

➤ Paramètres de construction :

Parmi les quels nous citons :

- L'absorbeur

- Les propriétés thermochimiques et optiques.
- Température de l'absorbeur.
- La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.
- Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre.
- La température des différentes parties du capteur.
- Dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes.

- Couverture transparente

- Propriétés optiques et thermophysiques.
- Epaisseur.
- Le nombre de vitrage et la forme.

- Isolant

- Propriétés optiques et thermophysiques.
- Epaisseur.

- Fluide caloporteur.

- Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent).
- Température d'entrée.
- Propriétés thermophysiques.

II.12 Les avantages et les inconvénients d'un capteur plan

II.12.1 Avantages [17]

- Une longue durée de vie.
- Efficacité énergétique.
- Prix économique.
- Fiabilité.
- Intégration aux toitures.

II.12.2 Inconvénients [17]

- Ne convient pas pour les hautes températures.
- La température interne peut monter très rapidement dans l'absence de circulation de fluide caloporteur.

II.13 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents capteurs solaires thermiques, tout en focalisant sur les différents capteurs plans.

La comparaison entre ces types montre que les capteurs plans sont utilisés lorsque la température désirée n'est pas très haute (<70°C pour le capteur à air et au voisinage de 100 °C pour les capteurs à eau).

Les capteurs solaires plans peuvent être utilisés dans tous les climats pour produire de l'eau chaude, mais leurs performances annuelles sont proportionnelles à l'ensoleillement du lieu où sont installés.

Le choix entre les types de capteurs solaires est déterminé par le type d'application recherchée, la fiabilité, le prix et les températures souhaitées.

III.1 Introduction

La modélisation d'un capteur plan solaire passe par l'établissement d'un bilan thermique, pour l'évaluation des gains et des pertes du système.

La modélisation d'un capteur plan prend obligatoirement en considération le mode de circulation du fluide vis-à-vis de l'absorbeur, le nombre de vitrage, la présence ou l'absence de la plaque métallique adjointe à l'isolation et les matériaux utilisés pour l'isolation arrière et latérale.

Cette modélisation doit aboutir à la détermination des coefficients caractérisant le capteur étudié, les différentes équations permettant d'évaluer l'énergie extraite, les températures des éléments et du fluide à l'entrée et à la sortie, ainsi que le rendement du capteur.

III.2 Rappels sur les transferts de chaleur

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état final.

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes températures vers les basses températures.

La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur. [29]

L'existence d'une différence de température entre deux systèmes, quel que soit le milieu qui les sépare même le vide, fait intervenir un échange d'énergie connu généralement sous le nom de « transfert de chaleur ».

Les calculs des systèmes solaires utilisant la conversion thermique de l'énergie font appel à quelques formules de base relatives aux transferts de chaleur.

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

III.3 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire plan

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure III.1).

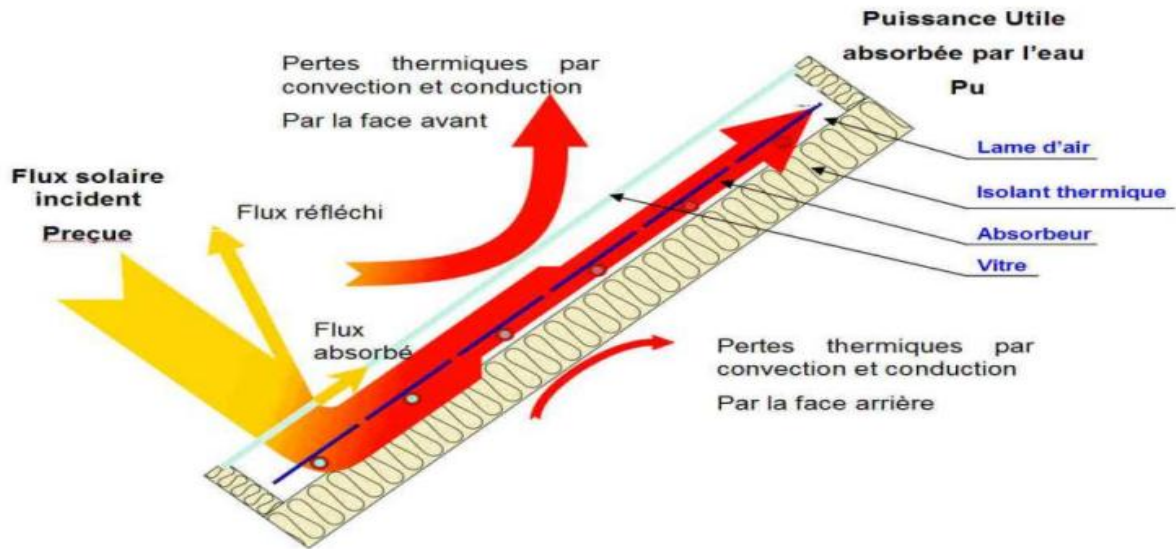


Figure III.1 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan.

III.3.1 Conduction

C'est le mode de transfert caractérisé par la propagation de l'énergie dans un milieu solide sans déplacement appréciable de matière [30], sous l'influence d'une différence de température.

La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température : [18]

$$Q_{cd} = -\lambda \cdot S \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \tag{III.1}$$

$$Q_{cd} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \tag{III.2}$$

Avec :

Q_{cd} : Le flux de chaleur par conduction (W).

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²).

λ : La conductivité thermique (W/m°C).

x : Variable d'espace dans la direction du flux (m).

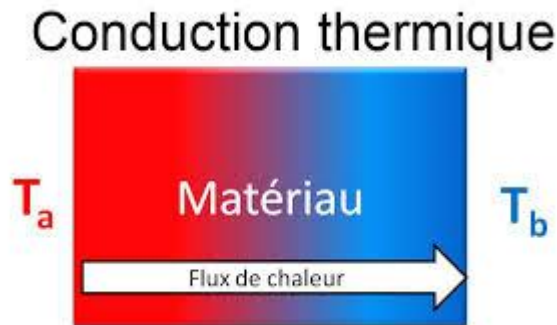


Figure III.2 : Schéma du transfert de chaleur par conduction.

III.3.2 Convection

C'est le mode de transfert qui s'effectue uniquement dans les milieux fluides, plus précisément dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide en mouvement. [31]

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue :

- La convection naturelle (libre) : ou le mouvement du fluide est dû à l'action simultanée des différences des températures qui existe dans le milieu et d'un champ de forces massiques. [31]
- La convection forcée : Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences des températures (pompe, ventilation ...).

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$Q_{cv} = h_c S (T_P - T_\infty) \quad \text{(III.3)}$$

Avec :

Q_{cv} : Le flux de chaleur par convection (W).

S : La surface de transmission de chaleur (m^2).

T_P : La température de surface de solide ($^{\circ}C$).

T_∞ : La température du fluide avant son contact avec le solide ($^{\circ}C$).

h_c : Le coefficient de transmission thermique par convection ($W/m^2^{\circ}C$).

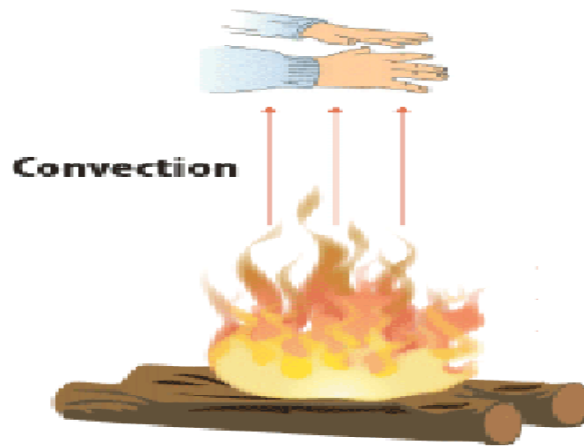


Figure III.3 : Schéma du transfert de chaleur par convection.

III.3.2.1 Calcul du coefficient d'échange par convection [18]

➤ En convection forcée :

En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange h_c par convection est indépendant de la différence de la température de la paroi et le fluide mais il dépend des 6 grandeurs suivantes :

U_m : Vitesse moyenne du fluide.

ρ : Masse volumique du fluide.

C_p : Chaleur spécifique du fluide.

μ : Viscosité thermique du fluide.

λ : Conductivité thermique du fluide.

D : Dimension caractéristique de la surface d'échange.

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivants :

$$\mathbf{R_e} = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad \text{Nombre de Reynolds} \quad \text{(III.4)}$$

$$\mathbf{P_r} = \frac{\mu C_p}{\rho} \quad \text{Nombre de Prandtl} \quad \text{(III.5)}$$

$$\mathbf{N_u} = \frac{h_c D}{\lambda} \quad \text{Nombre de Nusselt} \quad \text{(III.6)}$$

R_e : Le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide.

P_r : Le nombre de Prandtl caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

N_u : Le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

➤ **En convection naturelle :**

Dans la convection naturelle, le mouvement du fluide est dû aux variations de la masse volumique du fluide provenant des échanges de chaleur entre le fluide et la paroi.

Le fluide est mis en mouvement sous l'effet des forces d'Archimède car sa masse volumique est en fonction de sa température.

La convection forcée est négligeable si :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Gr/Pr}^2 > 100 \\ \text{Nu} = C (\text{Gr Pr})^n \end{array} \right\} \quad \text{(III.7)}$$

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Convection laminaire} & \text{Gr Pr} < 109 \Rightarrow n=1/4 \\ \text{Convection turbulente} & \text{Gr Pr} > 109 \Rightarrow n=1/3 \end{array} \right\} \quad \text{(III.8)}$$

III.3.3 Le rayonnement [18]

Le transfert de chaleur par rayonnement à lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre.

Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann :

$$Q_r = \epsilon \cdot \sigma \cdot S(T_p^4 - T_\infty^4) \quad \text{(III.9)}$$

Avec :

Q_r : Densité de flux de chaleur émis par le corps.

ϵ : Emissivité thermique du matériau.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^{-4}$.

T_p : Température de la surface.

T_∞ : Température du milieu environnant la surface.

S : Aire de la surface (m^2).

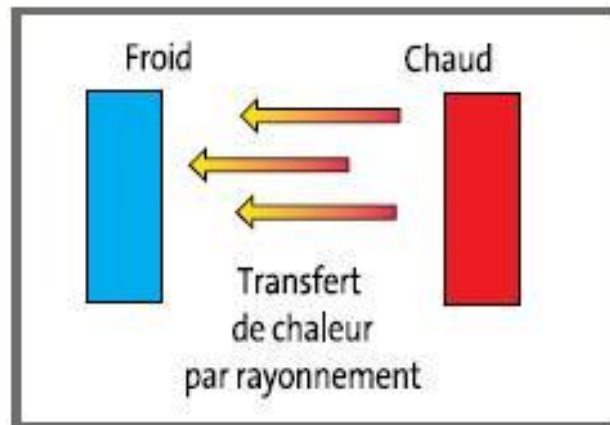


Figure III.4 : Schéma du transfert de chaleur radiatif.

III.4 Régime d'écoulement [17]

Du fait que le transfert se fait dans un milieu fluide il est nécessaire de rappeler quelque notion de mécanique de fluides et surtout les deux régimes d'écoulements :

➤ **Régime laminaire :**

L'écoulement s'effectue en lames (couches) superposées pratiquement indépendantes ; les échanges qui s'effectuent entre eux sont d'origine moléculaire.

➤ **Régime turbulent :**

L'écoulement n'est pas unidimensionnel, les particules fluides sont en mouvement aléatoire, dans ce cas la diffusion transversale est très importante.

III.5 Perte globale d'énergie [29]

Les pertes thermiques sont dues à la différence de température entre l'absorbeur et le milieu ambiant.

Elles se manifestent selon les trois modes de transfert de chaleur.

Elles se divisent en trois catégories : les pertes vers l'avant, les pertes vers l'arrière et les pertes latérales.

III.5.1 Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'avant du capteur sera donné par la relation suivante :

$$U_{av} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{rvciel} + h_{cvamb}}\right) + \left(\frac{1}{h_{rabsv} + h_{cabsv}}\right)} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

h_{cvamb} : Le coefficient d'échange par convection entre la couverture transparente et le milieu extérieur.

h_{rvciel} : Le coefficient de transfert de la chaleur par rayonnement entre la couverture transparente et le ciel.

h_{rabsv} : Le coefficient d'échange par rayonnement entre la couverture transparente et l'absorbeur.

h_{cabsv} : Le coefficient d'échange par convection entre la couverture transparente et l'absorbeur.

III.5.2 Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur

Ce coefficient est peu important que celui d'avant, vue le capteur est très bien isolé à l'arrière.

L'expression évaluant ce coefficient est donné par :

$$U_{arr} = \frac{K_{isol}}{E_{isol}} \quad (\text{III.11})$$

K_{isol} : Coefficient de conductivité thermique de l'isolant (W/K. m).

E_{isol} : Épaisseur de l'isolant (m).

III.5.3 Coefficient de pertes thermiques latérales

La valeur de ce coefficient est inférieure à celle du coefficient de pertes arrière, vu que la surface latérale du capteur est peu importante.

$$U_{lat} = \left(\frac{K_{isol}}{E_{isol}}\right) \cdot \left(\frac{A_{lat}}{A_c}\right) \quad (\text{III.12})$$

Avec :

A_{lat} : Surface latérale du capteur (m^2).

A_c : Surface du capteur (m^2).

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'extérieur est la somme des trois coefficients.

$$U_L = U_{\text{av}} + U_{\text{arr}} + U_{\text{lat}} \quad \text{(III.13)}$$

III.6 Modélisation mathématique

III.6.1 Hypothèses

Avant d'entamer la partie modélisation les hypothèses simplificatrices suivantes doivent être mises en compte :

- Le ciel est assimilé à un corps noir.
- Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes.
- Les surfaces d'échange de chaleur par rayonnement sont supposées grises et planes.
- La vitre est opaque aux rayonnements infrarouges.
- La vitesse du fluide est uniforme.
- Les pertes par rayonnements au fond et aux surfaces latérales de l'isolant sont supposées négligeables.
- L'air confiné dans le capteur est supposé stagnant et transparent.
- La température de la plaque absorbante est supposée égale à celle des tubes.

III.6.2 Modèle mathématique

III.6.2.1 Bilans thermiques

Pour construire le modèle mathématique, la méthode des bilans thermiques pour chaque composant a été utilisée.

En évaluant les gains et les pertes, ces bilans traduisent le principe de conservation de l'énergie appliqué à chaque élément du capteur à étudier.

Dans le cas d'un régime de fonctionnement du capteur stationnaire « Permanent $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ».

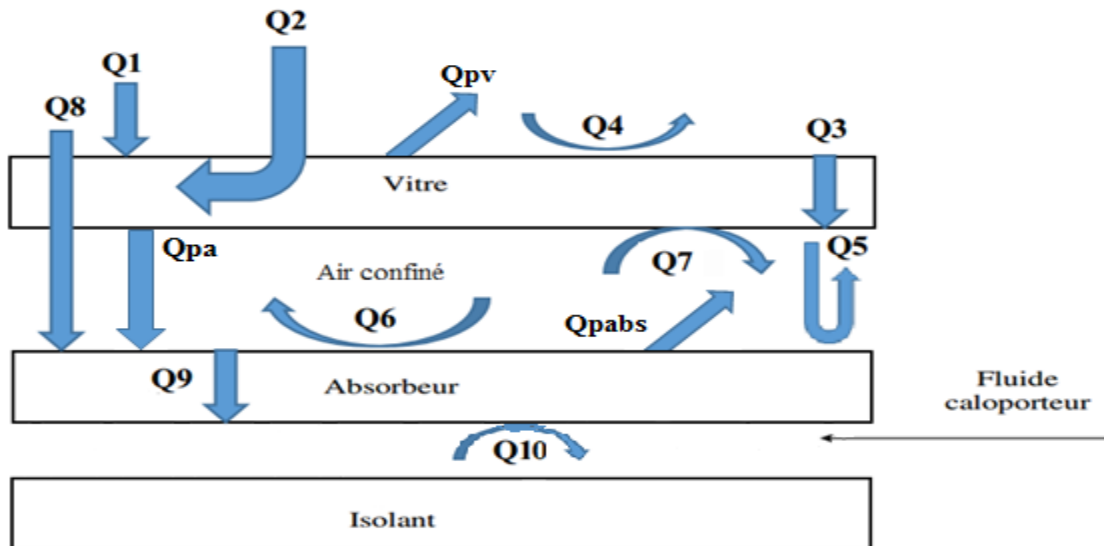


Figure III.5 : Mécanisme des échanges de chaleur détaillé.

➤ Le bilan total qui décrit le comportement total de la vitre s'écrit :

$$Q_V = \sum \text{entrée} - \sum \text{sortie} = \sum_i Q_i - \sum_j Q_j \quad (\text{III.14})$$

$$M_V C_V \frac{dT_V}{dt} = Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_{PV} + Q_3 - Q_5 - Q_7 \quad (\text{III.15})$$

$$M_V C_V \frac{dT_V}{dt} = \alpha_V S_V G + h_{r,V\text{-ciel}} S_V (T_{\text{ciel}} - T_V) + h_{c,V\text{-amb}} S_V (T_{\text{amb}} - T_V) + S_V G \frac{\tau_V \alpha_V (1 - \alpha_{\text{abs}})}{1 - \phi_V (1 - \alpha_{\text{abs}})} + U_{PV} S_{\text{lat},V} (T_{\text{amb}} - T_V) + h_{r,V\text{-abs}} S_V (T_{\text{abs}} - T_V) + h_{c,V\text{-a}} S_V (T_a - T_V) \quad (\text{III.16})$$



Figure III.6 : Echange thermique au niveau de la vitre.

Le coefficient de pertes thermiques du vitrage :

$$U_{PV} = \frac{\lambda_V}{e_V} \quad (\text{III.17})$$

Avec :

λ_V : Conductivité thermique (W/ m.K).

e_V : Épaisseur de la vitre.

- Le bilan total qui décrit le comportement total de l'air confiné entre vitre et absorbeur s'écrit :

$$Q_a = \sum \text{entrée} - \sum \text{sortie} = \sum_i Q_i - \sum_j Q_j \quad (\text{III.18})$$

$$\rho_a V_a C_a \frac{dT_a}{dt} = Q_7 - Q_6 + Q_{Pa} \quad (\text{III.19})$$

$$\rho_a V_a C_a \frac{dT_a}{dt} = h_{c,V-a} S_V (T_V - T_a) + h_{c,abs-a} S_{abs} (T_{abs} - T_a) + U_{pa} S_{lat,a} (T_{amb} - T_a) \quad (\text{III.20})$$

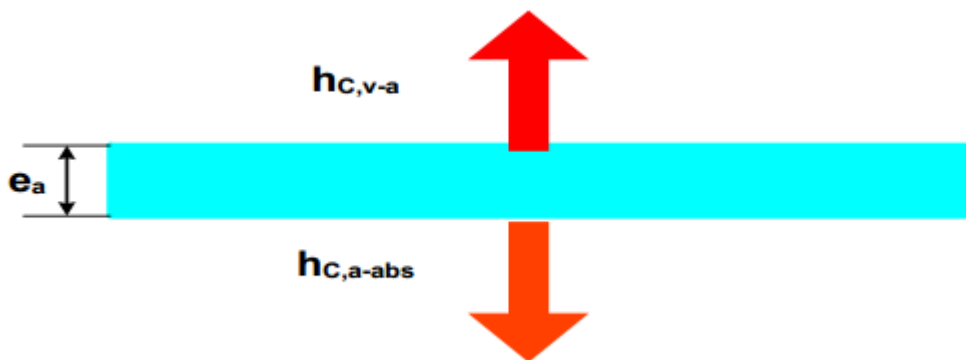


Figure III.7 : Echange thermique au niveau de l'air confiné.

- Le bilan total qui décrit le comportement total de l'absorbeur s'écrit :

$$Q_{abs} = \sum \text{entrée} - \sum \text{sortie} = \sum_i Q_i - \sum_j Q_j \quad (\text{III.21})$$

$$M_{abs} C_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = Q_5 + Q_6 + Q_8 + Q_{Paabs} + Q_9 - Q_{10} \quad (\text{III.22})$$

$$M_{abs} C_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = h_{r,V-abs} S_{abs} (T_V - T_{abs}) + h_{c,abs-a} S_{abs} (T_a - T_{abs}) + S_{abs} G \tau_V \alpha_{abs}$$

$$S_{abs} G \frac{\tau_V \alpha_{abs}}{1 - \phi_V (1 - \alpha_{abs})} + U_{abs} S_{abs} (T_a - T_{abs}) + h_{c,abs-f} S_{éch,f} (T_f - T_{abs}) \quad (\text{III.23})$$

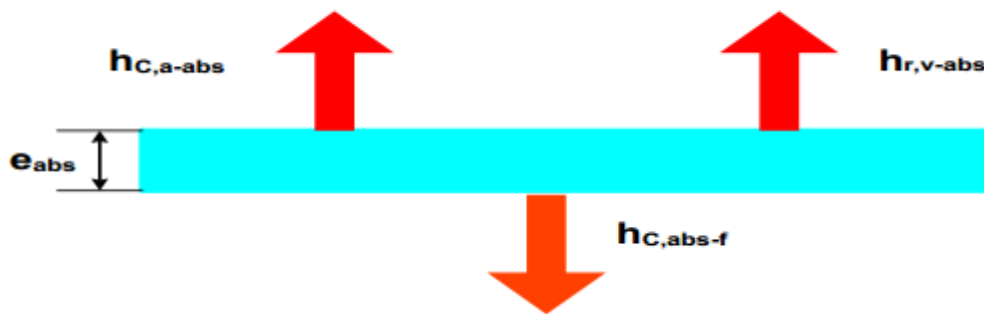


Figure III.8 : Echange thermique au niveau de l'absorbeur.

Avec :

$$U_{abs} = \frac{\lambda_{abs}}{e_{abs}} \tag{III.24}$$

➤ Le bilan total qui décrit le comportement total du fluide caloporteur s'écrit :

$$Q_f = \sum \text{entrée} - \sum \text{sortie} = \sum_i Q_i - \sum_j Q_j \tag{III.25}$$

$$\rho_f C_f \frac{D_{in-Tube}}{4} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + v \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = Q_{10} \tag{III.26}$$

$$\rho_f C_f \frac{D_{in-Tube}}{4} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + v \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = h_{c,abs-f} (T_{abs} - T_f) \tag{III.27}$$

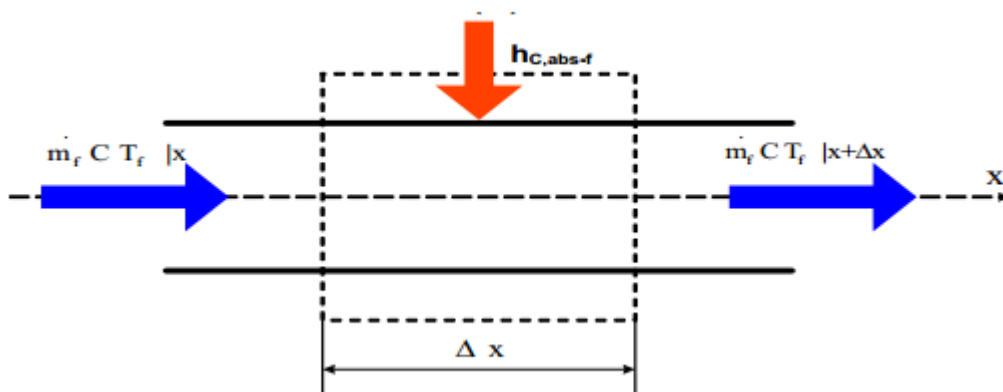


Figure III.9 : Echange thermique au niveau du fluide caloporteur.

III.6.2.2 Coefficients d'échange de la chaleur

➤ Coefficients d'échange par convection

–Le coefficient d'échange par convection entre la couverture transparente et le milieu extérieur ($h_{c,V-amb}$) dépend essentiellement de la vitesse du vent et peut être estimé par la corrélation empirique suivante [32] :

$$h_{c,V-amb} = h_{c,vent} = 3.9V_{vent} + 5.62 \quad (\text{III.28})$$

–Le coefficient de transfert de chaleur par convection entre la couverture transparente et l'air confiné ($h_{c,V-a}$) est calculé par la corrélation suivante :

$$h_{c,V-a} = \frac{N_u \lambda_a}{e_a} \quad (\text{III.29})$$

Pour un écoulement d'air naturel, le nombre de Nusselt pour une inclinaison du capteur solaire β par rapport à l'horizontal est exprimé par la corrélation proposée par Duffie et Beckman [33]:

$$N_u = [0.06 - 0.017(\frac{\beta}{90})] G_r^{1/3} \quad (\text{III.30})$$

$$G_r = \frac{g(T_{abs} - T_v) e_a^3}{v^2 T_a} \quad (\text{III.31})$$

–Le coefficient de transfert de la chaleur par convection à l'intérieur des tubes ($h_{c,abs-f}$) est estimé par la corrélation suivante : [34]

$$h_{c,abs-f} = \frac{N_u \lambda_f}{D_{in-Tube}} \quad (\text{III.32})$$

Dans un écoulement turbulent N_u est estimé par la corrélation suivante : [35]

$$N_u = 0.023 R_e^{4/5} P_r^{0.4} \quad (\text{III.33})$$

Pour : $Re > 5000$ et $0,6 < Pr < 100$

Avec :

$n = 0,3$ si $T_{fluide} > T_{paroi}$ Fluide chauffe la paroi du tube.

$n = 0,4$ si $T_{fluide} < T_{paroi}$ La paroi du tube chauffe le fluide.

➤ **Coefficients d'échange par radiation**

–Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement ($h_{r,V-ciel}$) entre la couverture transparente et le ciel est donné par l'équation suivante :

$$h_{r,V-ciel} = \epsilon_V \sigma (T_V^2 + T_{ciel}^2) (T_V + T_{ciel}) \quad (III.34)$$

La température équivalente du ciel en fonction de la température ambiante est donnée par :

En 1963, Swinbank a proposé une expression qui relie la température du ciel à la température ambiante, cette relation sera utilisée dans le cadre de ce travail : [36]

$$T_{ciel} = 0.0552 T_{amb}^{1.5} \quad (III.35)$$

De Whillier (1967) donne : [37]

$$T_{ciel} = T_{amb} - 6 \quad (III.36)$$

–Le coefficient d'échange par rayonnement entre la couverture transparente et l'absorbeur est estimé par la corrélation suivante :

$$h_{r,V-abs} = \frac{\sigma (T_V^2 + T_{abs}^2) (T_V + T_{abs})}{\frac{1}{\epsilon_V} + \frac{1}{\epsilon_{abs}} - 1} \quad (III.37)$$

III.7 Rendement du capteur

Le rendement est l'un des critères de performance des capteurs solaires, il est défini comme étant le rapport de l'énergie thermique recueillie par le fluide de travail à l'énergie thermique reçue du soleil.

L'énergie utile transmise au fluide représente la chaleur nette collectée, c'est-à-dire la chaleur restant utilisable après les diverses pertes à la réception et à l'absorption.

L'énergie utile récupérée par le capteur solaire plan (Q_u) est en fonction des caractéristiques du capteur solaire plan tel que le facteur de transmission de la vitre, le facteur d'absorption de l'absorbeur, la surface du capteur et le coefficient global des pertes thermiques.

Le rendement du capteur solaire en fonction du débit massique est donné par [38] :

$$\eta = \frac{Q_u}{SG} = \frac{\dot{m}C_f(T_{fs}-T_{fe})}{SG} \quad \text{(III.38)}$$

Avec :

Q_u : Le flux d'énergie utile.

T_{fs} : Température de sortie du fluide.

T_{fe} : Température d'entrée du fluide.

S : Surface du capteur.

\dot{m} : Le débit massique du fluide.

C_f : La chaleur spécifique du fluide.

G : Flux solaire global incident.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les modèles mathématiques donnant les différents bilans thermiques pour chaque composant (vitre, absorbeur et fluide caloporteur ...etc.) du capteur solaire plan, ainsi que les différentes pertes.

A partir de cette étude théorique, on va développer un programme de calcul utilisant le logiciel de calcul formel (MATLAB) qui permet de simuler les performances thermiques des capteurs solaires plans en faisant varier les paramètres d'entrée tels que la température d'entrée et le débit du fluide caloporteur.

IV.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, on a présenté la modélisation mathématique du comportement d'un capteur plan à eau dans le cas transitoire (réel).

Dans ce chapitre, on va résoudre le système d'équations obtenu et étudier les variations des paramètres importants du capteur (rendement, température de sortie du fluide caloporteur) en fonction du temps et d'autres paramètres d'entrée (débit, température du fluide à l'entrée, température ambiante et l'irradiation globale).

Les équations de bilan thermiques obtenues sont des équations différentielles de premier ordre, leurs solutions se feront en utilisant le logiciel de calcul formel MATLAB.

La méthode itérative Runge-Kutta d'ordre 4 est utilisée pour résoudre notre système d'équations différentielles de premier ordre.

Les solutions seront présentées et interprétées dans ce chapitre.

IV.2 Environnement de programmation MATLAB

MATLAB® est un logiciel qui a été conçu afin de fournir un environnement de calcul matriciel à syntaxe simple, efficace, interactif et portable, permettant la mise en œuvre des algorithmes d'enveloppes.

Il peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté tels que : UNIX®, Microsoft Windows®, Apple® et Macintosh®.

IV.3 Intégration numérique

Le système d'équation régissant le fonctionnement du capteur solaire plan se compose de quatre équations différentielles du premier ordre (chapitre III).

IV.3.1 Principe de la méthode de Runge-Kutta au 4^{ème} ordre

La méthode de Runge kutta d'ordre 4 est une méthode d'analyse numérique d'approximation de solution d'équation différentielle.

Elle repose sur le principe de l'itération, c'est-à-dire qu'une première estimation de la solution est utilisée pour calculer une seconde estimation plus précise et ainsi de suite.

Elles ont été ainsi nommées en l'honneur des mathématiciens Carl Runge et Martin Wilhem Kutta qui élaborèrent cette méthode en 1901.

La méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 (RK4) est très couramment utilisée pour la résolution des équations différentielles ordinaires (EDO) et très stable pour les fonctions courantes de la physique. [18]

Soit l'équation différentielle du premier ordre $y = f(x, y)$, avec la condition $y(x_0) = y_0$.
Un développement en série de Taylor de y donnera [39], [40] :

$$y_{n+1} = y_n + h \cdot y_n^{(1)} + \frac{h^2}{2!} * y_n^{(2)} + \frac{h^3}{3!} * y_n^{(3)} + \dots + \frac{h^n}{n!} * y_n^{(n)} \quad (\text{IV.1})$$

Où

$$y_n = y(x_n) \text{ et } y_{n+1} = y(x_{n+1}) = y(x_n + h) \quad (\text{IV.2})$$

Pour une approximation de type :

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6} * (\text{RK}_1 + 2\text{RK}_2 + 2\text{RK}_3 + \text{RK}_4) \quad (\text{IV.3})$$

Où :

$$\text{RK}_1 = h \cdot f(x_n, y_n) \quad (\text{IV.4})$$

$$\text{RK}_2 = h \cdot f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{\text{RK}_1}{2}\right) \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{RK}_3 = h \cdot f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{\text{RK}_2}{2}\right) \quad (\text{IV.6})$$

$$\text{RK}_4 = h \cdot f(x_n + h, y_n + \text{RK}_3) \quad (\text{IV.7})$$

A partir de la valeur initial $y(x_0) = y_0$, nous déduirons de pas en pas $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$.

IV.4 Cas d'étude :

Le capteur solaire plan étudié présente les caractéristiques suivantes [Tableau IV.1].

Les propriétés des fluides utilisées sont données par le tableau IV.2.

Désignation		valeur	unité	
Dimension	longueur	1,95	[m]	
	largeur	1.20	[m]	
Vitre	Nombre des vitres	1	[-]	
	Epaisseur	0.004	[m]	
	Emissivité	0.93	[-]	
	Coefficient d'absorption	0.02	[-]	
	Transmissivité	0.83	[-]	
	Conductivité thermique	1	[W/m°C]	
Absorbeur en Aluminium	Epaisseur	0.003	[m]	
	Emissivité	0.09	[-]	
	Coefficient d'absorption	0.95	[-]	
	Conductivité thermique	204	[W/m°C]	
Radiateur en cuivre	Nombre de tubes	10	[-]	
	Diamètre intérieur des tubes	0.015	[m]	
	La longueur des tubes	1.95	[m]	
	Distance entre deux tubes	0.1	[m]	
Isolant en Laine de verre	Epaisseur	Le fond	0.06	[m]
		Les cotés	0.02	[m]
	Conductivité thermique	0.036	[W/m°C]	
Météorologique	Température ambiante	20	[°C]	
	la vitesse de vent	20	[km/h]	

Tableau IV.1 : Caractéristiques du capteur solaire plan. [41]

Désignation		valeur	unité
Fluide caloporteur (l'eau)	capacité calorifique	4180	[J/kg.K]
	débit	0.006	[kg/s]
	masse volumique	1000	[kg/m ³]
	conductivité thermique	0.6	[w/m°C]
	viscosité dynamique	1.003*10 ⁻³	[Kg/m s]
	Température d'entrée au capteur	20	[°C]
l'air	capacité calorifique	1004	[J/kg.K]
	masse volumique	1.2	[kg/m ³]
	conductivité thermique	0.0234	[w/m°C]
	viscosité cinématique	1.005*10 ⁻⁶	[Kg/m s]

Tableau IV.2 : Les propriétés de l'air et du fluide caloporteur.

IV.5 Etapes de calcul :

Le programme de calcul pour la méthode de résolution itérative de R.K.4 :

➤ La première étape : le calcul des différents échanges et pertes thermiques indépendantes de la température, qui sont : les coefficients de pertes thermiques d'échange par conduction vers la surface latérale de la vitre et de l'absorbeur ainsi que le coefficient d'échange convectif entre l'air ambiant et la vitre.

➤ La deuxième étape : on choisit un intervalle de temps pour effectuer les calculs (entre 7h00 du matin à 17h00) et on calcule pour chaque pas de temps les paramètres suivants :

- La température ambiante.
- La température du ciel.

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

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.

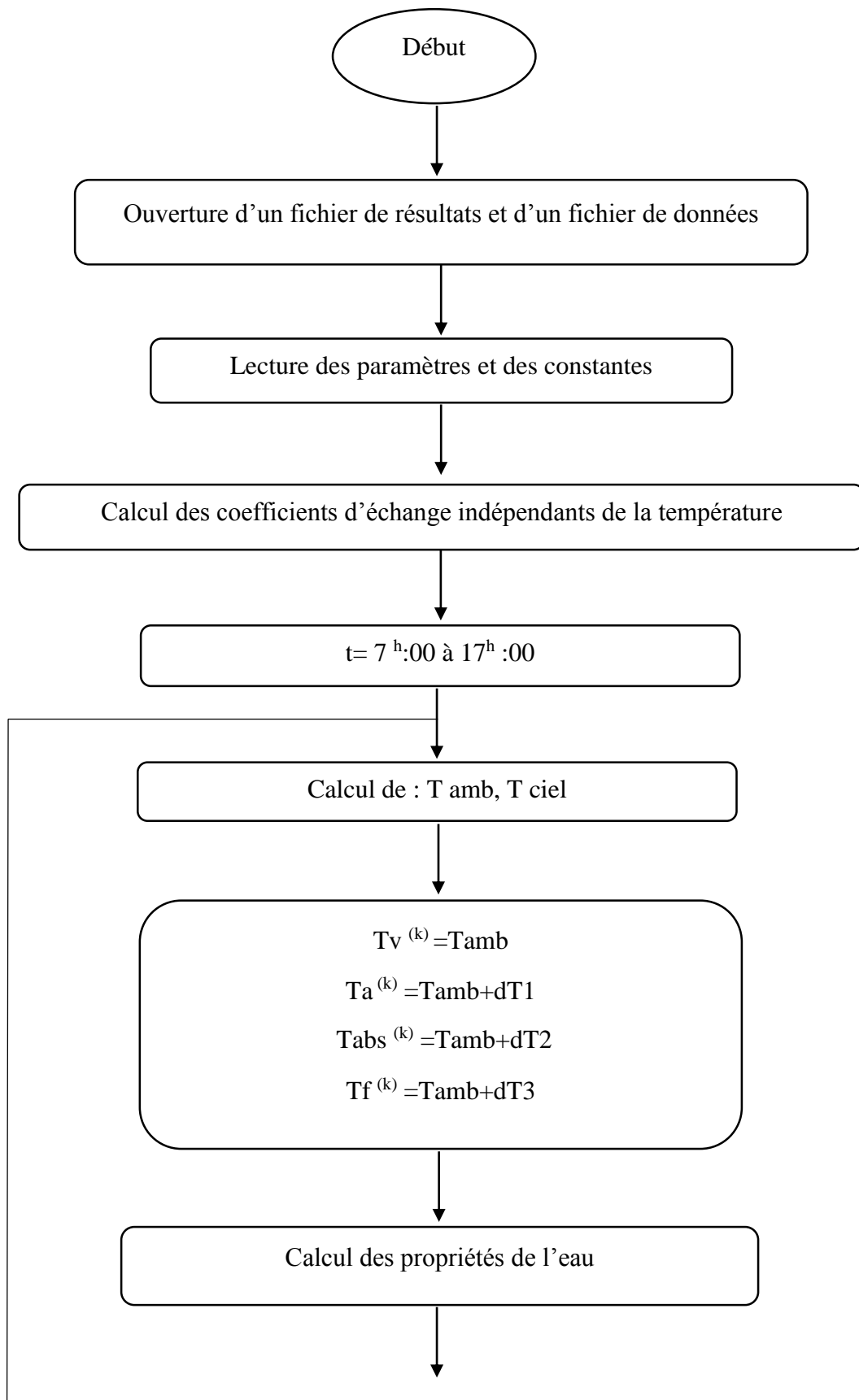
Les coefficients d'échange thermique, à savoir :

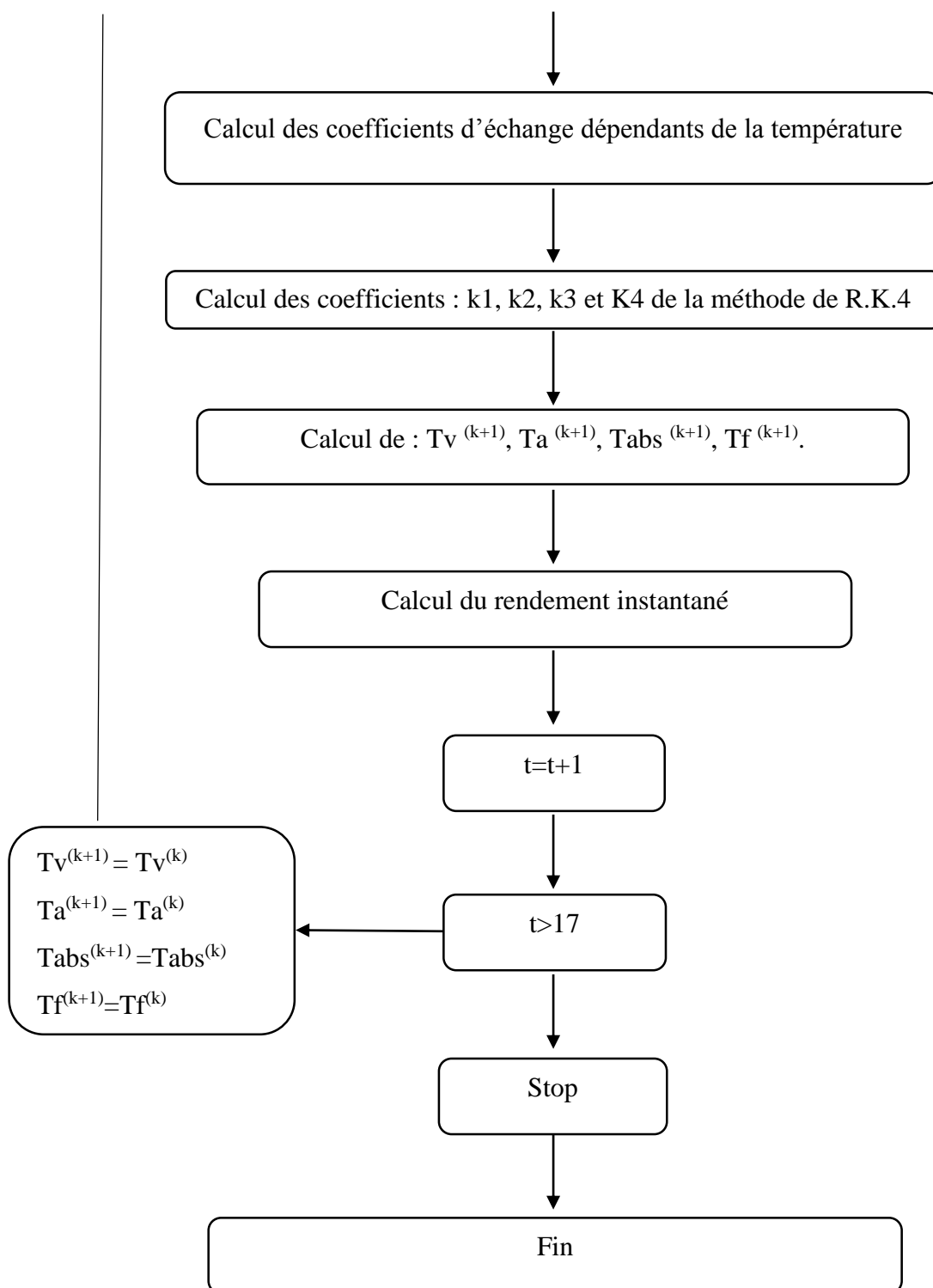
- Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur.
- Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel.
- Le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'ambiant.
- Le coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et l'air confiné.
- Le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air confiné.
- Le coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

La résolution du système d'équations se fera par la méthode de RK4.

- La quatrième étape : la troisième étape est reprise avec les températures obtenues sans recalculer les propriétés physiques du fluide caloporteur.
- La cinquième étape : calcul du rendement instantané du capteur pour chaque pas de temps.

IV.6 L'organigramme général du calcul





IV.7 Résultats et Interprétation

IV.7.1 Rayonnement global

La prédiction de la performance du capteur solaire requiert des informations sur le rayonnement solaire.

Le flux solaire global absorbé par les différentes composantes du collecteur a été estimé par le modèle de Perrin Brinchambaut. [29]

La modélisation a été effectuée pour deux journées ensoleillées de l'année qui sont le solstice d'été (21 juin) et le solstice d'hiver (21 décembre).

Au cours d'une journée ensoleillée, l'éclairement solaire reçu par un capteur varie typiquement de la manière représentée sur la figure IV.1.

Il augmente dès le lever du soleil pour atteindre un maximum à midi solaire avant de décroître à nouveau jusqu'à s'annuler à la tombée de la nuit.

Comparant les deux courbes on peut observer que le rayonnement le plus élevé a été obtenu le 21 juin et le plus bas le 21 décembre.

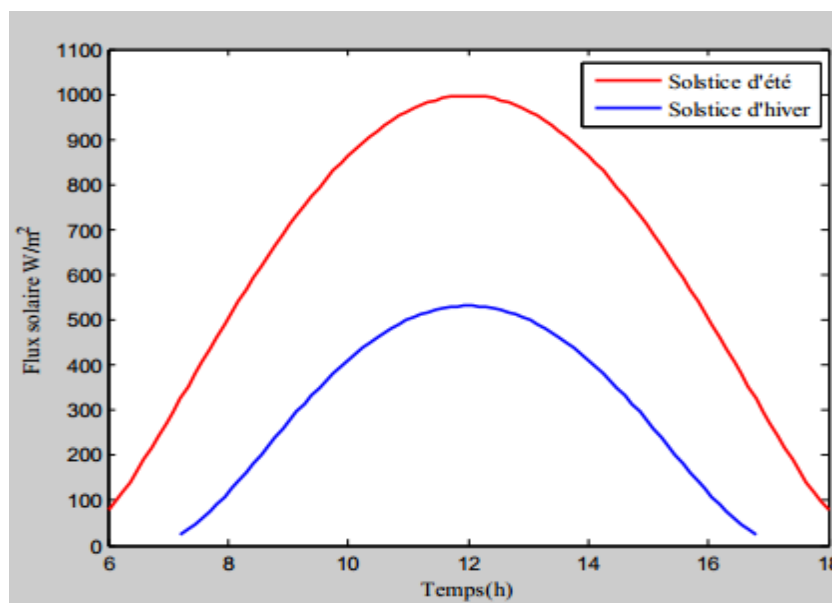


Figure IV.1 : Variation du flux solaire pour les solstices en fonction du temps.

IV.7.2 Températures des différents composants du capteur

La figure IV.2 et IV.3 illustre les profils des variations des températures de la couverture transparente, de l'air confiné, de l'absorbeur et du fluide caloporteur en fonction du temps.

Dans ce cas, le débit massique de l'eau est $\dot{m}_f = 0.006$ kg/s et la température d'entrée d'eau (20°C), la vitesse du vent a été prise constante et égale à 20 km/hr.

L'analyse de ces courbes permet de donner les remarques suivantes :

- Les températures augmentent avec le temps et atteignent leur maximum entre 12 hr et 13 hr, ensuite elles décroissent avec le temps.

Elles ont la même allure que celle de la température ambiante (distribution normale).

- La température de l'absorbeur est la plus élevée, ce qui s'explique aisément par son facteur d'absorption solaire le plus élevé ($\alpha_{\text{abs}}=0.95$).

Puis, dans un ordre décroissant, nous avons la température moyenne du fluide caloporteur résultant du coefficient de convection entre l'absorbeur et le fluide.

Ensuite la température de l'air confiné qui se trouve directement sur l'absorbeur dont le coefficient de convection thermique est élevée.

Compte tenu du faible coefficient d'absorption de la vitre ($\alpha_v=0.02$) en plus de l'effet du vent qui cause des déperditions thermiques par convection avec l'air ambiant, la variation de la température de cette dernière, avec l'avancement de la journée, est la plus faible.

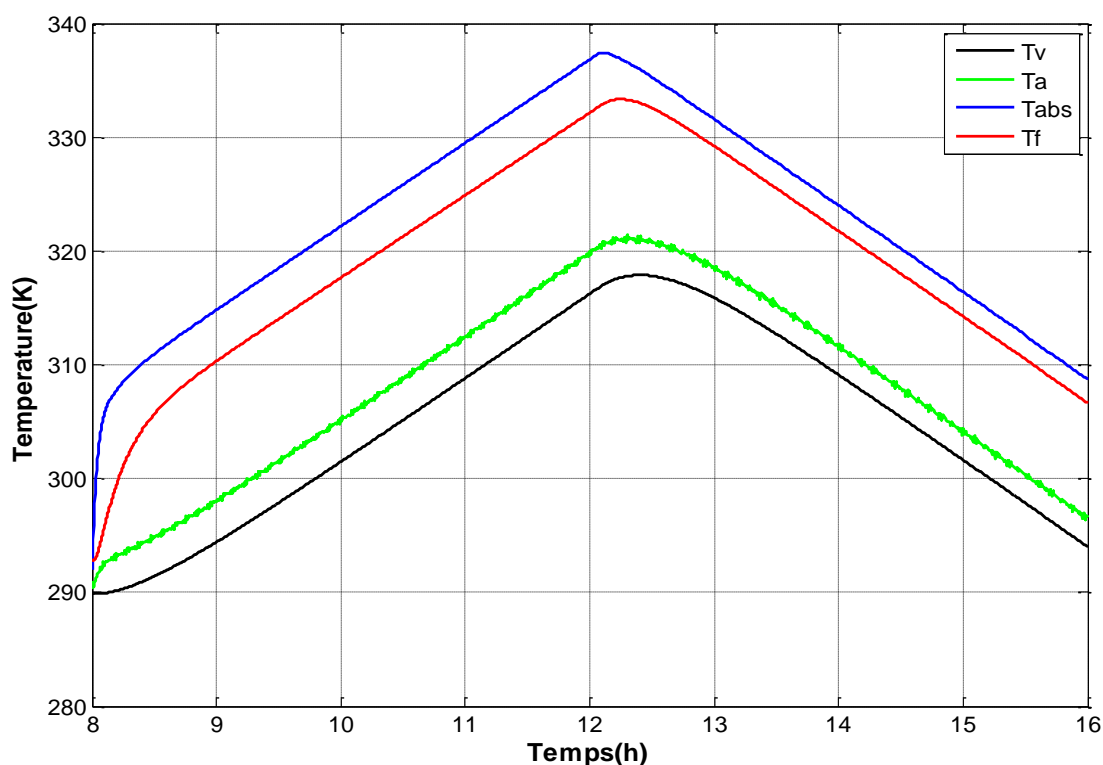


Figure IV.2 : Variations des températures dans le capteur solaire pendant le solstice d'hiver.

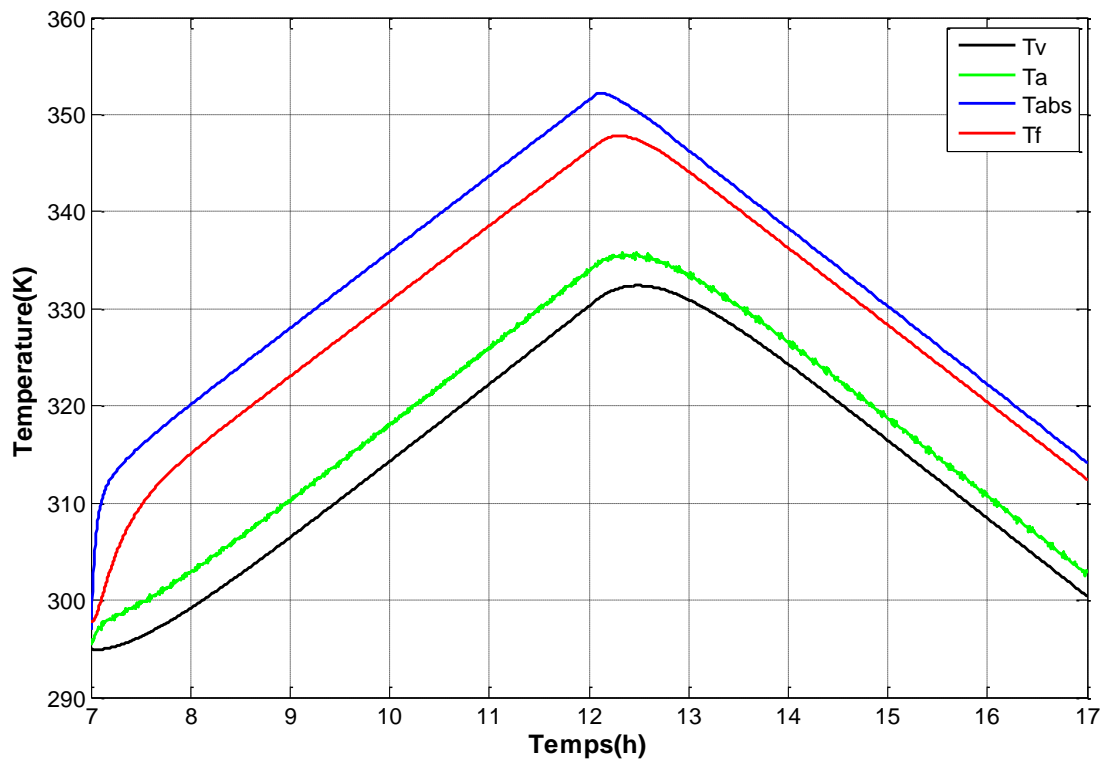


Figure IV.3 : Variations des températures dans le capteur solaire pendant le solstice d'été.

Dans les mêmes conditions, les figures IV.4 et IV.5 représente l'évolution de la température du fluide caloporteur à la sortie du capteur en fonction du temps et de la longueur du tube d'écoulement du fluide (courbe 3D).

Pour les deux solstices, la température du fluide caloporteur augmente avec la longueur du tube, la courbe de variation est exponentielle.

Les courbes augmentent avec le temps jusqu'au environ de midi, ensuite elles décroissent.

La valeur maximale est toujours inférieure à la température de l'absorbeur pour tout l'intervalle du temps.

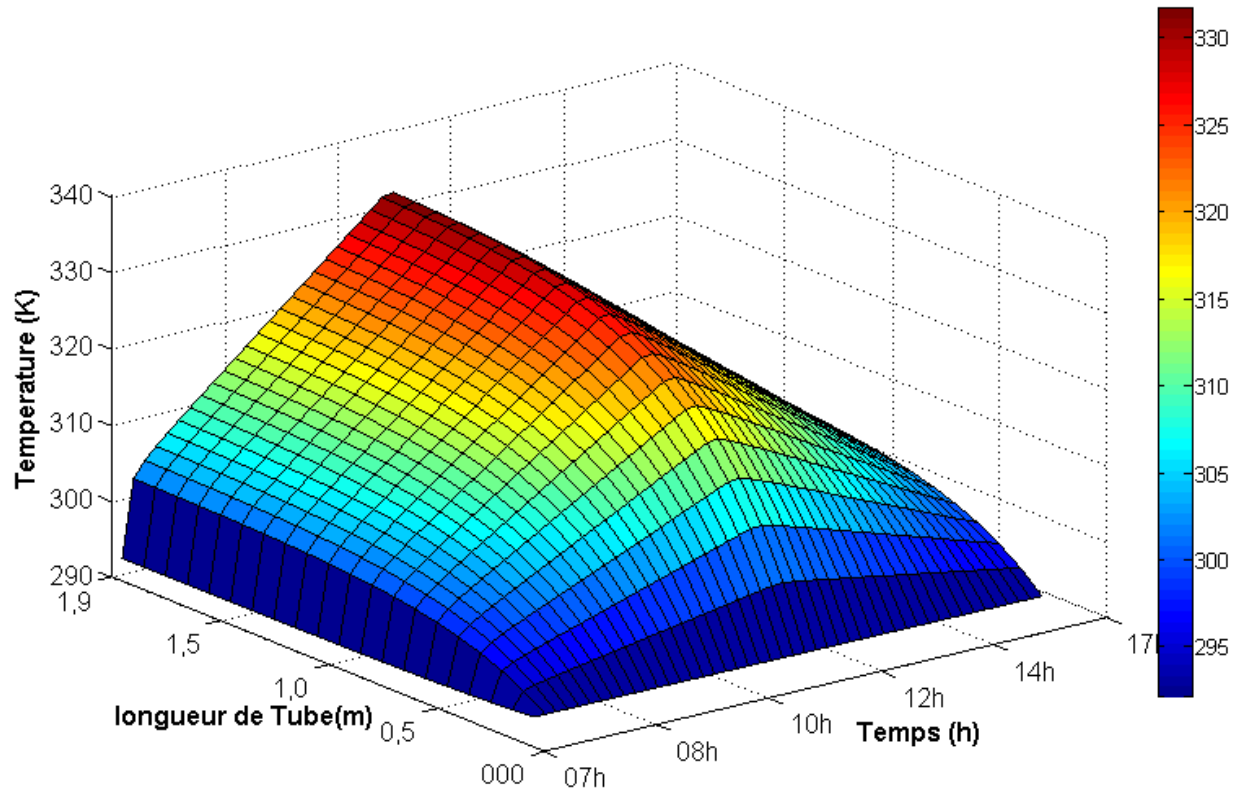


Figure IV.4 : Distribution simultanée de la température du fluide caloporteur selon la direction de l'écoulement et le temps (solstice d'hiver).

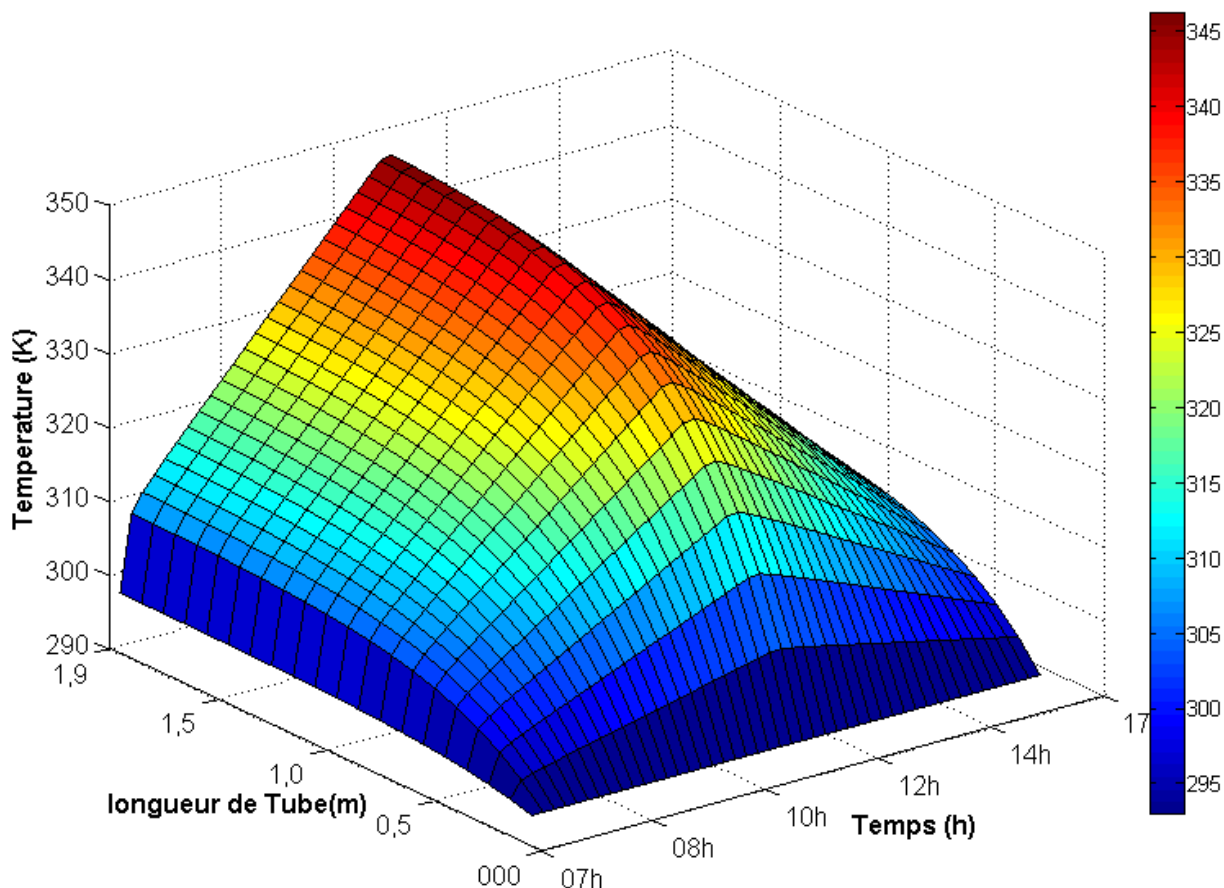


Figure IV.5 : Distribution simultanée de la température du fluide caloporteur selon la direction de l'écoulement et le temps (solstice d'été).

IV.7.3 Rendement du capteur

Dans ce qui suit, l'influence de quelques paramètres (T_{fe} , T_{amb} , G et \dot{m}_f) sur le rendement du capteur ont été étudié tout en limitant la représentation des résultats des simulations uniquement pour le solstice d'été (21 juin).

IV.7.3.1 Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur

L'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur sur le rendement instantané du capteur solaire est mis en évidence sur la figure IV.6 pour un débit de 0.006 kg/s.

Le rendement diminue avec la température d'entrée d'une manière linéaire, en effet l'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur étant étroitement liée à l'écart de température entre la sortie et l'entrée du fluide, il s'ensuit un abaissement de celle-ci et par conséquent du rendement instantané.

La courbe présente la même tendance que les courbes de rendement dans des situations similaires. [2]

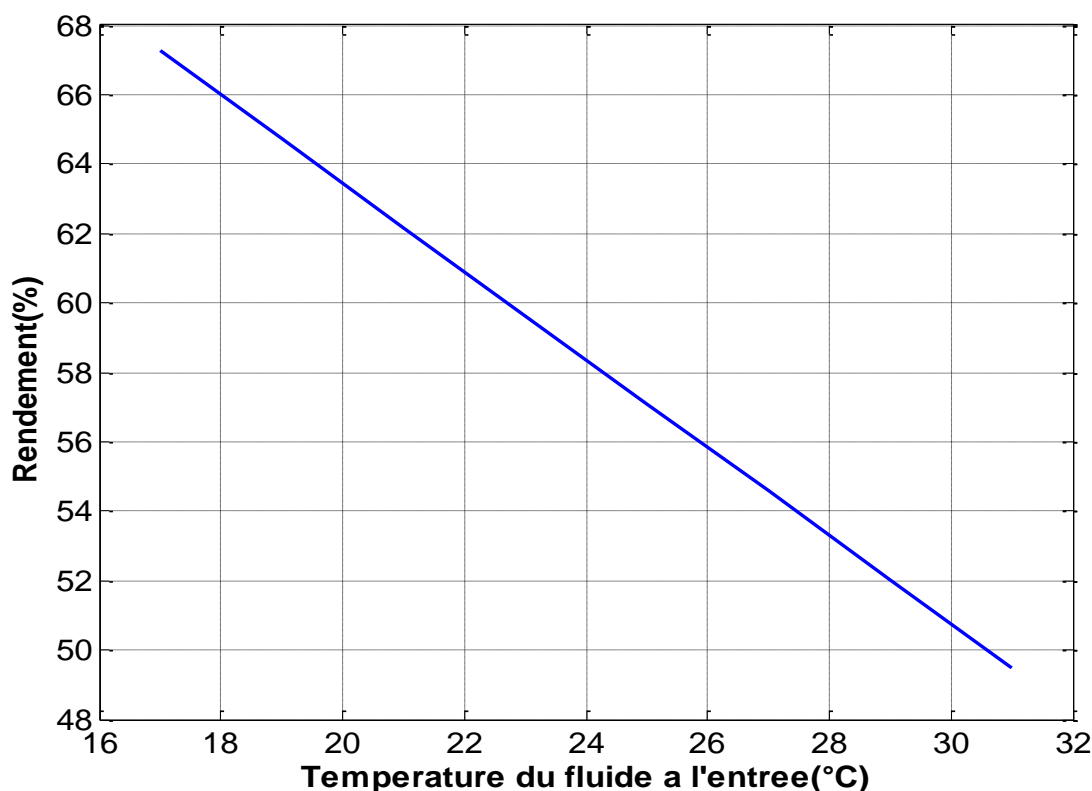


Figure IV.6 : Effet de la variation de la température du fluide à l'entrée sur le rendement.

IV.7.3.2 Effet du débit du fluide caloporteur

Pour une température d'entrée du fluide est constante, la figure IV.7 montre clairement que le rendement instantané du capteur solaire est une fonction linéaire croissante du débit du fluide.

En effet, l'augmentation du débit entraîne directement l'accroissement de la vitesse de l'écoulement du fluide d'où l'augmentation du nombre de Reynolds.

Ce nombre adimensionnel caractérise le type de l'écoulement du fluide qui peut être laminaire, transitoire ou turbulent.

On déduit que l'augmentation du débit augmente la turbulence de l'écoulement d'où la favorisation de transfert thermique convectif et par conséquent l'augmentation du rendement du capteur.

La courbe IV.7 présente aussi la même tendance que les courbes de rendement dans les situations similaires. [42] et [43]

On remarque que si on double le débit, le rendement est multiplié par deux, ce qui montre la forte influence de l'écoulement de l'eau sur le rendement du collecteur.

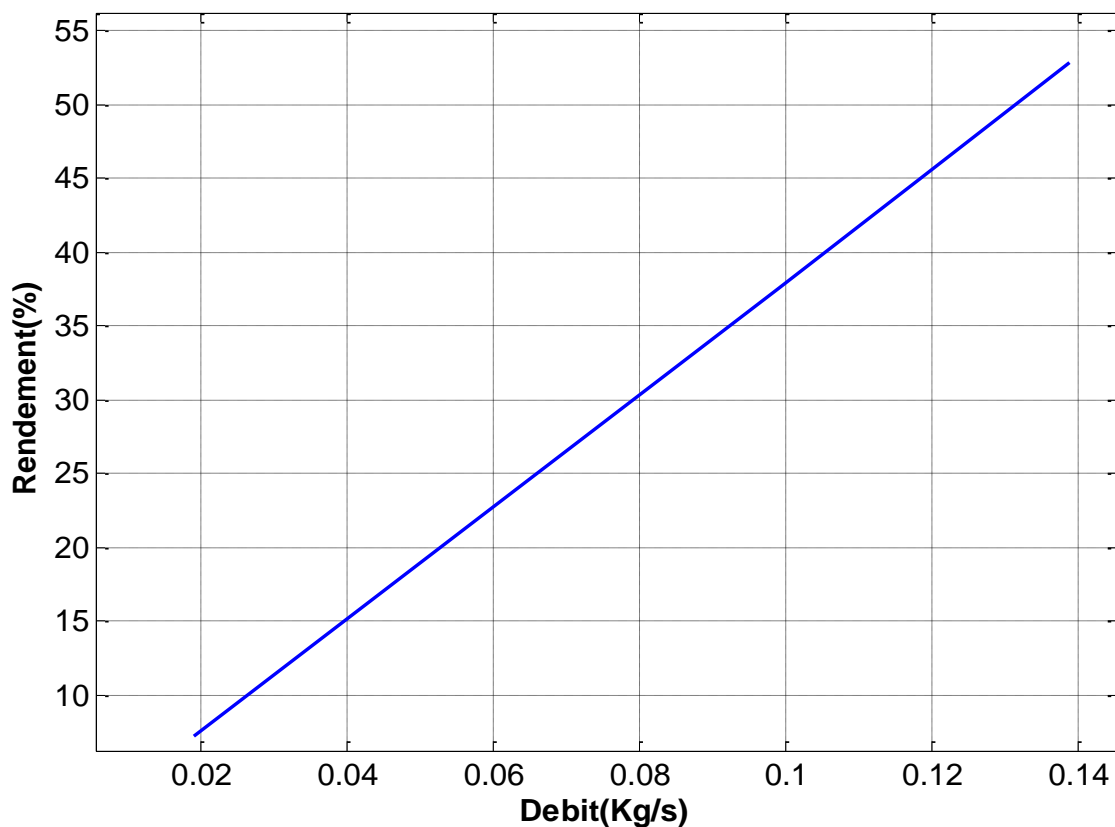


Figure IV.7 : Effet de la variation de débit du fluide caloporteur sur le rendement.

IV.7.3.3 Effet de la température ambiante

Il est aisé de remarquer sur la figure IV.8 l'allure croissante de la courbe de variation du rendement instantané du capteur en fonction de la température ambiante.

En effet, un abaissement de la température ambiante conduit à une diminution des températures des composants du capteur et par conséquent à un rendement moindre.

La courbe IV.8 présente la même tendance que les courbes de rendement dans une situation pareille. [2]

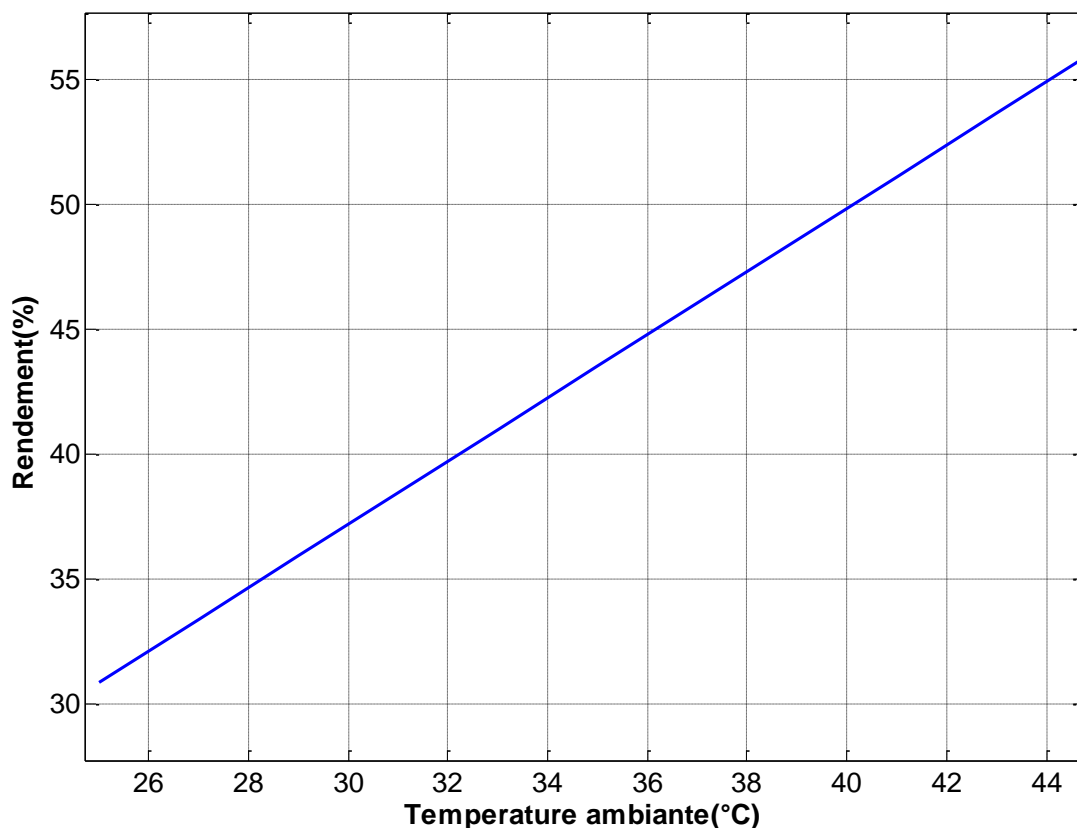


Figure IV.8 : Effet de la variation de la Température ambiante sur le rendement.

IV.7.3.4 Effet de rayonnement global

Pour une température de fluide à l'entrée fixe, la figure IV.9 montre que le rendement instantané du capteur est une fonction croissante du rayonnement solaire global, ceci s'explique par l'énergie de rayonnement absorbée par l'absorbeur qui fait augmenter la température de l'absorbeur et par conséquent la température de sortie fluide, ceci est traduit par l'équation du rendement (III.38).

La courbe IV.9 présente aussi la même tendance que les courbes de rendement dans une situation pareille. [2]

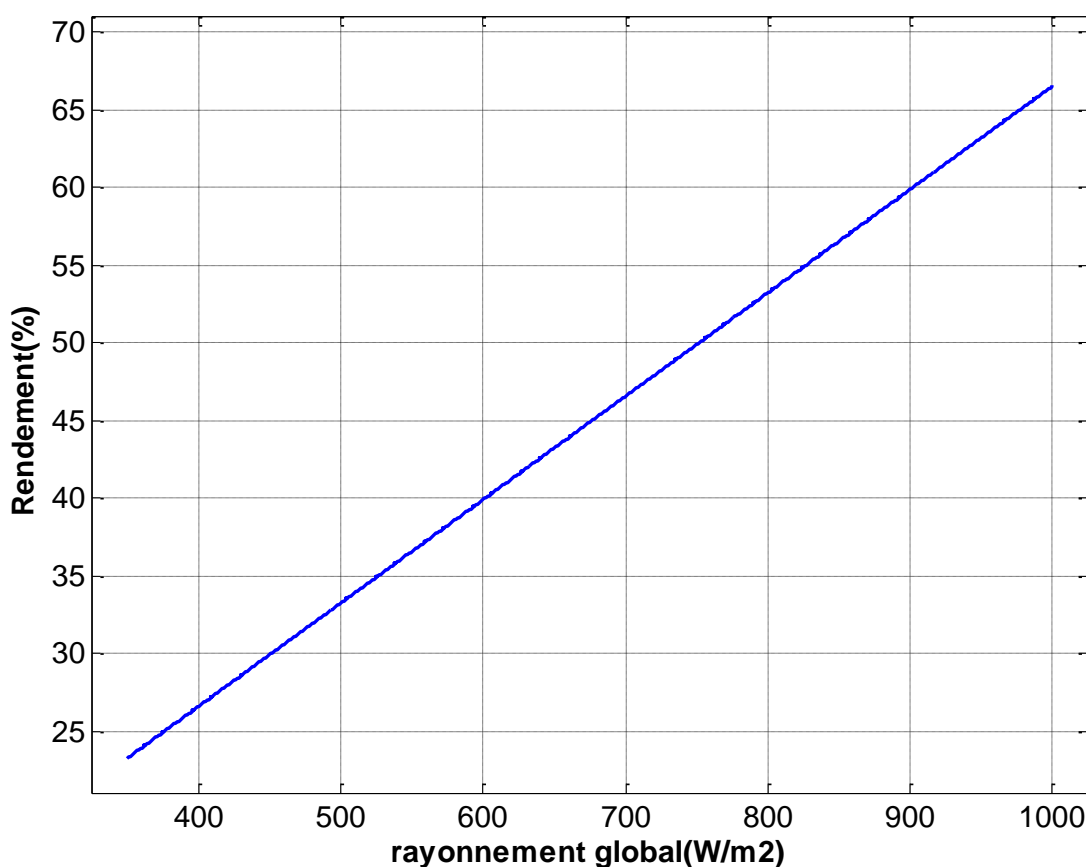


Figure IV.9 : Effet de la variation de rayonnement global sur le rendement.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les démarches essentielles suivies au cours de la modélisation de notre travail, ensuite on a présenté l'organigramme général pour le régime transitoire, en fin on a présenté quelques résultats graphiques tel que les températures des différents composants en fonction de temps, le rendement en fonction de (débit, température du fluide à l'entrée, la température ambiante et le rayonnement global).

Ainsi que le graphe qui donne la température du fluide à la sortie en fonction de la longueur des tubes et en fonction de temps.

A partir des résultats obtenus on constate que les paramètres extérieurs influencent proportionnellement sur le rendement du chauffe-eau, plus le rayonnement global incident est important.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris une étude théorique et numérique d'un capteur solaire plan à eau en régimes transitoire.

Après une présentation succincte de quelques données astronomiques, nous avons dressé un état de l'art des capteurs solaires plans.

Notre intérêt a porté par la suite sur les différents coefficients d'échanges thermiques par rayonnement et par convection entre la vitre et l'absorbeur d'une part, et entre la vitre et l'air ambiant d'autre part qui mis en jeu à l'intérieur d'un capteur afin d'établir les équations gouvernantes le comportement thermique de ce dispositif en régime transitoire.

La résolution du système d'équations discrétisées par la méthode numérique de Runge-Kutta d'ordre 4.

La température de la plaque absorbante est la plus élevée, ceci peut être justifié par son pouvoir d'absorption qui est important pour le rayonnement solaire, ce phénomène est plus accentué si la plaque est recouverte par une couche sélective.

La modélisation mathématique, basée sur la méthode des bilans globaux des énergies, prend en compte les conditions initiales associées aux différentes températures de capteur.

Les résultats de simulation numérique permettent de découvrir les profils de température de l'absorbeur, l'air confiné, le vitrage et le fluide caloporteur.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres internes (le débit du fluide caloporteur) et externes (le rayonnement global, T_{amb} et T_{fe}) sur le rendement instantané du capteur plan.

Il apparait clairement que le rendement instantané est une fonction proportionnelle de l'irradiation solaire globale qui joue un rôle prépondérant.

En outre, l'augmentation de la température de l'ambiance favorise l'amélioration du rendement instantané du capteur.

Par ailleurs, pour avoir un bon rendement il faut :

- Choisir une température d'entrée du fluide caloporteur assez faible.
- Avoir un débit élevé pour améliorer l'énergie utile récupérée.
- Que le capteur fonctionne à une température d'entrée du fluide caloporteur proche de la température ambiante.

- [1] S. Khalfallaoui, Dominique Seguin, Moulay Ahmed Abdelghani-Idrissi, “Étude d’un système solaire thermique ”, Université de Rouen, 8 Rue Lavoisier – 76821 Mont Saint Aignan Cedex.
- [2] S. Saadi, “ Effet des paramètres opérationnels sur les performances d’un capteur solaire plan ”, mémoire de magister, université Mentouri de Constantine, (2010).
- [3] C. Fröhlich, “World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation”, report WMO 490, p 108-112, (1978).
- [4] J. Bernard, “Energie solaire calculs et optimisation”, Ellipse Edition Marketing, (2004).
- [5] Z. Sen, “Solar energy fundamentals and modeling techniques”, Springer. (2008).
- [6] B. Zeroual, “ Polycopié « Cours des énergies renouvelables » ”, Université de Médéa,(2012).
- [7] S. El Mokhtar, R. Miri et M. Belhamel, “ Etude du bilan d’énergie et de masse d’un séchoir de type serre, applications au séchage des produits agro-alimentaires ”, Revue des Energies Renouvelables, Vol 7, p 109-123, (2004).
- [8] M. Capderou, “Atlas solaire de l’Algérie, O.P.U”, Alger, (1985).
- [9] A. Mefti, M. Y. Bouroubi, et H. Mimouni, “Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables”, N°2, p 12, décembre, (2002).
- [10] A. Ricaud, “Gisement solaire et transfert énergétiques”, Jan-(2011).
- [11] S. Petibon, “ Nouvelles Architectures Distribuées de Gestion et de Conversion de l’Energie pour les Applications Photovoltaïques ”, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Janvier, (2009).
- [12] O. Feddaoui, “Contribution à l’Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables”, Mémoire de Magister, Université de Souk - Ahras –(2014).
- [13] Le ministère de l’Energie et des Mines, “ Programme des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique ”, Algérie, Mars, (2011).
- [14] <http://www.outilssolaires.com/glossaire/prin-1geometrie.htm>.

- [15] P. Bessemoulin et J. Olivieri, “Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette ”, La Météorologie 8^{ème} série - n°31 – septembre, (2000).
- [16] H. B. Mohammed, “Modélisation et Etude Expérimentation d’un Capteur Solaire non Vitré et Perforé ”, Mémoire de Master, 06 juillet, (2011).
- [17] M. Akermi, “ Contribution à l’étude d’un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau et application aux sites de Tiaret et Adrar”, Mémoire de magister, université Abou Baker Belkaid, Tlemcen.
- [18] M. Bouhdiba, “ Simulation thermique d’une maison solaire pour la Production d’eau chaude sanitaire (ECS) ”, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, (2012).
- [19] A. Benkhalifa, “ 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”, Université Kasdi Merbah, Ouargla, (2012).
- [20] D.K. Edwards, “ Capteurs solaire”, Edition SCM, Paris, (1979).
- [21] L. House, “Renewable energy focus handbook”, USA: AP, (2009).
- [22] D. Ababsa, “ Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives ”, Mémoire de Magistère, Université El-Hadj Lakhdar, Batna, (2010).
- [23] B. Guendouz, “ L’utilisation de L’énergie solaire pour Les besoins de la climatisation ”, Mémoire de Magister, Université Abou Baker Belkaid, Tlemcen, (2012).
- [24] http://www.ines_solaire.com.
- [25] F. Chabane, “ Modélisations des paramètres de la conversion thermique de l’énergie solaire ”, Thèse de doctorat, Université de Biskra, (2012).
- [26] H. Abdi, “ Contribution à la détermination des performances de capteurs plans à contact direct eau-plaque d’absorption ”, Mémoire de Magister, Université de Blida, (1999).
- [27] K. Kaci et A. Belloua, “ Etude et réalisation d’un capteur solaire plan à contact direct eau plaque absorbante configuration “convexe” ”, Mémoire de PFE Energétique, Université de Blida, (1997).
- [28] C. Benbouza, “ Production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment-cas de l’Algérie”, Mémoire de Magister Université de Constantine, (2014).

- [29] S. Bekkouche, “ Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires ”, Thèse doctorat, l’université Abou-bakrBelkaid – Tlemcen, (2008).
- [30] J.M. Chasseriau, “ Conversion Thermique du Rayonnement Solaire”, Dunod, France, 273 pages, (1984).
- [31] S.V. Joshi, R.S. Bokil and J.K. Nayak, “Test standards for thermosyphon-type solar domestic hot water system: review and experimental evaluation”, *Solar Energy*, 78 (2005) 781–798.
- [32] M.R. Herrero, J. Perez-Garcia, A. Garcia, F.G Garcia-Soto and E. Lopez-Galiana, “ Simulation of an enhanced flat-plate solar liquid collector with wire-coil insert devices”, *Solar Energy*, 85, 455- 469, (2011).
- [33] J.A. Duffie and W.A. Beckman, “Solar energy thermal process”, Wiley Interscience, New York, (1974).
- [34] F.P. Incorpara, D.P. Dewitt, T.L. Bergman and V.S Lavine, “Fundamentals of heat and mass transfer”, Sixth edition, (2006).
- [35] Y. Jannot, “Thermique solaire”, Mars, (2011).
- [36] V.B. Sharma and S.C. Mullick, “Estimation of heat transfer coefficients, the upward heat flow, and evaporation in solar still”, *transactions of the ASME, Journal of Solar Energy Engineering* 113, 36–41, (1991).
- [37] W. CHKIROU, “ Analyse thermique pour l’absorbeur d’un concentrateur solaire cylindro_parabolique ”, Séminaire MAROC, du 15 au 17 Novembre, (2005).
- [38] M. Merzouk, “ Protocole et Banc d’Essai de l’étude expérimentale des capteurs solaires Plans ”, CDER.
- [39] N. Bakhvalov, “ Méthodes numériques ”, édition MIR, Mosow, (1984).
- [40] A. Gourdin et M. Boumahrat , “Méthodes numériques”, édition OPU, (1991).
- [41] S. A. Hakem , N. Kasbadji-Merzouk et M. Merzouk , “ Performances journalières d’un chauffe-eau solaire”, *Revue des Energies Renouvelables*, p 153-162, (2008).
- [42] A. Sfeir et G. Guarracino , “Ingénierie des systèmes solaires”, Technique et Documentation, Paris, (1981).
- [43] J. Desautel, “Les capteurs héliothermiques”, Edisud, (1979).

Annexe

Propriétés thermiques et optiques des différents composants du capteur plan

Les caractéristiques thermophysiques des matériaux métalliques pouvant constituer l'absorbeur d'un capteur solaire plan sont regroupés dans le tableau 1 :

Métal	Conductivité thermique (W/m. K)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg. K)	Absorptivité	Emissivité
Cuivre	384	8900	398	0.25	0.02
Acier inoxydable	14	7800	460	0.01	0.04
Aluminium	204	2700	879	0.63	0.09

Tableau 1 : Caractéristiques thermophysiques des matériaux métalliques.

Les propriétés optiques de quelques surfaces sélectives figurent dans le tableau 2. [41]

Support et traitement	Absorptivité de la surface	Emissivité de la surface	Effet de l'humidité
Acier et nickel noir sur nickel	0.95	0.07	Variable
Acier et chrome noir sur nickel	0.95	0.09	Sans effet
Acier et chrome noir	0.91	0.07	Oxydation rapide
Cuivre et chrome noir	0.95	0.14	Peu d'effet
Acier galvanisé et chrome noir	0.95	0.16	Couche sélective pèle rapidement
Cuivre et cuivre noir	0.88	0.15	
Acier et oxyde de fer	0.85	0.08	Peu d'effet
Alu et oxyde de manganèse	0.7	0.08	
Acier et couche organique sur oxyde de fer	0.9	0.16	Peu d'effet
Acier et couche organique sur chrome noir	0.94	0.2	Peu d'effet

Tableau 2 : Propriétés optiques de quelques surfaces sélectives.

Les propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes [5], [41] sont listées dans le tableau 3 :

Matériau	Epaisseur (mm)	Transmissivité (%)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg. K)	Conductivité thermique (W/m. K)
Verre à vitre	3	85-92	2700	840	0.93
Polycarbonate	3.2	82-89	1200	1260	0.2
Poly méthacrylate	3.2	89-92	1200	1460	0.2
Poly stérâmes	1	77-90	1400	1050	0.21
Poly fluor éthyle propylène	0.05	97	2.51	1170	0.25
Poly fluorure vinyle	0.1	93	1.5	1380	0.12

Tableau 3 : Propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes.

Le tableau 4 regroupe le degré d'émissivité de quelques matériaux :

Matériaux	Température (°C)	Emissivité
Aluminium nu après laminage	170	0.04
Aluminium anodisé noir	50	0.98
Béton	20	0.93
Glass lisse	0	0.97
Fer ponce	20	0.24
Verre	90	0.94
Cuivre légèrement ternis	20	0.04
Cuivre oxydé	130	0.79
Acier trempé	200	0.52
Acier oxydé	200	0.79

Tableau 4 : Degré d'émissivité de quelques matériaux.

Le tableau 5 donne les propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolants : [5]

Matériau	Conductivité thermique (W/m. K)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg. K)	Diffusivité thermique 10 ⁻⁷ m ² /s
Air à 20 °C	0.025	1.2	1003	208
Mousse de polyuréthane	0.029	30	1600	6
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène expansé	0.04	20	1500	13.3
Laine de roche	0.04	40	840	11.9
Laine (vêtement)	0.04	450	1880	0.47
Feutre d'amiante	0.047	116	800	5.1
Liège expansé	0.047	120	1830	2.9
Perlite	0.048	60	840	9.5
Silicate de calcium	0.052	200	920	2.8
Magnésie	0.055	200	880	3.1
Béton cellulaire	0.075	280	800	3.3
Vermiculite	0.09	80	880	12.8
Papier journal comprimé	0.105	130	1340	6
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Papier	0.14	700	1340	1.5
Bois de sapin	0.144	535	272	9.9
Caoutchouc	0.153	1200	2170	0.6
Pvc	0.166	1380	1000	1.2
Bois de chêne	0.198	825	2400	1
Plâtre	0.35	800	900	5.5
Brique	0.697	1700	800	4.6

Tableau 5 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants.

Résumé : Le travail présenté concerne l'analyse du comportement d'un capteur solaire plan à eau fonctionnant en régime transitoire. La modélisation mathématique, basée sur la méthode des bilans des énergies globaux, prend en compte les conditions initiales associées au capteur, cette modélisation fait appel à une estimation de l'évolution du flux solaire global. La résolution du modèle a été faite sous Matlab. Les résultats de la simulation numérique permettent de quantifier la dynamique de chaque élément de l'installation à savoir : la vitre, l'air confiné, l'absorbeur et le fluide caloporteur ainsi que l'évolution de la température de l'eau le long de son parcours dans les tubes. L'influence de quelques paramètres, tels que le débit du fluide caloporteur, la température ambiante, la température du fluide caloporteur à l'entrée et le rayonnement global sur le rendement du capteur a été étudié.

Mots clés : Absorbeur ; Capteur solaire plan ; Fluide caloporteur ; Régime transitoire ; Rendement.

ملخص : يتعلق هذا المشروع بتحليل ديناميكية سلوك ملتقط طاقة شمسية مسطح يعمل بالماء مع الأخذ بعين الاعتبار تغيير الزمن. تُبنى النمذجة الرياضية على مبدأ التوازن الطاقي الكلي مع الأخذ بعين الاعتبار الشروط الأولية المتعلقة بهذا الملتقط. يتم حلّ جملة المعادلات المحصّل عليها باستعمال البرنامج الحسابي ماتلاب. مكّنت النتائج المحصّل عليها من تقييم ديناميكية كلّ جزء من هذا الملتقط وهي الطبقة الزجاجية، الهواء المحبوس، المستوعب، و المائع الناقل للحرارة و كذا تغيير درجة حرارة الماء داخل الأنبوب. في الأخير تمّت دراسة تأثير التدفق و درجة حرارة الماء الداخل و الإشعاع الشمسي على المردود.

كلمات مفتاحية : مستوعب، ملتقط مسطح، نظام ديناميكي، المائع الناقل للحرارة، المردود.

Abstract: The present work deals with the analysis of the behavior of a flat-plate collector solar in transient mode. Mathematical modeling, based on the balance of global energy method takes into account the initial conditions associated with the collector, this model uses an estimate of the evolution of global solar flux. The resolution of the model was made in a Matlab environment.

The results of numerical simulation are used to quantify the dynamics of each element of the collector: glass, air, the absorber and the working fluid and changes in water temperature along the tubes. The influence of some parameters such as the mass flow rate of working fluid, the ambient temperature, the working fluid temperature at the entrance and the global radiation on the efficiency of the collector was carried out.

Keywords: Absorber ; Flat-plate collector solar ; Working fluid ; Transient regime ; Efficiency.