

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

UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

DE MASTER EN PHYSIQUE

Option : PHYSIQUE ENERGETIQUE

Thème:

Simulation numérique d'un capteur solaire plan

Présenté par :

- ❖ MAATALLAH FATIHA.
- ❖ KANBESSE AICHA BOUCHRA.

Encadré par : Mr. BADA ABDELMALEK

UNIV.D'ADRAR

Président : Mr. ABDELAOUI MUSTAPHA

UNIV.D'ADRAR

Examineurs : Mr. BOUMEDIENE OMARI

UNIV.D'ADRAR

Année universitaire : 2014/2015


Remerciements



Nous remercierons ALLAH de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous exprime nos gratitude, nos reconnaissances et nos sincères remerciements à Mr. BADA ABDELMALEK pour m'avoir encadré tout le long de nous projet, ainsi que les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail, à savoir Mr. HARROUZ ABDELKADER et Mr. ABDELAOUI MUSTAPHA qui n'ont pas hésité à accepter d'être membres de jury.

Nous remercierons tout l'encadrement et les encadreurs ainsi que l'équipage et personnel de l'université d'AHMED DRAÏA D'ADRAR.



*AICHA BOUCHRA * FATIHA*

Dédicaces

Je dédie les fruits de ce modeste travail :

À la mémoire de mon très cher père que dieu leur accueille dans son vaste paradis.

À ma mère .Ton affection, ton dévouement et tes encouragements m'ont toujours accompagnée et aidée à aller de l'avant. Merci pour tout ce que tu nous apportes quotidiennement. Que Dieu te garde pour nous.

Mes très chères sœurs : Aicha, Fatna, Saida, Kheira et Mebarqa.

Mes très chères frères : Ali, cheikh, Abdelkader et ses femmes.

À mes neveux et nièces: Yacine, Abdelmadjid, Anase, Mohamed, Mustapha , Zineb, Fatima azohra, Rahafe

À toute ma famille

À tous mes collègues et mes amis partout

À qui ma partager avec moi ce travail Kanbess Aicha Bouchra

À toute ma promotion physique énergétique 2014/2015.

À toutes qui mon aider de près ou de loin

Enfin À 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

Aux lecteurs de ce mémoire.

FATIHA



Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers Parents, pour leur soutien et tous les efforts qu'ils m'ont donné le long de mon parcours et je leurs souhaite bonne santé et longue vie.

A Mon frères et mes chères Sœurs.

A mon mari qui m'a beaucoup soutenu pendant l'accomplissement de cette étude.

A Toute Ma Famille.

À qui ma partagé avec moi ce travail Maatallah Fatiha

A tous mes enseignants chacun avec son nom.

A Toute la promotion physique énergétique sans exception.

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.



AICHA BOUCHRA

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| Remerciement | |
| Dédicace..... | |
| Sommaire | |
| Nomenclature..... | |
| Liste des figures | |
| Liste de tableaux | |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Etude bibliographique..... | 3 |
| I.1 Introduction..... | 3 |
| I.2 Différentes méthodes de Conversion de l'énergie solaire en énergie thermique | 3 |
| I.3 Étude bibliographique concernant le capteur solaire plan | 4 |
| Chapitre II : Rayonnement Solaire | 10 |
| II.1 Introduction | 10 |
| II.2 Estimation D'un rayonnement solaire | 10 |
| II.2.1 Constitution physique du soleil..... | 10 |
| II.2.1.1Coordonnées du soleil..... | 11 |
| II.2.1.1.1 Coordonnées équatoriales | 11 |
| II.2.1.1.2 Coordonnées horizontales | 12 |
| II.2.2 Le numéro de jour..... | 12 |
| II.2.3 Les temps solaires | 12 |
| II.2.4 Le couple terre soleil..... | 14 |
| II.2.4.1 Correction par la distance terre-soleil | 14 |
| II.2.4.2 La constante solaire..... | 14 |
| II.2.5 Heures de lever et de coucher du soleil | 15 |
| II.2.6 Durée d'insolation..... | 15 |
| II.2.7 Durée du jour | 15 |

| | |
|--|-----------|
| II.2.8 Taux d'insolation | 16 |
| II.3. Calcul du l'irradiation solaire | 16 |
| II.3.1 Irradiation solaire | 16 |
| II.3.1.1.Irradiation hors atmosphère | 17 |
| II.3.1.1.1 Eclaircement | 17 |
| II.3.1.1.2 Irradiation horaire | 17 |
| II.3.1.1.3 Irradiation journalière | 17 |
| II.3.1.2 Rayonnement solaire au sol | 18 |
| II.3.1.2.1 Notations | 18 |
| II.3.1.2.2 Indice de clarté | 18 |
| II.3.1.2.3 moyenne mensuelle diffuse..... | 19 |
| II.3.1.2.4 la moyenne mensuelle directe | 19 |
| II.3.1.2.5 Irradiation globale journalière mensuelle sur une surface inclinée | 19 |
| II.4 Modèles d'estimation du rayonnement solaire terrestre | 20 |
| II.4.1 Modèle de Capderou | 20 |
| II.4.2 Modèle de Perrin de Brichambaut | 21 |
| II.4.3 Modèle de Liu et Jordan | 22 |
| Chapitre III: Etude théorique et thermique d'un capteur solaire plan | 25 |
| III.1 Introduction | 25 |
| III.2 Rappels sur Les différentes modes de transfert de chaleur | 25 |
| III.2.1 Transfert de chaleur par conduction | 25 |
| III.2.2.1 Loi de Fourier | 26 |
| III.2.2.2 Résistance thermique | 26 |
| III.2.2.3 Equation générale de la chaleur | 27 |
| III.2.2 Transfert de chaleur par Convection | 27 |
| III.2.2.1 Nombres sans dimension | 28 |
| III.2.2.2 Flux de chaleur en convection forcée | 29 |

| | |
|---|----|
| III.2.2.3 Flux de chaleur en convection naturelle | 30 |
| III.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement | 30 |
| III.2.3.1 Emittance (totale) | 30 |
| III.2.3.2 Le corps noir | 30 |
| III.2.3.3 Loi du rayonnement thermique | 30 |
| III.2.3.4 Transfert par rayonnement entre surface | 31 |
| III.2.3.5 Réception du rayonnement par un solide | 32 |
| III.3. Les capteurs solaire | 33 |
| III.3.1 Définition d'un capteur solaire | 33 |
| III.3.2 Différents types de capteurs solaires | 33 |
| III.3.3 Principaux éléments constituant un capteur plan | 38 |
| III.3.3.1 L'absorbeur | 39 |
| III.3.3.2 La couverture transparente | 41 |
| III.3.3.3 L'isolant..... | 43 |
| III.3.3.4 Le fluide caloporteur | 45 |
| III.3.4 Classification des capteurs solaires plans | 46 |
| III.3.5 Principes de fonctionnement | 48 |
| III.3.6 Les avantages et les inconvénients d'un capteur solaire plan | 49 |
| III.4 Analyse thermique de capteur solaire plan | 49 |
| III.4.1 Bilan thermique et calcul de rendement | 50 |
| III.4.1.1 La puissance absorbée | 50 |
| III.4.1.2 Flux utile | 51 |
| III.4.1.3 Flux perdu | 51 |
| III.4.1.4 Flux stocké | 52 |
| III.4.2 Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire | 52 |
| III.4.2.1 Méthode par tranche | 52 |
| III.4.2.2 Évaluations des coefficients des échanges radiatif et convectif | 57 |

| | |
|--|-----------|
| III.4.2.3 Perte globale d'énergie..... | 59 |
| III.4.2.4 Rendements d'un capteur solaire | 61 |
| Chapitre IV : Modélisation,Simulation et analyse des résultants | 63 |
| IV.1 Introduction..... | 63 |
| IV.2 Modélisation de rayonnement solaire | 63 |
| IV.2.1 Estimation de l'irradiation incidente sur le plan du capteur | 63 |
| IV.2.1.1 Inclinaison optimale d'un capteur | 63 |
| IV.2.1.1.1 Organigramme de calcul numérique du modèle recherché l'angle optimale | 64 |
| IV.3 Modélisation du capteur solaire | 76 |
| IV.3.1 Méthode de résolution numérique | 76 |
| IV.3.1.1 Principe de la méthode de Gauss Seidel | 76 |
| IV.3.2 Etude paramétrique | 77 |
| IV.3.2.1 Variation temporelles des températures des différentes parties du capteur | 77 |
| IV.3.2.2 Influence de la localisation géographique sur la productivité (cas d'hiver) | 77 |
| IV.3.2.3 Influence de l'épaisseur de l'isolation sur la production solaire | 78 |
| IV.3.2.4 Influence de la distance entre l'absorbeur et le vitrage sur la production solaire | 79 |
| IV.3.2 .5 Etude de performance de système | 79 |
| Conclusion générale..... | 80 |
| Référence bibliographique | 82 |
| Annexe | |
| Résumé..... | |
| ملخص..... | |

NOMENCLATURE

| | | |
|-----------------|---|---------------------------------------|
| φ | Latitude de lieu | [Deg] |
| δ | Déclinaison solaire | [Deg] |
| ω | Angle horaire | [Deg] |
| n | numéro du jour dans l'année | [Jour] |
| A | Azimut du soleil | [Deg] |
| h | Hauteur du soleil | [Deg] |
| T _{SV} | Temps solaire vrai | [Heure] |
| T _{SM} | Temps solaire moyen | [Heure] |
| C | Constante solaire | [w/m ²] |
| s | Durée d'insolation effective d'un jour | [Heure] |
| s ₀ | Durée astronomique du jour | [Heure] |
| I | Eclairement solaire | [w/m ²] |
| I ₀ | Irradiation horaire | [w.m ⁻² .h ⁻¹] |
| H ₀ | Irradiation Journalière | [w/m ²] |
| \bar{H} | Rayonnement solaire moyen, mensuel mesuré sur un surface horizontale au niveau du sol | [w/m ²] |
| \bar{H}_0 | Rayonnement solaire moyen mensuel hors de l'atmosphère | [w/m ²] |
| K _T | Indice de clarté | |
| \bar{H}_b | Rayonnement moyen, mensuel direct sur un surface horizontale | [w/m ²] |
| \bar{H}_d | Rayonnement moyen, mensuel diffus sur un surface horizontale | [w/m ²] |
| \bar{H}_T | Irradiation journalière moyenne globale sur plan incliné | [w.h] |
| \bar{H}_b | Irradiation journalière moyenne direct sur plan horizontale | [w.h] |
| \bar{R}_b | Facture de conversion | |
| <i>alb</i> | Albédo au sol | |
| β | Angle d'inclinaison | [Deg] |
| ω_s | Angle horaire du coucher de soleil sur le plan horizontal | [Deg] |

| | | |
|-----------------|--|---------------------------------------|
| ω'_s | Angle horaire du coucher de soleil sur le plan incliné | [Deg] |
| I | Rayonnement global horaire sur une surface horizontale | [w/m ²] |
| I _d | Rayonnement diffus horaire sur une surface horizontale | [w/m ²] |
| I _b | Rayonnement direct horaire sur une surface horizontale | [w/m ²] |
| I _{bβ} | Rayonnement direct sur une surface inclinée | [w/m ²] |
| $I_{d\ c\beta}$ | Irradiation diffuse sur un plan incliné | [w/m ²] |
| I _{iβ} | Irradiation réfléchie sur un plan incliné | [w/m ²] |
| ϕ | Flux de chaleur | [w] |
| λ | Conductivité thermique du milieu | [w/(m °C)] |
| C _p | Chaleur massique | [J/(kg.°k)] |
| ρ | Masse volumique | [kg/m ³] |
| h | Coefficient de transfert de chaleur par convection | [W m ⁻² °C ⁻¹] |
| T _p | Température de surface du solide | [°C] |
| T _∞ | Température du fluide loin de la surface du solide | [°C] |
| μ | Viscosité dynamique | [PI] |
| σ | La constante de Stefan Boltz mann | |
| α | Coefficient d'absorption | |
| ε | Coefficient d'émission | |
| ζ | Taux de transmission | |
| L | Longueur du capteur plan à air | [m] |
| l | Largueur du capteur plan à air | [m] |
| D _H | Diamètre hydraulique m | |
| \dot{m} | Débit d'air massique | [Kg/s] |
| d | Distance entre la vitre et l'absorbeur | [m] |
| G | Flux solaire global reçu par le capteur plan | [w/m ²] |
| Q _s | Flux solaire absorbé | [w/m ²] |
| Q _p | Flux perdu par la paroi absorbante | [w/m ²] |
| Q _u | Flux utile transmis au fluide caloporteur | [w/m ²] |
| Q _{st} | Flux stocké dans le capteur | [w/m ²] |
| T _a | Température ambiante | [°C] |

| | | |
|-----------------|--|----------------------|
| T_V | Température de la vitre | [°C] |
| T_P | Température d'absorbeur | [°C] |
| T_{fm} | Température moyenne du fluide caloporteur | [°C] |
| T_{P1} | Température de la plaque d'aluminium près de l'isolant | [°C] |
| U_{av} | Coefficient des pertes thermiques à l'avant de la vitre | [W/m ² k] |
| U_{ar} | Coefficient des pertes thermiques à l'arrière du capteur | [W/m ² k] |
| U_L | Coefficient des pertes totale | [W/m ² k] |
| h_{rv-c} | Coefficient de transfert radiatif entre la vitre la voûte céleste | [W/m ² k] |
| h_{rv-p} | Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre | [W/m ² k] |
| $h_{r,p-p1}$ | Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium | [W/m ² k] |
| $h_{c,v-a}$ | Coefficient de transfert convectif entre la vitre et l'air ambiant | [W/m ² k] |
| $h_{c,p-v}$ | Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la vitre | [W/m ² k] |
| $h_{c,p-f}$ | Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et le fluide | [W/m ² k] |
| $h_{c,f-p1}$ | Coefficient de transfert convectif entre le fluide et la plaque d'aluminium | [W/m ² k] |
| $h_{c,p1-a}$ | Coefficient de transfert convectif entre l'isolant et l'ambiance | [W/m ² k] |
| ε_V | Emissivité de la vitre | |
| ε_a | Emissivité de l'absorbeur | |

Liste des figures

Chapitre I

| | |
|---|---|
| Figure (I-1) : variation de l'efficacité (%) en fonction de la variation du taux de débit massique (kg/hm ²) a-double vitrage, b-triple vitrage..... | 5 |
| Figure (I-2) : (a) : Influence de la hauteur du canal d'écoulement sur les variations horaires de la température de sortie du fluide caloporteur, (b) : Influence de la hauteur du canal d'écoulement sur rendement thermique..... | 6 |
| Figure (I-3) : différentes formes d'ailettes ajoutées à l'absorbeur pour améliorer l'efficacité de l'absorbeur..... | 6 |
| Figure (I-4) : Capteur avec des chicane rectangulaire sur la plaque inférieure en bois..... | 7 |
| Figure (I-5) : Evolution du rendement du capteur en fonction du débit volume de l'air pour les deux configurations de capteurs (avec chicane et absorbeur sélectif..... | 8 |
| Figure (I-6) : Influence de la sélectivité sur le rendement du capteur..... | 9 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Figure (II-1) : spectre des ondes électromagnétique..... | 10 |
| Figure (II-2) : Energie solaire reçu par la surface du capteur..... | 11 |
| Figure (II-3) : Evolution mensuelle de la constante solaire..... | 14 |

Chapitre III

| | |
|---|----|
| Figure (III-1) : Echange de chaleur par conduction..... | 25 |
| Figure (III-2) : Résistance thermique..... | 27 |
| Figure (III-3) : Transfert de chaleur par convection..... | 28 |
| Figure (III-4) : Transfert de chaleur par rayonnement..... | 32 |
| Figure (III-5) : Réception du rayonnement..... | 33 |

| | |
|--|-----------|
| Figure (III-6) : Capteur plan de type vitré..... | 34 |
| Figure (III-7) : Capteurs solaires plans sans vitrage..... | 35 |
| Figure (III-8) : Capteur solaire à tubes sous vide..... | 36 |
| Figure (III-9) : Concentrateur cylindro-parabolique..... | 37 |
| Figure (III-10) : Concentrateur parabolique..... | 37 |
| Figure (III-11) : Système de centrale à tour..... | 38 |
| Figure (III-12) : Coupe schématique d'un capteur solaire plan..... | 38 |
| Figure (III-13) : peinture noire sur absorbeur..... | 40 |
| Figure (III-14) : Transparence du verre..... | 42 |
| Figure (III-15) : Schéma des différentes pertes..... | 45 |
| Figure (III-16) : Principe de fonctionnement du capteur solaire plan..... | 49 |
| Figure (III-17) : Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire..... | 50 |
| Figure (III-18) : Schéma électrique relatif à une section du capteur..... | 53 |
| Figure (III-19) : Tranche fictive de longueur dx..... | 55 |

Chapitre IV

| | |
|---|-----------|
| Figure IV.1 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 10°..... | 65 |
| Figure IV.2 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 25°..... | 65 |
| Figure IV.3 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 45°..... | 66 |
| Figure IV.4 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 60°..... | 66 |
| Figure IV.5 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 90°..... | 67 |
| Figure IV.6 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 10°..... | 67 |
| Figure IV.7 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 25°..... | 68 |
| Figure IV.8 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 45°..... | 68 |
| Figure IV.9 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 60°..... | 69 |

| | |
|---|----|
| Figure IV.10 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 90° | 69 |
| Figure IV.11 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 10° | 70 |
| Figure IV.12 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 25° | 70 |
| Figure IV.13 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 45° ... | 71 |
| Figure IV.14 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 60° | 71 |
| Figure IV.15 : Irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 90° ... | 72 |
| Figure (IV-16) : Irradiation globale journalière mensuelle pour une inclinaison optimale de chaque mois..... | 73 |
| Figure (IV-17) : Irradiation globale journalière mensuelle pour une inclinaison optimale saisonnière..... | 74 |
| Figure (IV-18) : Irradiation globale journalière mensuelle pour une inclinaison optimale saisonnière..... | 75 |
| Figure (IV-19) : Energie acquise annuellement par quatre inclinaisons..... | 76 |
| Figure (IV-20) : Variation temporelles des températures des différentes parties du capteur.. | 77 |
| Figure (IV-21) : Evaluation de la température de capteur dans différents sites (Mois Décembre)..... | 78 |
| Figure (IV-22) : Evaluation de la température de l'absorbeur en fonction d'épaisseur de l'isolant (Mois Décembre)..... | 78 |
| Figure (IV-23) : Variation les températures de l'absorbeur en fonction de la distance (Mois Décembre)..... | 79 |
| Figure (III.24) : Rendement thermique en fonction du temps..... | 80 |

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau (II-1) : Valeurs des coefficients A, B et C.....24

Chapitre III

Tableau (II-1) : Différents traitements de surface.....40

Tableau (II-2) : Coefficient d'absorption α et le coefficient d'émission ε pour les supports les plus utilisés comme absorbeur.....40

Tableau (II-3) : Transmissivité de divers types de couvertures dans les gammes du visible et de l'infrarouge.....43

Tableau (II-4) : Conductivité thermique de quelque matériau.....44

Chapitre IV

Tableau (IV-1) : Irradiations maximales en hiver.....72

Tableau (IV-2) : Valeurs de l'angle optimal pour chaque mois et l'énergie maximale correspondante.....73

Tableau (IV-3) : Valeurs des angles moyennes d'inclinaison saisonnière et de l'irradiation globale correspondante.....74

Tableau (IV-4) : Caractéristiques du capteur simulé.....77

L'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit, l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelable au premier rang des quelles l'énergie solaire.

D'autre part, l'échauffement climatique causé par l'émission des gaz à effets de serre a conduit beaucoup de pays à s'intéresser à des énergies propres.

L'énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique)[1].

L'énergie solaire est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent. Le règne végétal, dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique via la photosynthèse. A l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice, l'énergie solaire est à l'origine de toutes les énergies sur Terre [2].

Grâce à divers procédés, l'énergie solaire peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou la chaleur obtenue à partir de cette dernière[akram mus].

L'application de l'énergie solaire peut être regroupée en deux catégories principales : les applications à hautes températures (les concentrateurs solaires et capteurs solaires sous vide), et les applications à basses températures : (les capteurs plans comme destinés pour le chauffage, la réfrigération et le séchage...etc.)[1].

L'objectif de ce présent travail est étudiée un logiciel informatique qui permet de simuler le rayonnement solaire et les performances thermiques des capteurs plan .

Pour ce faire, nous avons adopté et choisi une approche théorique, pour la modélisation du rayonnement solaire.

Pour l'estimation des irradiances incidentes sur un plan incliné, nous avons adopté le modèle de **Liu & Jordan**. De ce fait, nous allons ensuite exploiter ces résultats pour évaluer les performances thermiques du capteur par la méthode de **Gauss Seidel**.

Dans ce travail, on a structuré le manuscrit en quatre chapitres essentiels comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons exposer une synthèse bibliographique sur quelques travaux disponibles dans la littérature qui traitent le côté thermique avec des études énergétiques en générale effectuées sur les capteurs solaires plans.

Dans le second chapitre, nous donnons les notions générales sur les coordonnées géographiques, ainsi que l'énergie captée sur une surface donnée et les différentes relations entre les valeurs horaires.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude des différents modes de transfert de chaleur et l'étude théorique d'un capteur solaire plan, ses différents constituants, ses classifications, les différents paramètres qui influent sur son rendement, son mode de fonctionnement, les différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur et les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système.

Le quatrième chapitre présente une modélisation et simulation mathématique du capteur. Celles-ci ont permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

I.1 Introduction

La production de l'énergie thermique à partir de l'énergie solaire est aujourd'hui une des techniques les plus prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux.

Actuellement il y a plusieurs millions de m² des capteurs et de systèmes solaires installés dans le monde utilisant les technologies les plus récentes.

La plus grande part de recherche est consacrée au développement des capteurs solaires du point de vue performance thermique en général tenant en compte de tout les paramètres qui influent sur leur comportements, nous entendons ici les paramètres de conception (géométriques, thermo-physiques et optiques).

I.2 Les Différentes méthodes de Conversion de l'énergie solaire en énergie thermique :

Grâce à divers procédés, l'énergie solaire peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, et en électricité.

I.2.1 L'énergie solaire thermique

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

en usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire ; en usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage: centrales solaires thermodynamiques, froid solaire [3].

1/ L'eau chaude solaire

La production d'eau chaude sanitaire est actuellement l'application la plus répandue de l'énergie solaire thermique. L'installation classique comprend essentiellement un groupe de capteurs plans, une capacité de stockage et généralement un dispositif de régulation et une source d'appoint. La température de l'eau chaude sanitaire est en effet relativement réduite et les capteurs solaires plans conviennent bien à ce type de production d'eau chaude [3].

2/ chauffage solaire

Si le système de chauffage nécessite des pièces mobiles (ventilateur, pompe, électrovanne....) il s'agira d'un système actif. Un tel système nécessite une énergie autre que solaire ; en général celle-ci est électrique vu sa souplesse d'utilisation. Quand la seule énergie utilisée est celle du soleil, cela sera un système passif.

Pour le chauffage d'habitation, le fluide caloporteur est soit l'air, soit l'eau. L'air est utilisé principalement dans les systèmes passifs. On peut en effet se passer facilement d'énergie auxiliaire pour le mouvoir. L'air est chauffé par les capteurs puis envoyé directement dans les pièces d'habitation. Le stockage de l'énergie se fait alors par léchage d'un matériau solide (mur en béton, lit de pierres,...). Il peut cependant être intéressant de recourir à des ventilateurs pour créer une circulation forcée ; les puissances mises en jeu sont toujours faibles, de l'ordre de celles nécessaires au fonctionnement d'une VMC (ventilation mécanique contrôlée).

L'utilisation de l'eau nécessite un échangeur. Son avantage réside dans le volume de stockage nécessaire, beaucoup plus faible qu'avec l'air. Dans ce cas on trouvera sur le circuit, une ou plusieurs pompes (circulateurs), des électrovannes, etc [4].

3/ La cuisinière solaire

Le principe de la cuisinière solaire requiert une certaine concentration du rayonnement solaire puisqu'il est nécessaire d'atteindre des températures comprises entre 100 et 300°C.

Des réflecteurs paraboliques constitués de plaques d'aluminium peuvent être utilisés, les aliments sont placés au foyer. Le critère qui doit guider la mise au point de tels dispositifs, est bien sûr la recherche de cuisinières susceptibles d'être construites sur place, dans les pays pauvres et ensoleillés avec des matériaux à moindre coût [1].

4/ Les fours solaires

Dans les fours solaires on réalise une concentration importante du rayonnement, généralement obtenue au moyen de miroirs paraboliques, qui exigent une construction particulièrement soignée .

La température au foyer peut atteindre 3500 °C. Elle permet le traitement thermique de matières ultra-réfractaires, la fabrication de céramiques ultra-résistante à la chaleur, la fabrication de verres spéciaux, etc. C'est une technologie très coûteuse, réservée à des emplois spécifiques. Leur avantage réside dans l'obtention de produits de qualité nettement supérieure à celle obtenue au four électrique [5].

I.3 Étude bibliographique concernant le capteur solaire plan :

L'étude des paramètres qui influent sur les performances thermiques des capteurs solaires plans à air a fait l'objet de plusieurs recherches. Nous exposons quelques travaux disponibles dans la littérature qui traitent le côté thermique avec des études énergétiques en générale effectuées sur les capteurs solaires plans.

La plus part des capteurs solaires couverts utilisés sont à couverture simple, à double ou triple. Parmi les travaux de recherches qui ont été entamés dans cette perspective, nous citons le travail effectué par **S.Youcef-Ali [6]** qui a montré dans une étude expérimentale, que la couverture triple donne des performances plus importantes que celle à double vitre grâce à la minimisation des pertes vers l'extérieur, Figure (I.1).

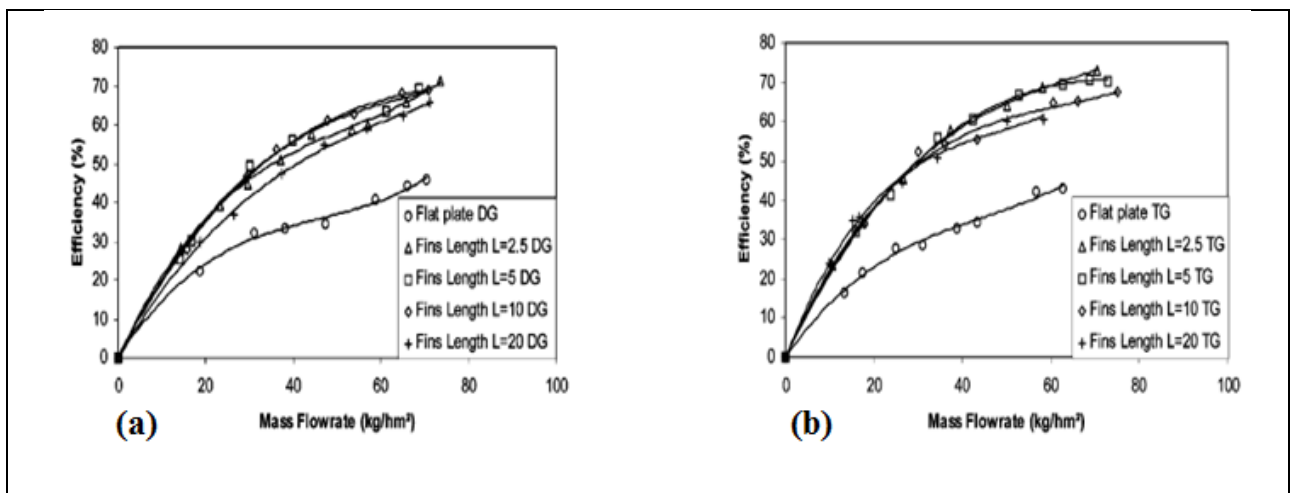


Figure (I-1) : Variation de l'efficacité (%) en fonction de la variation du taux de débit massique (kg/hm^2) **a**-double vitrage, **b**-triple vitrage [6].

Dans ce cadre, **Donation Njomo [7]** a souligné d'après une étude numérique, qu'un capteur avec double couverture de matière différente (ici la couverture extérieure est en plexiglace et celle intérieure est en verre) a des performances meilleures qu'un capteur à deux vitres de même matière.

Ils trouvaient que la température de sortie du fluide caloporteur, ainsi que le rendement thermique journalier du capteur, diminuent lorsque le débit d'air augmente, par contre la température de sortie du fluide caloporteur ne croît pas de manière significative avec l'augmentation de sa température d'entrée, car les pertes thermiques du capteur augmentent rapidement quand la température de l'air à l'entrée augmente, et le rendement thermique journalier du capteur décroît linéairement avec l'augmentation de la température d'entrée du fluide jusqu'à s'annuler. Ils observaient aussi, que la température de sortie du fluide

caloporteur, ainsi que le rendement thermique journalier du capteur, décroissent continuellement quand on augmente la hauteur du canal d'écoulement du fluide.

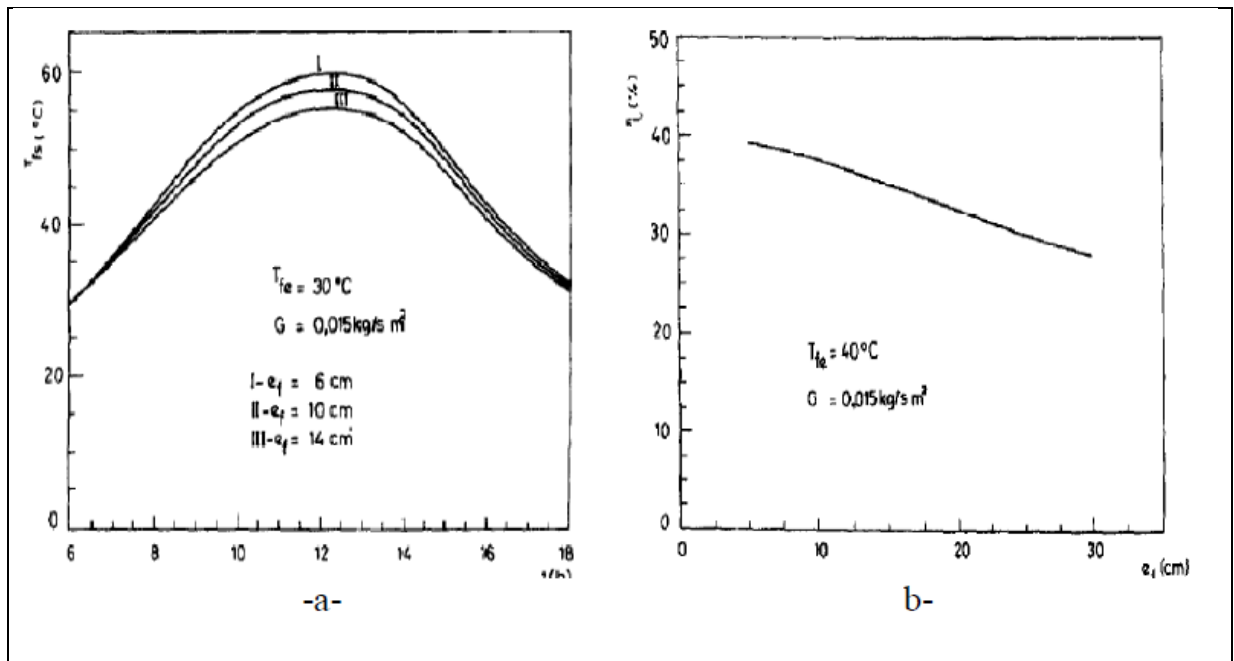


Figure (I-2) (a) : Influence de la hauteur du canal d'écoulement sur les variations horaires de la température de sortie du fluide caloporteur, (b) : Influence de la hauteur du canal d'écoulement sur rendement thermique [7].

Suleyman Karsali [8] a illustré que l'allongement du capteur solaire influe fortement sur son efficacité. De ce fait, des chercheurs ont proposé d'augmenter le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (sans toucher les dimensions du capteur) par l'ajout des obstacles (ailettes, Figure I-3) jointes à la face inférieure de l'absorbeur selon **A. Abene et al [9]**, **S. youcef-Ali [6]**, les obstacles peuvent augmenter la surface d'échange, réduire les zones mortes et créer la turbulence. **A. Abene et al [9]** ont montré que la forme, les dimensions, l'orientation et la disposition de ces obstacles influents considérablement sur l'efficacité du capteur (comme souligné par **K. R. Ahrwal et B. K Gandhi [10]**).

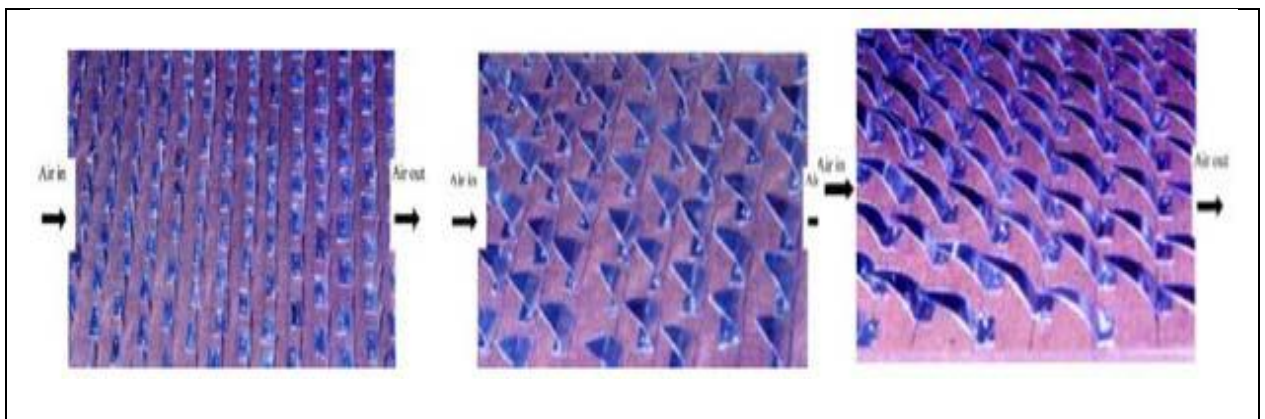


Figure (I-3) : Différentes formes d'ailettes ajoutées à l'absorbeur pour améliorer l'efficacité de l'absorbeur [9].

N.Moummi et al [11], leur travail s'est intéressé aux capteurs plans à air avec des chicanes rectangulaires placées perpendiculairement sur le plan d'écoulement dans la veine fluide mobile du conduit, ce qui a permis de produire au sein de la lame un courant d'air plus turbulent entre l'absorbeur et la plaque arrière en bois, ce qui a abouti à une amélioration du rendement de ces capteurs solaires et le coefficient du transfert. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus avec un capteur solaire sans chicanes Figure. (I.4), en utilisant deux types d'absorbeurs sélectifs et non sélectifs en aluminium peint en noir.

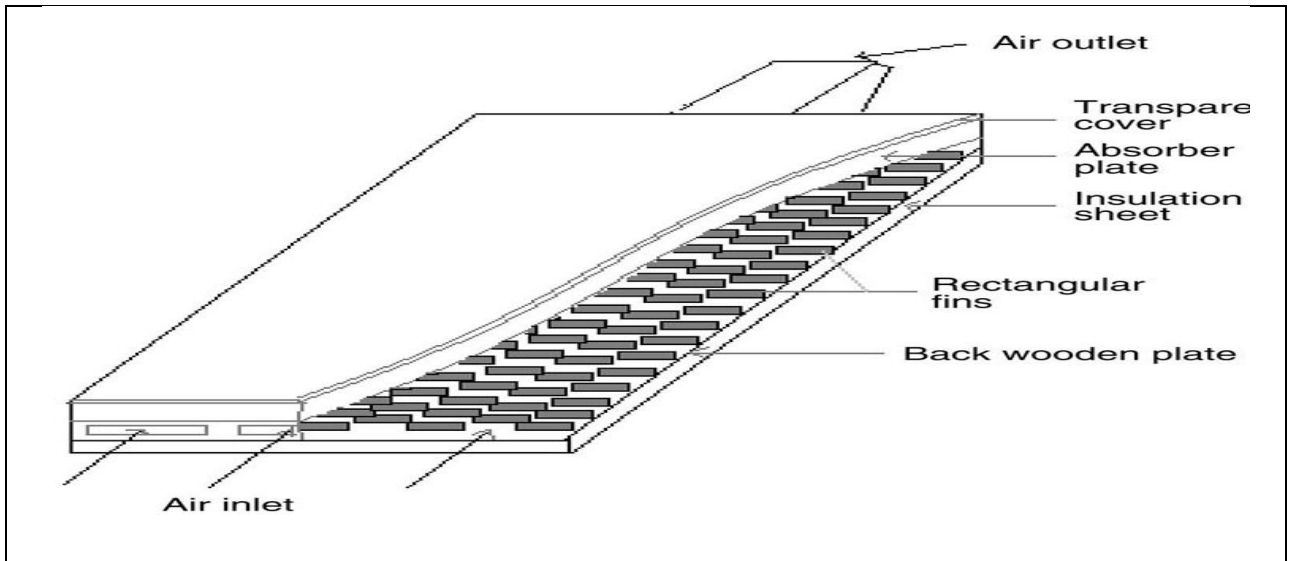


Figure (I-4) Capteur avec des chicanes rectangulaire sur la plaque inférieure en bois [11].

L'évolution des profils de la température de l'air et de la plaque de l'absorbeur en présence des chicanes rectangulaires, montre que les valeurs enregistrées sont satisfaisantes par suite d'addition de plusieurs rangées de chicanes, ce qui a permis d'augmenter sensiblement la qualité du transfert de la chaleur, ces même résultats obtenus sont comparés à ceux enregistrés avec un capteur muni d'un absorbeur sélectif, ou il ne représente pas d'améliorations remarquables par rapport à celui en présence de chicanes Figure.(I.5). Par conséquent les pertes thermiques sont considérables, alors que si l'absorbeur est sélectif, les pertes sont relativement réduites et la différence des coefficients d'émission est dédommée par la présence des chicanes qui refroidissent l'absorbeur. Elle donne aussi une approche approximative sur le calcul du coefficient de transfert convectif dans le conduit utile de l'écoulement de l'air.

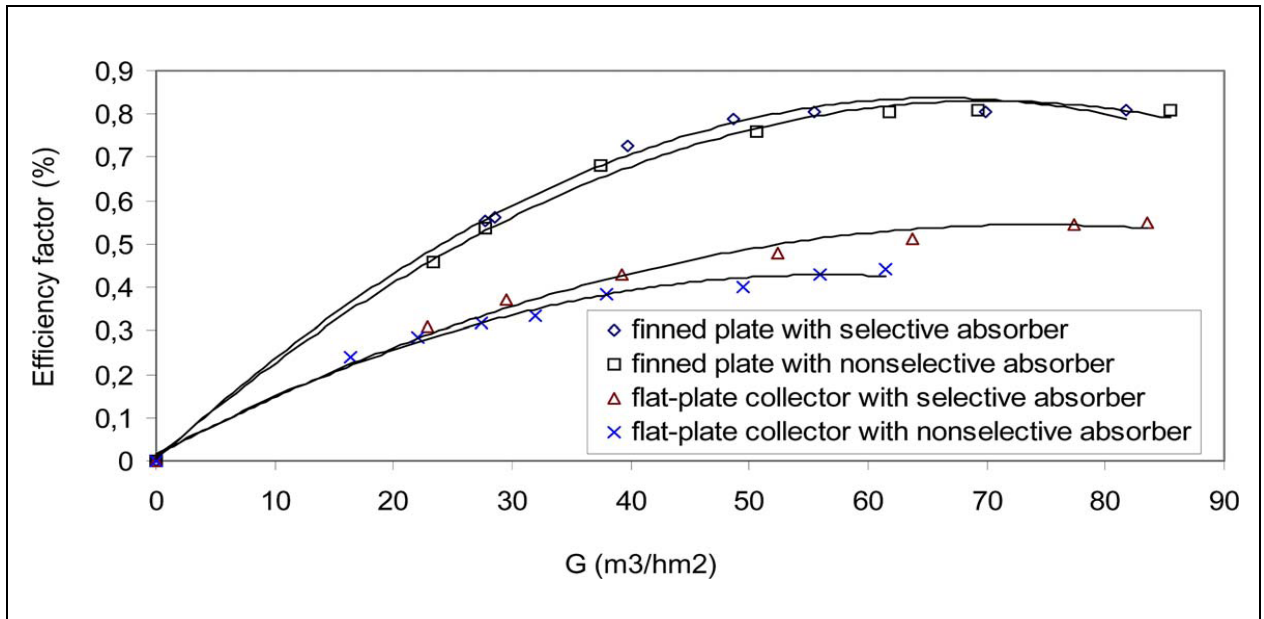


Figure (I-5) Evolution du rendement du capteur en fonction du débit volume de l'air pour les deux configurations de capteurs (avec chicane et absorbeur sélectif [11]).

T. Letz et M.Lallemand [12], Leur travail concerne l'analyse du comportement d'un capteur solaire plan à air fonctionnant en régime dynamique. Un modèle basé sur une résolution des équations des bilans thermiques par une méthode nodale a été établi. Sa validation est réalisée à partir d'essais effectués en ensoleillement naturel et en ensoleillement artificiel.

L'écart absolu entre les rendements théoriques et expérimentaux est inférieur à 3 %. La sensibilité du rendement à différents paramètres, accessibles ou non par l'expérience, a été étudiée ; en particulier il s'agit de la sélectivité de l'absorbeur, de l'importance des fuites d'air, et des conditions de fonctionnement du capteur.

La figure (I-6) représente l'influence de la sélectivité de l'absorbeur pour le capteur expérimental de référence et pour un capteur identique muni d'un absorbeur non sélectif ($\alpha = \varepsilon = 0,91$). Les courbes obtenues s'écartent lorsque la température d'entrée de l'air augmente.

L'absorbeur sélectif permet pratiquement de doubler le rendement pour une température d'entrée d'air de 60 °C. Dans un capteur à air, l'absorbeur est toujours beaucoup plus chaud que l'air caloporteur, et les pertes radiatives sont très grands. L'utilisation d'un absorbeur sélectif permet une diminution très importante de ces pertes.

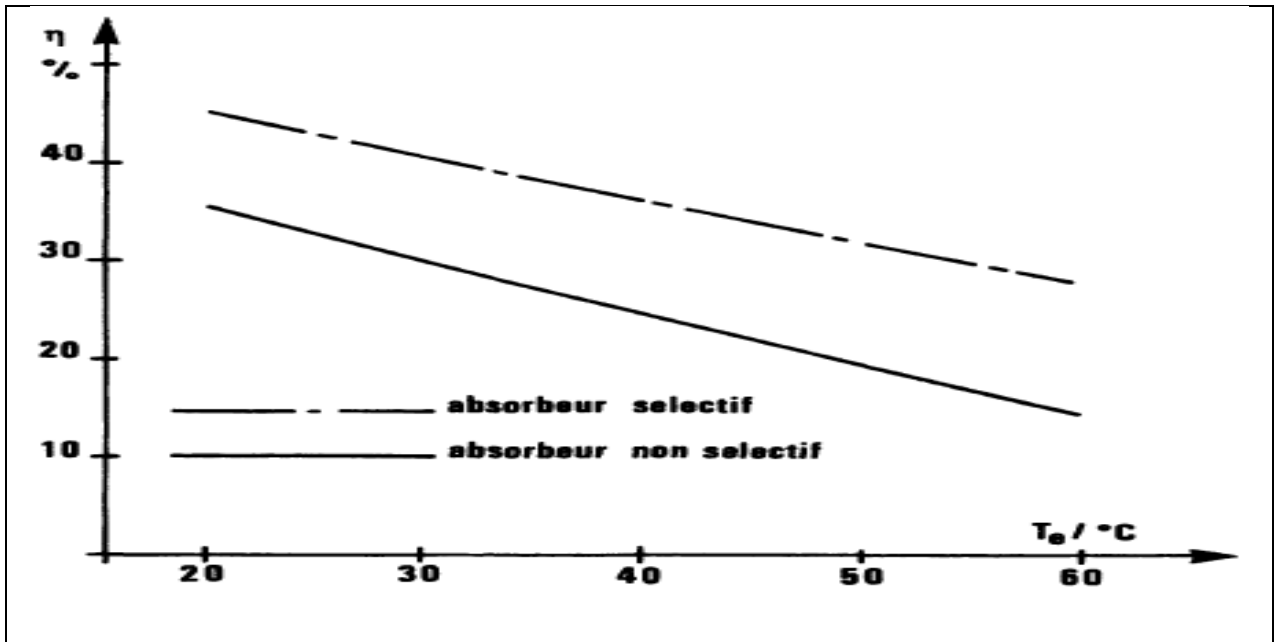


Figure (I-6) Influence de la sélectivité sur le rendement du capteur [12].

Ils ont conclu que le comportement des capteurs solaires à air étudiés en ensoleillement naturel et en ensoleillement artificiel de façon à mieux maîtriser les paramètres dont dépend le rendement. Il est à noter que ce type de capteurs, montés en toiture, a une inertie relativement importante qui entraîne une faible valeur du rendement du capteur en début de journée, et une valeur plus élevée en fin de journée. Alors que le débit d'air dans le capteur et la température d'entrée ont une grande influence sur le rendement, par contre l'inclinaison du capteur et l'éclairement n'ont qu'une légère influence. La modélisation en régime dynamique prend en considération le comportement du capteur avec une bonne précision, elle confirme le rôle important de l'inertie du capteur, et permis de mettre en évidence l'intérêt des absorbeurs sélectifs pour les capteurs à air qui permettent une amélioration considérable des rendements lorsque la température d'entrée de l'air est élevée. Les fuites, inévitables dans les capteurs à air, diminuent la température de sortie de l'air. Le modèle permet également de corriger les mesures faites sous simulateur ; ainsi une surestimation du rendement en ensoleillement artificiel de l'ordre de 10 % a été mise en évidence.

Un autre facteur influe aussi sur l'efficacité du capteur, c'est bien, la tuyauterie, qui est généralement soudée à la partie inférieure de l'absorbeur et des fois fait partie de l'absorbeur, sa forme diffère d'un capteur à un autre. Parmi ces différentes formes, la forme sinusoïdale est la plus efficace, puisque elle offre la plus grande surface d'échange et réduit les zones mortes, comme il est montré par **Marwa. M. Hassan et Yvan Beliveau [13]**.

II.1 Introduction

La ressource de base la plus importante pour tous les potentiels énergétiques renouvelables est l'énergie solaire. La terre reçoit une importante quantité d'énergie solaire au cours de l'année. Le rayonnement est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption et diffusion, suivant les conditions météorologiques [14].

Pour exploiter cette ressource énergétique, il est nécessaire de connaître la quantité de flux disponible à une région spécifique. Pour cela nous présentons dans ce chapitre une notion générale sur les coordonnées géographiques, ainsi que l'énergie captée sur une surface donnée et les différentes relations entre les valeurs horaires.

II.2 Estimation D'un Rayonnement Solaire :

II.2.1 Constitution physique du soleil

Le soleil apportait, grâce à l'étude de son rayonnement comme une sphère incandescente de plasma dont la température d'émission serait de 5.800 K. Son diamètre angulaire est de l'ordre d'un demi-degré ce qui fixe le rayon du soleil à 700.000 Km en prenant comme distance moyenne terre-soleil 150 millions de Km (8 minute lumière), des mesurés précises (Daniel LAPLAE) effectuées à bord de satellites, qui gravitent à la limite de l'atmosphère terrestre, montrent que la distribution spectrale du rayonnement solaire est voisine de celle du corps noir idéal à la température 5800 K [14].

Cependant des différences apparaissent dans le domaine des rayons X de ultra-violet et de l'infra-rouge comme nous pouvons le lire sur le spectre suivant :

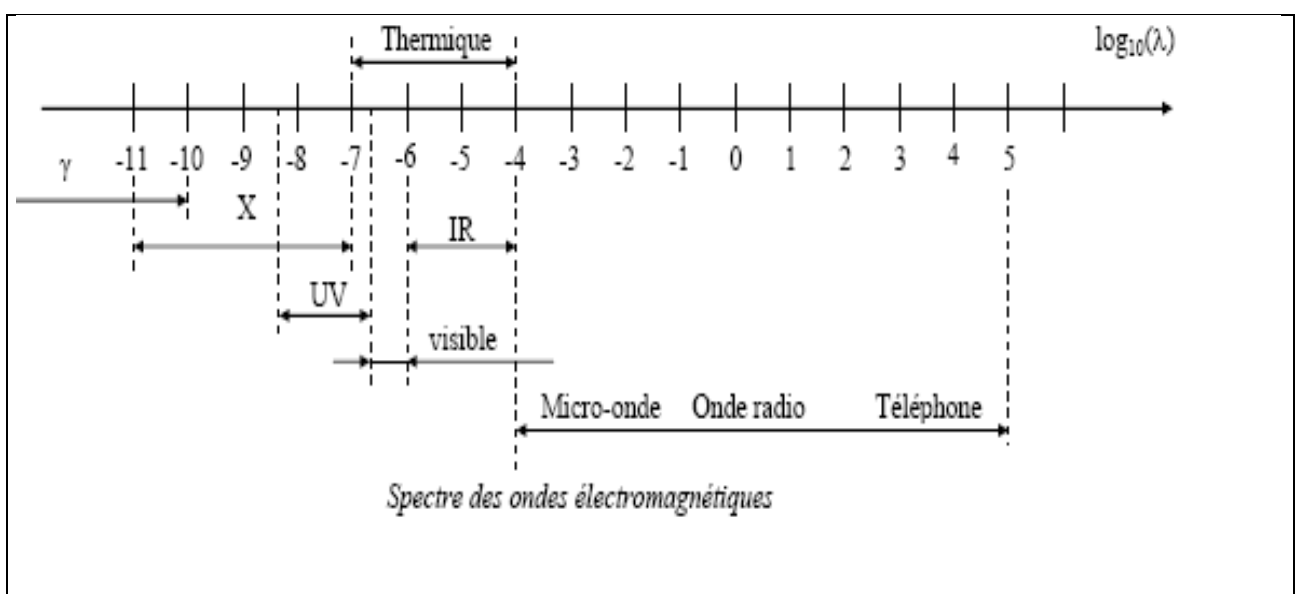


Figure (II-1) spectre des ondes électromagnétique [14].

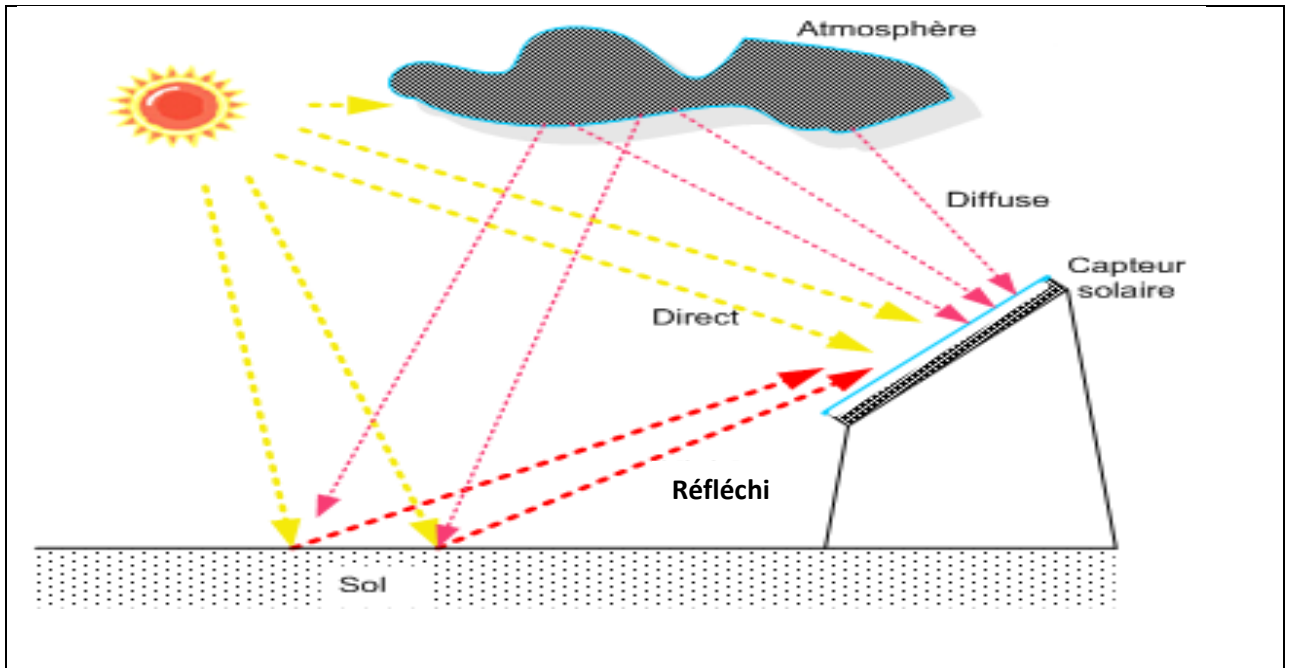


Figure (II-2) Energie solaire reçu par la surface du capteur [14].

II.2.1.1. Les coordonnées du soleil [2]

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents

- ❖ Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- ❖ Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

II.2.1.1.1. Coordonnées équatoriales :

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ , ω).

✚ La déclinaison δ :

C'est l'angle que forme le vecteur centre de terre \rightarrow soleil et le plan équatorial de la terre. La déclinaison varie de $+23.45^\circ$ au solstice d'été (21 juin) à -23.45° au solstice d'hiver (22 décembre) en passant par la valeur zéro aux équinoxes (21 mars et 23 septembre).

La déclinaison est définie par la relation suivante:

$$\delta = 23.27 \sin \left[\frac{360}{365} (j + 284) \right] \quad [\text{Deg}] \quad (\text{II} - 1)$$

j : représente le numéro d'ordre du jour dans l'année.

✚ L'Angle horaire:

Elle mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qu'est l'instant où le soleil au plan méridien du lieu (zénith). Ah est négatif si le temps solaire est inférieur à 12h.

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad [^\circ] \quad (\text{II} - 2)$$

TSV : temps solaire vrai.

II.2.1.1.2 Coordonnées horizontales

La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles:

✚ L'Hauteur solaire :

C'est l'angle formé par le plan horizontal du lieu considéré et le vecteur point local soleil calculable par l'expression suivante :

$$h = A \sin[\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega] \quad [\text{Deg}] \quad (\text{II} - 3)$$

Avec :

φ : La latitude

δ : déclinaison

ω : Angle horaire

✚ L'azimut du soleil :

L'azimute solaire est l'angle horizontal formé par le plan méridien (axe nord-sud) et le plan vertical « point local-soleil ». Le signe de l'azimut est même que celui de l'angle horaire.

$$A = \arcsin \left[\frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \right] \quad [\text{Deg}] \quad (\text{II} - 4)$$

II.2.2 Le numéro d'ordre des jours :

Avec j représente le numéro d'ordre du jour dans l'année (1 pour le 1er janvier). Prenons par exemple la journée du 16 juin 2007 [15].

$$j = 31 + 28 + 31 + 30 + 31 + 16 = 167[\text{jour}] \quad (\text{II} - 5)$$

Donc la déclinaison sera :

$$\delta = 23.27 \sin \left[\frac{360}{365} (167 + 284) \right] = 23.35[\text{Deg}] \quad (\text{II} - 6)$$

II.2.3 Les temps solaires :

Pour les applications de l'énergie solaire, il faut faire intervenir le temps solaire vrai, qui est calculé en tenant compte de l'écart entre le temps solaire moyen et le temps local.

➤ **Temps solaire vrai TSV:**

Le temps solaire vrais, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil, ce temps est indiqué par les cadrans solaires et les héliographes, Il est donné par la relation suivante [15] :

$$TSV = TSM + ET \quad [\text{Heure}] \quad (\text{II} - 7)$$

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad [\text{Heure}] \quad (\text{II} - 8)$$

Ou :

TSM : Temps solaire moyenne.

ET : Equation du temps (écart).

▪ **Equation du temps ET:**

C'est l'erreur ou l'écart de temps ($\pm ET$) causé par la variation de la vitesse de la terre au tour du soleil [16] :

$$ET = 9.9 \sin[2(0.986j + 100)] - 7.7 \sin(0.986j - 2) [\text{Min}] \quad (\text{II} - 9)$$

Si on remplace par le numéro des jours dans l'équation du temps on obtient l'écart suivant :

$$ET = 0.43 [\text{Min}] = 0.0071 [\text{Heure}] \quad (\text{II} - 9)$$

➤ **Temps solaire moyenne TSM:**

Le temps solaire moyen est appelé parfois temps local, dépend de la longitude et du temps universel son expression est [16]:

$$TSM = Tu + \frac{L}{15} \quad [\text{Heure}] \quad (\text{II} - 10)$$

Ou :

L: La longitude du lieu.

Tu : Le temps universel.

➤ **Temps universel Tu:**

Le temps universel est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine), appelé encore GMT (Greenwich Mean Time). Il est donné par la relation suivante [16] :

$$TU = TSM \frac{L}{15} [\text{Heure}] \quad (\text{II} - 11)$$

Où :

L : est la longitude .Tel que :

L < 0 : Pour les sites situés à l'Est de Greenwich.

L = 0 : Pour les sites situés au méridien de Greenwich.

➤ **Le temps légal (TL) :**

Le temps légal est une heure liée au TU par une différence fixe exprimée en un nombre entier d'heures qui dépend de la longitude et des coutumes de chaque pays. Il est donné par la relation suivante [16] :

$$TL = TU + DH [\text{Heure}] \quad (\text{II} - 12)$$

Avec :

DH : étant le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré,

(DH =1 heure pour l'Algérie).

Tu : Le temps universel.

II.2.4 Le couple terre soleil

II.2.4.1 Correction par la distance terre-soleil

Les variations annuelles de la distance terre-soleil sont dues au fait que la trajectoire autour du soleil est une ellipse [16].

Elles se traduisent par des variations du rayonnement hors atmosphère (L'éclairement solaire direct extra-terrestre).Le coefficient de correction (γ) du à cette variation de la distance a été déterminé à partir de la position de la terre sur son orbite en fonction du quantième jour de l'année, ce coefficient est donné par la relation :

$$\gamma = 1 + 0.034 \cos \left[\frac{360}{365} (j - 3) \right] \quad (\text{II} - 13)$$

j: représente le numéro d'ordre du jour dans l'année.

II.2.4.2 La constante solaire :

C'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire [14].

La variation de la constante solaire suit la relation suivante :

$$C = C_0 + 0.033. \cos(0.948. n) \quad (\text{II} - 14)$$

Avec :

C : la constante solaire.

$C_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue

n: le numéro du jour de l'année.

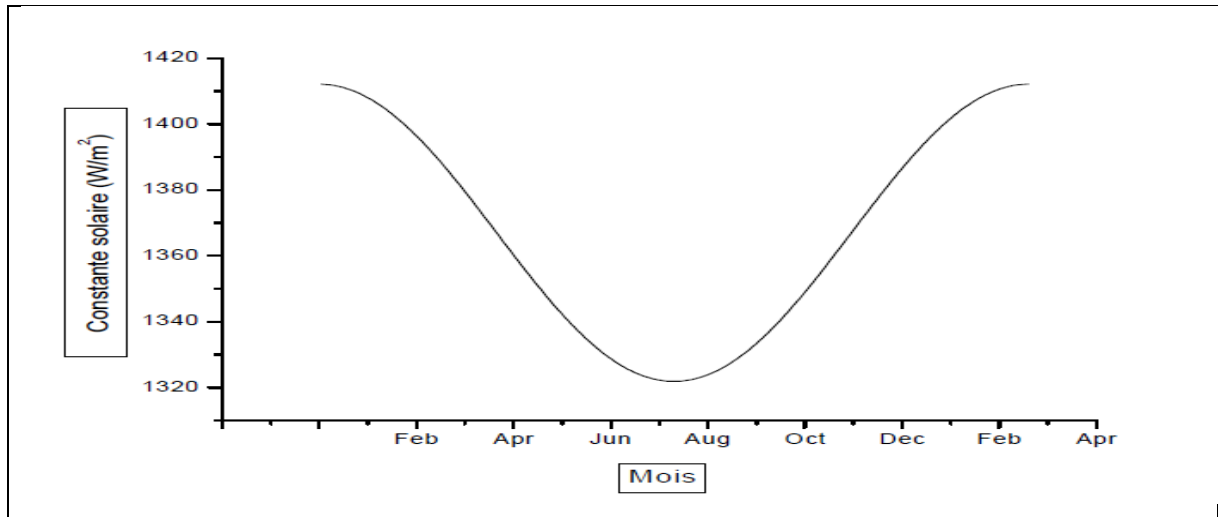


Figure (II-3) Evolution mensuelle de la constante solaire [14].

II.2.5 Heures de lever et de coucher du soleil:

A partir de la latitude et de la déclinaison, il est possible de connaître l'heure solaire vraie du lever et du coucher de soleil [17] :

$$T_{SV\text{ Lev}} = 12 - \frac{\arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]}{15} \text{ [Heure]} \quad (\text{II} - 15)$$

$$T_{SV\text{ Cech}} = 12 + \frac{\arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]}{15} \text{ [Heure]} \quad (\text{II} - 16)$$

II.2.6 Durée d'insolation:

La durée d'insolation représente la durée maximale de la journée [17]:

$$D_{\text{insol}} = \frac{2}{15} \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \text{ [Heure]} \quad (\text{II} - 17)$$

$$D_{\text{insol}} = T_{SV\text{ Cech}} - T_{SV\text{ Lev}} \text{ [Heure]} \quad (\text{II} - 18)$$

Alors :

$$T_{SV\text{ Lev}} = 4\text{h } 44\text{min} \quad \text{Heure du lever soleil.}$$

$$T_{SV\text{ Cech}} = 19\text{h } 16\text{min} \quad \text{Heure du coucher soleil.}$$

$$D_{\text{insol}} = 14\text{h } 32\text{min} \quad \text{Durée d'insolation.}$$

II.2.7 Durée du jour [5]

Le jour est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donne une hauteur h du soleil nulle sont appelés : lever et le coucher du soleil.

La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire :

$$\sin(h) = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (\text{II} - 19)$$

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$\sin(h) = \cos \varphi \cdot \cos \delta (\cos \omega + \tan \delta \tan \varphi) \quad (\text{II} - 20)$$

$$\sin(h) = 0 \Rightarrow \cos \omega + \tan \delta \tan \varphi = 0 \quad (\text{II} - 21)$$

Cette équation donne deux racines, le coucher correspondant à la racine positive et le lever à la racine négative.

$$\omega_{couch} = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (\text{II} - 22)$$

$$\omega_L = -\omega_c \quad (\text{II} - 23)$$

$$s_0 = \frac{\omega_{couch} - \omega_{Lev}}{15} = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (\text{II} - 24)$$

Avec :

δ : La déclinaison.

φ : L'attitude du lieu.

S_0 : La durée maximale.

II.2.8 Taux d'insolation

Par ciel clair et pendant la durée de jour d'ensoleillement s_0 (du lever au coucher du soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'ensoleillement (s) d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale [17].

Le taux d'insolation est donné par l'expression :

$$\tau_{inso} = \frac{s}{s_0} \quad (\text{II} - 25)$$

La durée maximale s_0 est calculée par l'équation (II - 24)

II.3 Calcul de l'irradiation solaire :

II.3.1 Irradiation solaire

On s'intéresse à présent à l'énergie captée sur une surface donnée, les quantités seront, exprimées en kWh/m² de surface réceptrice [5].

II.3.1.1 Irradiation hors atmosphère [5]

II.3.1.1.1 L'éclairement :

L'éclairement extraterrestre à la limite supérieure hors atmosphère, sur un plan horizontal, est calculé à partir de la constante solaire C et la facture de correction de la distance.

$$I = C \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (\text{II} - 26)$$

Avec :

n: Le numéro de jour de l'année (n=1 pour le premier janvier, ... etc.)

C : La constante solaire, $C = 1367 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

II.3.1.1.2 L'irradiation horaire :

Pour une heure donnée, l'énergie obtenue sur une surface horizontale se calcule par l'intégration de l'équation (II-26) entre deux angles horaires ω_1 et ω_2 . On obtient l'équation suivante :

$$I_0 = \frac{12.36}{\pi} C \left[1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right] [\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + (\omega_2 - \omega_1) \sin \varphi \cdot \sin \delta] \quad (\text{II} - 27)$$

I_0 : est exprimée en $[W \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}]$

II.3.1.1.3 L'irradiation journalière

Considérons un plan horizontal, à la limite de l'atmosphère terrestre situé à une latitude ϕ .

$$H^* = I_0 \sin h \quad (\text{II} - 28)$$

Où C: représente la constante solaire que l'on peut considérer constante compte tenu de sa faible variation au cours du temps. Notons H_0 : irradiation Journalière.

On a :

$$H_0 = \int_{\text{Iourne}} H^* dt = \int_{T_{SV \text{ Lev}}}^{T_{SV \text{ Cech}}} I_0 \sin h dt \quad (\text{II} - 29)$$

$T_{SV \text{ Lev}}$ et $T_{SV \text{ Cech}}$ correspondent aux heures de lever et couche du soleil.

$$H_0 = I_0 \int_{T_{SV \text{ Lev}}}^{T_{SV \text{ Cech}}} (\sin \delta \sin \phi + \cos \omega \cos \delta \cos \phi) dt \quad (\text{II} - 30)$$

Pour une journée et un lieu donné, δ et Φ sont fixes d'autre part. 1 heure de temps correspond à une variation de 15° de l'angle horaire w .

$$dt = \frac{12}{\pi} d\omega \quad (\text{II} - 31)$$

Avec le temps (t) en heures et l'angle w en radians.

L'intégration donne alors : Le rayonnement extraterrestre sur une surface horizontale H_0 peut être calculé pour une journée précise n de l'année, par l'équation suivante [18,19] :

$$H_0 = \frac{86400.1367}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360}{365} n \right) \right) (\cos \Phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \Phi \sin \delta) \quad (\text{II} - 32)$$

Φ : Latitude du lieu.

δ : Déclinaison solaire.

n : nombre du jour de l'année.

II.3.1.2 Rayonnement solaire au sol [16]

II.3.1.2.1 Notations:

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

➤ **Le rayonnement direct:**

Est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.

• **Le rayonnement diffus:**

Est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

• **Le rayonnement global:**

Est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La figure (II-2) illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol.

II.3.1.2.2 L'indice de clarté

Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère terrestre et les nuages. Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté, la moyenne mensuelle de l'indice de clarté K_T est définie par:

$$K_T = \frac{\bar{H}}{H_0} \quad (\text{II} - 33)$$

Avec :

\bar{H} : Rayonnement solaire moyen, mensuel mesuré sur une surface horizontale au niveau du sol.

\bar{H}_0 : Rayonnement solaire moyen mensuel hors de l'atmosphère.

D'après la formule de black, l'indice de clarté est obtenu par :

$$K_T = b + c\tau_{inso} = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (\text{II} - 34)$$

Les valeurs des constantes b et c sont données par Beeckman pour la région saharienne en Algérie

$$\begin{cases} b = 0.3 \\ c = 0.43 \end{cases}$$

II.3.1.2.3 Moyenne mensuelle diffuse

A partir de la mesure de la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière globale, on estime l'irradiation diffuse journalière moyenne \bar{H}_d par la corrélation de Beeckman:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = K_d = a + b \cdot K_T \quad (\text{II} - 35)$$

$$\text{Pour le Sahara Algérienne[1]} \begin{cases} a = 0,91 \\ b = 0,98 \end{cases}$$

Les moyennes mensuelles diffuses calculées à partir de l'ensoleillement global par la formule suivante :

✚ pour les valeurs de l'angle horaire du soleil à son coucher, c'est-à-dire, w_s inférieure à 81.4°

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.391 - 3.560K_T + 4.189K_T^2 - 2.137K_T^3 \quad (\text{II} - 36)$$

✚ pour les valeurs de l'angle horaire du soleil à son coucher, c'est-à-dire, w_s supérieure à 81.4°

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.311 - 3.022K_T + 3.427K_T^2 - 1.821K_T^3 \quad (\text{II} - 37)$$

II.3.1.2.4 La moyenne mensuelle directe

La moyenne mensuelle de l'ensoleillement direct est simplement : \bar{H}_b

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (\text{II} - 38)$$

II.3.1.2.5 L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface inclinée :

Les panneaux solaires peuvent être installés au sol ou sur la toiture orientés vers le sud et à l'écart des zones ombragées. Ils devraient présenter un angle de telle sorte que la surface de captation soit perpendiculaire au rayonnement solaire.

Pour la conception des systèmes solaires, nous avons besoins de la moyenne journalière mensuelle de l'irradiation incidente sur un plan du capteur \bar{H}_T .

Le rayonnement solaire incident sur la surface inclinée est supposé être composé de trois éléments : rayonnement solaire direct, rayonnement solaire diffus isotropique (celui qui arrive uniformément de la voute céleste indépendamment de sa direction) et rayonnement solaire diffus réfléchi par le sol.

Le calcul de \bar{H}_T est donné par l'équation suivante :

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \cdot \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \cdot alb \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II} - 39)$$

Avec :

\bar{R}_b : Facture de conversion donné par :

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega'_s + \omega'_s \cdot \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \cdot \sin \varphi \sin \delta} \quad (\text{II} - 40)$$

\bar{H}_d : Irradiation diffuse

\bar{H}_b : Irradiation directe

alb : L'albédo au sol

β : L'angle d'inclinaison

ω_s : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan horizontal

ω'_s : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan incliné

$$\omega'_s = \text{Min}[\omega_s, \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta)] \quad (\text{II} - 41)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (\text{II} - 42)$$

II.4 Modèles d'estimation du rayonnement solaire terrestre :

Il existe plusieurs modèles pour la simulation de l'éclairement solaire global, direct et diffus, généralement exprimés par des approches semi empiriques, les plus fréquemment connus et utilisé dans la pratique on citera principalement le modèle de perrin de brichambaut et celui de liu et jordan, ces deux modèles donnent de bons résultats pour estimer l'irradiation solaire sur un plan parfaitement horizontal ou sur un plan incliné. Dans notre travail on se basera sur l'approche de liu et jordan.

II.4.1 Modèle de Capderou

Dans ce modèle, les irradiances directes et diffuses par ciel clair sont exprimées en fonction des facteurs de trouble [20].

❖ L'éclairement direct par ciel clair sur un plan horizontal est donné par :

$$C \sin(h) \gamma \exp \left[-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89z} \sin(h) \right)^{-1} \right] \quad (\text{II} - 43)$$

Avec :

C : représente la constante solaire qui est, par définition le flux énergétique reçu par une surface unité.

γ : est la correction terre – soleil.

T_L : facteurs de trouble.

❖ L'éclairement diffus incident sur un plan horizontal est donné par :

$$I_d = I_n \cos(\beta) = C \gamma \exp \left[-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h) \right)^{-1} \right] \cos(i) \quad (\text{II} - 44)$$

❖ L'éclairement direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné :

$$I_b = I_n \cos(\beta) = C \gamma \exp \left[-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h) \right)^{-1} \right] \cos(\beta) \quad (\text{II} - 45)$$

❖ L'éclairement diffus incident sur un plan incliné s'écrit :

$$I_{d\ c\beta} = d_{ciel} + d_{sol} + \delta'_i \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} \quad (\text{II} - 46)$$

γ : correction par la distance terre-soleil.

II.4.2 Modèle de Perrin de Brichambaut

Le rayonnement direct sur un plan incliné est calculé par l'expression suivante [20] :

$$I_{b\beta} = I_n \cdot \cos(\theta) = \frac{I_n \cdot \cos(\beta)}{\sin(h)} \quad (\text{II} - 47)$$

β : L'angle d'inclinaison.

La composante directe du rayonnement solaire est donnée par les expressions empiriques suivantes :

- conditions normales par ciel clair :

$$I_{b\beta} = 1230 \exp \left[\frac{-1}{3.8 \sin(h + 1.6)} \right] \quad (\text{II} - 48)$$

- pour un ciel très clair :

$$I_{b\beta} = 1210 \exp \left[\frac{-1}{6 \sin(h + 1)} \right] \quad (\text{II} - 49)$$

- pour un ciel pollué : zone industrielle.

$$I_{b\beta} = 1260 \exp \left[\frac{-1}{2.3 \sin(h + 3)} \right] \quad (\text{II} - 50)$$

Les expressions empiriques permettant d'estimer la composante du rayonnement solaire diffus sont ci- dessous :

- Part du ciel

- Part du ciel sur une surface horizontale:

- Par ciel clair :

$$I_d = 125(\sin(h))^{0.4} \quad (\text{II} - 51)$$

- Par ciel très clair, on multiplie cette dernière expression par (3/4), si le ciel est couvert, on la multiplie par (4/3).

*Part du ciel sur une surface d'inclinaison quelconque:

$$I_{d\ c\beta} = I_d \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (\text{II} - 52)$$

β : l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontal

*Part du sol

$$I_d = alb \frac{1 - \cos(\beta)}{2} . G \quad (\text{II} - 53)$$

Ou :

$$I_h = I_b + I_d = I_{dir} \sin(h) + I_d \quad (\text{II} - 54)$$

I_b : l'irradiation directe horaire.

II.4.3 Modèle de Liu et Jordan

✚ rapport du rayonnement diffus horaire en moyenne mensuelle, au rayonnement diffus

Journalier en moyenne mensuelle (r_d):

$$r_d = \frac{I_d^*}{H_d} \quad (\text{II} - 55)$$

$$r_d = \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{24\sin\omega - \omega_s \cos\omega_s} \quad (\text{II} - 56)$$

✚ rapport du rayonnement global horaire en moyenne mensuelle, au rayonnement global Journalier en moyenne mensuelle (r_h) :

$$r_h = \frac{I^*}{\bar{H}} \quad (\text{II} - 57)$$

$$r_h = r_d(a + b \cos \omega) \quad (\text{II} - 58)$$

Avec :

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin \left(\omega_s - \frac{\pi}{3} \right)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin \left(\omega_s - \frac{\pi}{3} \right)$$

Connaissant r_d et r_b , on en déduit

$$I_d^* = r_d H_d ; I^* = r_h H$$

✚ **Rayonnement direct horaire :**

$$I_b = I - I_d \quad (\text{II} - 59)$$

Avec :

I : Rayonnement global horaire sur une surface horizontale.

I_d : Rayonnement diffus horaire sur une surface horizontale.

I_b : Rayonnement direct horaire sur une surface horizontale.

La relation de Liu & Jordan généralisée est donnée sous la forme suivante [21]:

$$G = I_b * R_b + I^* \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + alb * (I_b + I_d^*) \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (\text{II} - 60)$$

L'irradiation directe sur un plan incliné est exprimée par la relation suivante:

$$I_{b\beta} = I_b \cdot R_b \quad (\text{II} - 61)$$

Avec :

I_{bβ} : Rayonnement direct sur une surface inclinée.

R_b : est le facteur d'inclinaison du rayonnement direct.

L'irradiation diffuse sur un plan incliné est :

$$I_{d\ c\beta} = I_d^* \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (\text{II} - 62)$$

D'autre part l'irradiation réfléchie sur un plan incliné est estimée par l'expression :

$$I_{i\beta} = g_h \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \cdot alb \quad (\text{II} - 63)$$

Les deux composantes du rayonnement solaire global sur un plan horizontal, sont estimées comme suit [20] :

- Rayonnement direct :

$$I_b = A \cdot \sin(h) \cdot \exp\left(\frac{-1}{C \cdot \sin(h + 2)}\right) \quad (\text{II} - 64)$$

- Rayonnement diffus :

$$I_d = B \cdot (\sin(h))^{0.4} \quad (\text{II} - 65)$$

Où A, B et C sont données d'après le tableau suivant :

| | A | B | C |
|---------------|------|-----|---|
| Ciel très pur | 1300 | 87 | 6 |
| Ciel moyen | 1230 | 125 | 4 |
| Ciel pollué | 1200 | 187 | 5 |

Tableau (II-1) : Valeurs des coefficients A, B et C [21].

III.1 Introduction

Un panneau solaire ou capteur solaire est un dispositif destiné à récupérer une partie de l'énergie du rayonnement solaire pour la convertir en une forme d'énergie utilisable par l'homme : électrique ou thermique. Les panneaux solaires thermiques, appelés capteurs solaires thermiques, convertissent la lumière en chaleur.

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

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique,

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

III.2 Rappel sur les différents modes de transfert de chaleur

III.2.1 Conduction

C'est un mode de transfert de chaleur au sein d'un milieu solide, sans déplacement de matière, 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.
- une transmission par les électrons libres.

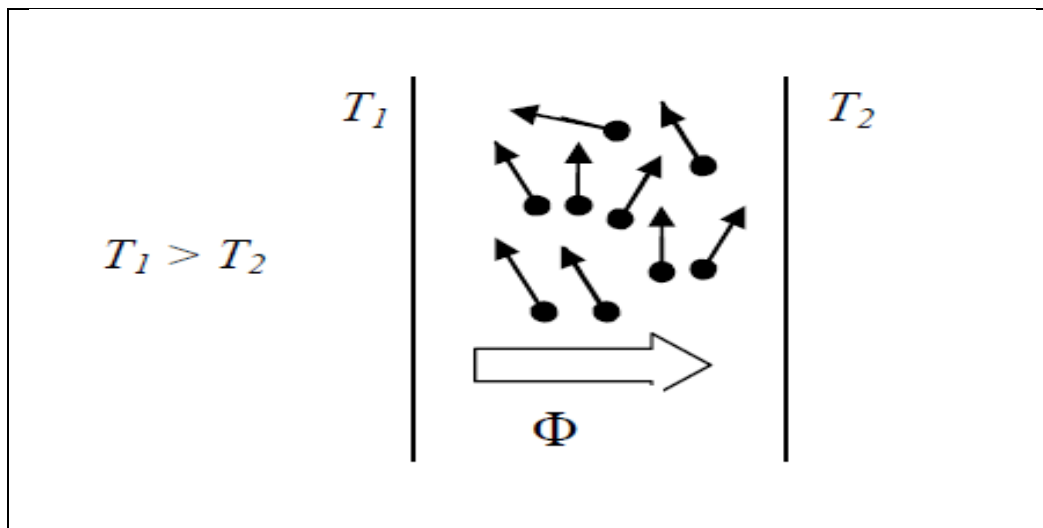


Figure (III-1) : Echange de chaleur par conduction [22].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier [22]

III.2.1.1 Loi de Fourier

Il existe une relation linéaire entre la densité de flux thermique et le gradient de température. En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique λ du milieu et au gradient de température [22].

$$\vec{F} = - \frac{\vec{\text{grad}}(T)}{\lambda} \quad (\text{III} - 1)$$

Ou sous la forme suivante :

$$\phi = -\lambda \cdot s \frac{\delta T}{\delta x} \quad (\text{III} - 2)$$

Avec :

ϕ : Flux de chaleur transmis par conduction (w)

λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{w} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

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

s : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

Pour un milieu isotrope, la conductivité thermique λ est une grandeur scalaire positive, caractéristique du milieu, fonction en général de T . Pour un milieu isotrope et homogène λ ne dépend pas de T . Dans de nombreux cas pratiques, lorsque les écarts de température ne sont pas trop élevés, on peut considérer, avec une précision suffisante, λ comme une constante pour un milieu donné.

III.2.1.2 Résistance thermique

Considérant l'intersection d'un tube de courant par deux surfaces isothermes de températures T_1 et T_2 , on définit la résistance thermique par la relation [22]:

$$T_1 - T_2 = R\Phi \quad (\text{III} - 3)$$

On reconnaît dans cette équation la forme générale de la loi d'Ohm :

$$E_1 - E_2 = R \cdot I \quad (\text{III} - 4)$$

dans laquelle les potentiels E sont remplacés par les températures et l'intensité I par le flux Φ

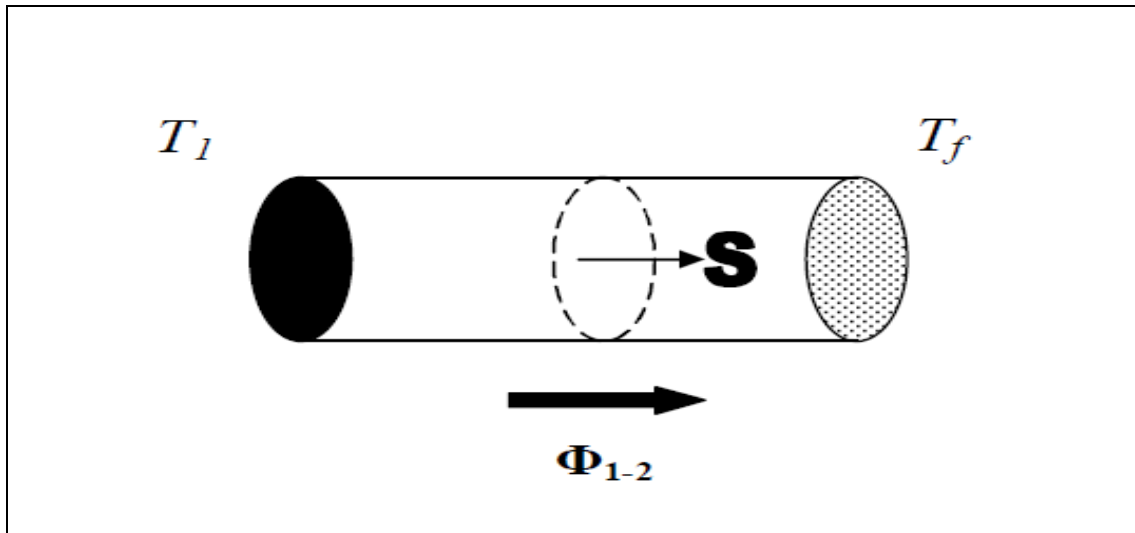


Figure (III-2): Résistance thermique [22].

III.2.1.3 Equation générale de la chaleur

Cette équation qui exprime la conservation d'énergie d'un élément infinitésimal de matière s'écrit :

$$\text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + P = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III} - 5)$$

Où

P : la production de chaleur en w/m^3

C_p : chaleur massique en $(\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{k})$,

ρ : masse volumique en (kg/m^3)

III.2.2. Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide [18]. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\Phi = h \cdot S (T_p - T_\infty) \quad (\text{III} - 6)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (w)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

T_p : Température de surface du solide ($^\circ\text{C}$)

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ\text{C}$)

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est en fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

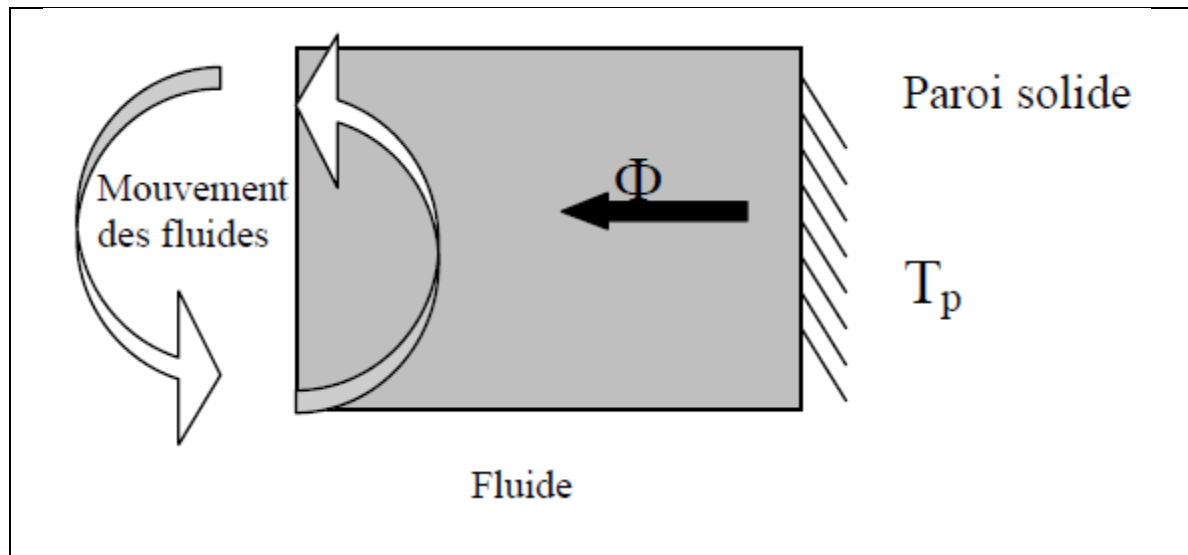


Figure (III-3): Transfert de chaleur par convection [18].

III.2.2.1 Nombres sans dimension

Nous définirons ci-dessous les nombres sans dimension rencontrés en transfert thermique par convection [18,19] :

III.2.2.1.1 Nombre de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{III} - 7)$$

Avec :

λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$)

μ : viscosité dynamique en (PI)

C_p : chaleur massique en (J/kg.k).

Un fluide peu visqueux mais bon conducteur thermique, aura un Pr très faible et viceversa [19].

III.2.2.1.2 Nombre de Nusselt

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda_f} \quad (\text{III} - 8)$$

Avec :

L : dimension caractéristique (m).

Ce nombre exprime le rapport entre le flux de chaleur par convection dans le fluide et le flux par conduction, λ_f ici la conductivité du fluide. Contrairement au Pr, Nu dépend non seulement de la nature du fluide à travers λ_f , mais aussi de la géométrie de l'écoulement à

travers la dimension caractéristique L et de champ de la vitesse dans la couche limite à travers sa dépendance sur h . Tout comme pour h , on définit un nombre de Nusselt moyen Nu et un nombre de Nusselt local [23].

$$Nu_{u1} = \frac{h_l \cdot L}{\lambda_l} \quad (\text{III} - 9)$$

III.2.2.1.3 Nombre de Grashof

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 (T - T_f)}{\mu^2} \quad (\text{III} - 10)$$

Ce nombre exprime le rapport entre les forces de gravité multipliées par les forces d'inertie et le carré des forces de viscosité.

III.2.2.1.4 Nombre de Rayleigh

Il s'écrit sous la forme suivante :

$$Ra = Pr \cdot Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 (T - T_f)}{a \cdot \nu} \quad (\text{III} - 11)$$

Ce nombre caractérise l'écoulement en convection naturelle.

Avec :

β : Coefficient de dilatation du fluide (K^{-1})

L : Dimension caractéristique de la surface d'échange (m)

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2)

μ : Viscosité dynamique du fluide ($kg/m.s$)

ν : Viscosité cinématique (m^2/s)

ρ : Masse volumique en (kg/m^3)

a : Diffusivité thermique en (m^2/s)

III.2.2.1.5 Nombre de Reynolds

Il est de la forme de :

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (\text{III} - 12)$$

Ce nombre exprime le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité [18, 19,22].

III.2.2.2 Flux de chaleur en convection forcée

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Avec :

Nu : nombre de Nusselt, Re : nombre de Reynolds et Pr : nombre de Prandtl

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection forcée s'effectue donc de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl ;
2. Suivant la valeur de Re et la configuration → choix de la corrélation ;
3. Calcul de Nu par application de cette corrélation ;
4. Calcul de h (Coefficient de transfert de chaleur)

$$h = \frac{\lambda N_u}{d} \quad (\text{III} - 13)$$

$$\text{et de } \Phi = hS(T_p - T) \quad (\text{III} - 14)$$

III.2.2.3 Le flux de chaleur en convection naturelle

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

Avec :

Nu : nombre de Nusselt, Pr : nombre de Prandtl et Gr : nombre de Grashof.

Le flux de chaleur transmise par convection naturelle s'effectue donc de la manière suivante:

1. Calcul des nombres adimensionnels de Grashof et de Prandtl ;
2. Suivant la valeur de Gr et la configuration → choix de la corrélation ;
3. Calcul de Nu par application de cette corrélation ;
4. Calcul de h (Coefficient de transfert de chaleur)

$$h = \frac{\lambda N_u}{D} \quad (\text{III} - 15)$$

$$\text{et de } \Phi = h S(T_p - T)$$

III.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Contrairement aux deux autres modes d'échange qui sont la conduction et la convection, le rayonnement ne nécessite pas l'existence d'un support matériel. Il se propage dans l'espace, comme dans tout type de milieu. Si ce milieu est homogène, il se propage en ligne droite.

Le rayonnement c'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans l'espace).

III.2.3.1 L'émittance (totale)

C'est le flux total émis par unité de surface de la source. On considère globalement la puissance $d\Phi$ émise par un élément de surface dS dans l'ensemble des directions où il peut rayonner (hémisphère limitée par le plan tangent à dS en son centre), et on divise ce flux par l'aire de dS . L'émittance est notée par M . Son unité est le w/m^2 :

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (\text{III} - 16)$$

III.2.3.2 Le corps noir

C'est un corps idéal vis-à-vis du rayonnement qui, par définition, absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit quelque soit la fréquence et la direction. A l'équilibre thermique, il émet autant de rayonnement qu'il en absorbe de sorte qu'un corps noir rayonne le maximum d'énergie de façon uniforme dans toutes les directions.

III.2.3.3 Loi du rayonnement thermique

III.2.3.3.1 Loi de Planck

➤ **Emittance monochromatique du corps noir :**

L'émittance monochromatique d'un corps noir $M^{\circ\lambda,T}$ à la longueur d'onde λ et la température T , est donnée par la loi de Planck [24] :

$$M^{\circ\lambda,T} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{III} - 17)$$

Où $M^{\circ\lambda,T}$ est le flux énergétique émis par la surface dans tout l'hémisphère et ramène à l'unité de longueur d'onde λ , la surface étant à la température T . $M^{\circ\lambda,T}$ est exprimé en w/m^3

ou, dans le cas où λ est exprimé en microns (μm), $M^{\circ\lambda,T}$ sera en $w/(m^2 \cdot \mu m)$.

Les constantes C_1, C_2 sont égales à :

$$C_1 = 3,74.108 \text{ w} \cdot \mu m^4 / m^2$$

$$C_2 = 1,44.104 \mu m^{\circ} k$$

III.2.3.3.2 Loi de Stefan Boltzmann

Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans l'espace en fonction de sa température absolue (sur tout le spectre de longueur d'onde). Elle s'écrit :

$$M^{\circ} = \sigma \cdot T^4 \quad \left[\frac{w}{m^2} \right] \quad (\text{III} - 18)$$

Avec :

σ : est la constante de Stefan Boltzmann

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (w/(m}^2\text{°k}^4))$ [23].

III.2.3.4 Transfert par rayonnement entre surface

1) petit objet convexe placé dans une enceinte large ($S_1 \ll S_2$)

$$\Phi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad [\text{W}] \quad (\text{III} - 19)$$

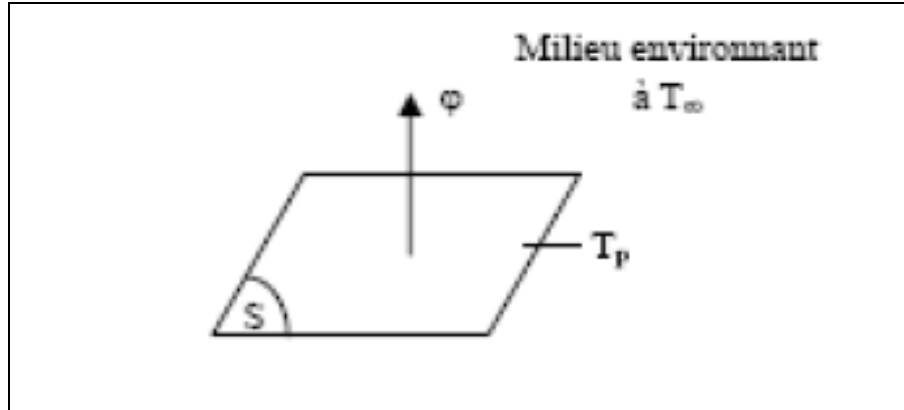


Figure (II-4) : Transfert de chaleur par rayonnement [23].

2) deux plans parallèles infinis :

$$\Phi = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{III} - 20)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement exprimé en W

σ : Constante de Stephan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

ε_p : Facteur d'émission de la surface

T_p : Température de la surface en K

T_∞ : Température du milieu environnant la surface en K

S : Aire de la surface en m^2

III.2.3.5 Réception du rayonnement par un solide

Quand un rayon d'énergie incident Φ_i frappe un corps à la température T , une partie Φ_r de l'énergie incidente est reflétée par la surface S , une autre partie Φ_a est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste Φ_t est transmis et continue son chemin [25] :

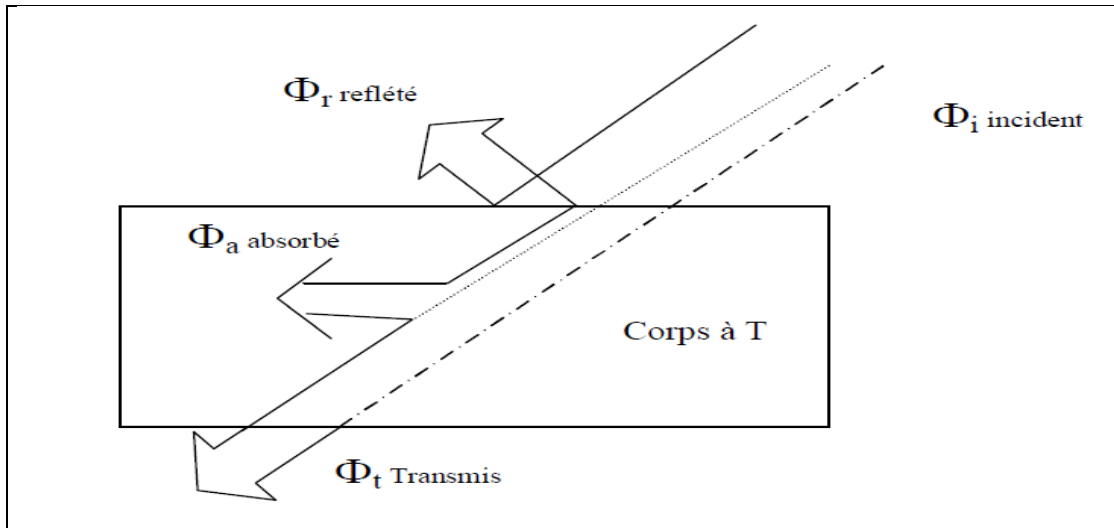


Figure (III-5) : Réception du rayonnement [25].

On a évidemment

$$\Phi_i = \Phi_r \rho + \Phi_a \alpha + \Phi_t \tau \quad (\text{III} - 21)$$

$$\text{D'où : } \rho + \alpha + \tau = 1 \quad (\text{III} - 22)$$

III.3. Les capteurs solaire

III.3.1 Définition d'un capteur solaire

Un panneau solaire ou capteur solaire est un dispositif destiné à récupérer une partie de l'énergie du rayonnement solaire pour la convertir en une forme d'énergie utilisable par l'homme : électrique ou thermique.

Les panneaux solaires thermiques, appelés capteurs solaires thermiques, convertissent la lumière en chaleur récupérée et utilisée sous forme d'eau chaude [1].

III.3.2 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 [26] :

- 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

III.3.2.1 Capteurs plans de types vitrés

Les capteurs plans de types vitrés sont très répandus et ils existent sous forme de capteurs à circulation de liquide et sous forme de capteurs à air. Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où la température désirée se situe entre 30 et 70 °C, et/ou à des applications qui nécessitent de la chaleur au cours des mois d'hiver.

Les capteurs à circulation de liquide sont plus communément utilisés pour le chauffage de l'eau chaude des résidences et des commerces, pour le chauffage des bâtiments, ainsi que celui des piscines intérieures.

Les capteurs à air sont utilisés pour le chauffage des bâtiments, de l'air de ventilation et pour le séchage des récoltes [26].



Figure (III-6): Capteur plan de type vitré [26].

Dans ce type de capteur, un absorbeur plan transforme, de façon efficace, les rayons solaires en chaleur. Afin de réduire au minimum la perte de chaleur, la plaque est située entre un vitrage (vitre plane ou matériau transparent) et un panneau isolant. Le vitrage est choisi de telle sorte que le maximum de rayons solaires le traversent et atteignent l'absorbeur [26].

III.3.2.2 Capteurs solaires plans sans vitrage

Actuellement en Amérique du Nord, les capteurs plans sans vitrage représentent la plus grande surface installée par année de tous les capteurs solaires. Parce qu'ils ne sont pas isothermes, ces capteurs conviennent mieux à des applications à basse température (inférieure à 30 °C).

Le marché principal est, de loin, le chauffage des piscines extérieures, mais il existe d'autres marchés, notamment le chauffage saisonnier des piscines intérieures, le préchauffage de l'eau pour les lave-autos ainsi que le chauffage de l'eau utilisée dans les opérations d'élevage piscicole. Le chauffage de l'eau dans les régions éloignées, et dans des emplacements saisonniers tels que les camps d'été représente également un marché potentiel pour ce type de capteur.



Figure (III-7): Capteurs solaires plans sans vitrage [26].

Les capteurs plans sans vitrage sont habituellement fabriqués en un plastique noir qui a été stabilisé afin de résister aux rayons ultraviolets. Comme ces capteurs ne possèdent pas de vitrage, une grande partie de l'énergie solaire est absorbée.

Cependant, parce qu'ils ne sont pas isothermes, une grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a du vent et que la température extérieure n'est pas assez chaude. Ils transfèrent si bien la chaleur de l'air (et provenant de l'air) qu'ils peuvent réellement «saisir» la chaleur au cours de la nuit lorsqu'il fait chaud et qu'il y a du vent à l'extérieur [26].

III.3.2.3 Capteur solaire à tube sous vide

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis

sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur, celui-ci reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique ou un coffre de protection. La fabrication des tubes et l'assemblage des capteurs sont simplifiés, car il n'y a pas de soudures verre-métal. Par contre, les tubes thermos sont particulièrement fragiles au point de liaison avec le collecteur, où les parties extérieure et intérieure de chaque tube se rejoignent. En général, la pression dans l'espace vide est inférieure à 1Pa. Ainsi, les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur sont quasiment éliminées. Ces capteurs peuvent atteindre des températures élevées et les tubes sont inclinables, ce qui permet une utilisation en façade ou sur une toiture insuffisamment inclinée pour utiliser des capteurs plans. On note d'autres avantages par rapport aux capteurs plans notamment [5].

- Des températures de fonctionnement plus élevées.
- Des déperditions réduites grâce à une excellente isolation thermique.



Figure (III-8) : Capteur solaire à tubes sous vide [5].

III.3.2.4 Capteurs à concentration

Les capteurs plans ne permettent pas, en général, de dépasser 130°C au niveau de la surface absorbante. Cette température peu élevée constitue une limite au rendement thermodynamique des systèmes qui les utilisent. Il faut une surface de 50 m² par KW, et ces capteurs ne sont donc pas adaptés à la production de forte puissance. Pour augmenter le rendement, il faut élever la température de la source chaude et, par conséquent, concentrer le rayonnement solaire en acceptant de perdre le bénéfice du rayonnement diffus non concentrable parce que n'ayant pas de direction privilégiée [27].

Les trois systèmes à concentration les plus importants pour l'application à grande échelle de l'énergie solaire sont :

III.3.2.4.1 Concentrateurs cylindro-paraboliques

Les réflecteurs cylindro-paraboliques sont des systèmes en forme de « U ». Ils concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Parfois un tube en verre transparent entoure le tube récepteur afin de réduire les pertes de chaleur. Ces concentrateurs utilisent souvent un système de pointeur solaire à simple ou à double axe. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400°C [28].



Figure (III-9) : Concentrateur cylindro-parabolique [28].

III.3.2.4.2 Concentrateurs paraboliques

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeur). Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500°C) sur le récepteur [28].



Figure (III-10) : Concentrateur parabolique [28].

III.3.2.4.3 Système de centrale à tour (héliostat)

Un héliostat utilise un ensemble de pointeurs solaires à double axe qui dirige l'énergie du soleil vers un grand absorbeur situé dans une tour. Ces capteurs possèdent un ensemble de grands miroirs qui suit le mouvement du soleil. Les miroirs concentrent les rayons du soleil

sur le récepteur en haut de la grande tour. Un ordinateur garde les miroirs alignés afin que les rayons du soleil, qui sont réfléchis, visent toujours le récepteur, où la température peut dépasser 1000°C [29].



Figure (III-11): Système de centrale à tour [29].

III.3.3 principaux éléments constituant un capteur plan

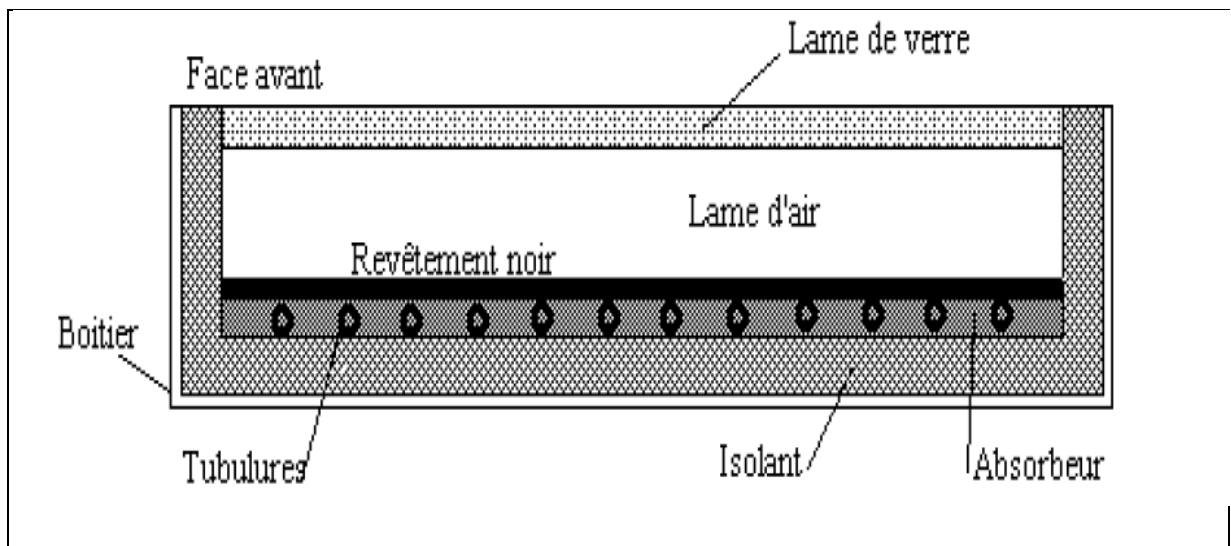


Figure (III-12): Coupe schématique d'un capteur solaire plan [26].

Le capteur solaire plan se compose essentiellement des éléments suivants:

- ✓ une plaque opaque qui absorbe le rayonnement solaire est transmettre au fluide caloporteur.
- ✓ une isolation thermique arrière est latérale.
- ✓ une couverture transparente généralement en verre a simple ou a double qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en protégeant de vent.

III.3.3.1 L'absorbeur

Deux fonctions incombent à l'absorbeur [30]:

1. absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible
2. transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de pertes.

De plus, il devra être le plus léger possible afin de limiter l'inertie de mise en régime et construit avec un bon matériau conducteur.

Les absorbeurs sont généralement réalisés avec des feuilles minces de métaux présentant une bonne conductibilité et une bonne tenue mécanique. C'est pourquoi, la plupart du temps, les absorbeurs sont réalisés au moyen d'un support en cuivre de 0,2 mm et sont recouverts par un traitement de surface.

L'absorbeur en général est disposé de 25 mm à 30 mm d'isolant.

Le rôle de l'absorbeur est de capter au maximum le rayonnement et d'en réémettre le moins possible.

Ces types de surfaces absorbant au maximum et réémettant au minimum ont été nommées surfaces « sélectives ».

La sélectivité de l'absorbeur est très importante; elle est améliorée au moyen de traitements de surface qui ajoutent au support des caractéristiques telles que le rayonnement solaire est très bien absorbé et que le rayonnement infrarouge émis (dû à l'échauffement) est limité.

Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbeurs :

α : coefficient d'absorption (0 à 1, optimum : 1)

ε : coefficient d'émission (0 à 1, optimum : 0)

Un tel traitement de surface peut être obtenu par des procédés électrochimiques ou électrophysiques de nombreux progrès ont été réalisés dans ce domaine les plus importants, classés par ordre d'apparition, seront présentés et comparés par rapport à la peinture noire.

III.3.3.1.1 Les différents revêtements possibles :

a. la peinture noire: la peinture mate noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption α compris entre 0,9 et 0,95. Mais le degré d'émission ε lui est très élevé (0,85) [31].



Figure (III-13): Peinture noire sur absorbeur [31].

b. Oxyde de chrome: le revêtement en "black chrome" (couleur noire) est composé d'oxyde de chrome déposé sur une sous-couche de nickel, le tout formant une couche extrêmement fine sur un support métallique son coefficient d'absorption α est de 0,95 et son coefficient d'émission ϵ de 0,12 à 0,18.

c. Traitement sous vide : ce revêtement sélectif a été mis au point en 1995 et est facilement reconnaissable de par sa couleur bleu marine, ce procédé consiste à déposer différents métaux (titane, ...) sur la surface absorbante en présence du vide. Le coefficient d'absorption α obtenu est supérieur à 0,95 et le coefficient d'émission ϵ , inférieur à 0,05.

| Revêtement | Absorption : α | Emission : ϵ |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| la peinture noire | 0.9-0.95 | >0.85 |
| Black chrome | 0.95 | 0.12 à 0.18 |
| Dépôt sous vide | >0.95 | <0.05 |

Tableau (III-1) : Différents traitements de surface [32].

Actuellement le procédé de revêtement sous vide a pris une grande place sur le marché grâce :

- ✓ à ses performances.
- ✓ à sa faible consommation en énergie lors de la fabrication (1kWh par m² d'absorbeur, c'est à dire moins de 10% de l'énergie nécessaire pour les autres revêtements)
- ✓ à son respect au niveau écologique (pas de dégagements de gaz ou solides, pas de pollution de l'eau).

On donne un tableau pour les valeurs de ϵ et α pour les matériaux absorbeur les plus utilisés dans les capteurs solaires plan:

| Support et traitement | α | ϵ |
|---------------------------------|----------|------------|
| Acier nickel noir sur nickel | 0.95 | 0.07 |
| Acier et chrome noir sur nickel | 0.95 | 0.09 |

| | | |
|---|------|------|
| Acier et chrome noir | 0.91 | 0.07 |
| Cuivre et chrome noir | 0.95 | 0.14 |
| Acier galvanisé et chrome noir | 0.95 | 0.16 |
| Cuivre e cuivre noir | 0.88 | 0.15 |
| Acier et oxyde de fer | 0.85 | 0.08 |
| Aluminium et oxyde de manganèse | 0.70 | 0.08 |
| Acier et couche organique sur chrome noir | 0.94 | 0.20 |
| Peinture noir époxy | 0.95 | 0.18 |
| Peinture blanche époxy | 0.25 | 0.91 |

Tableau (III-2) : Le coefficient d'absorption α et le coefficient d'émission ε pour les supports les plus utilisés comme absorbeur [31].

III.3.3.2 La couverture transparente

La couverture a une fonction de protection de l'absorbeur, mais elle joue aussi un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur. Habituellement, on utilisera le verre comme couverture transparente [31].

Un tel dispositif représente donc un véritable piège au rayonnement solaire, qui peut être amélioré en munissant le capteur d'une double couverture.

Comme couvertures transparentes utilisées dans la conception des capteurs solaire plans, on distingue :

*.Le verre

La propriété physique intéressante du verre est qu'il permet de laisser passer le rayonnement solaire et d'arrêter le rayonnement infrarouge d'un émetteur tel que celui de l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'effet de serre.

La couverture doit présenter une bonne résistance aux chocs, aux brusques variations de températures ainsi qu'aux températures élevées.

Une appellation « verre solaire » existe et fait l'objet d'exigences toutes particulières :

- le verre doit être trempé pour résister sans risques aux charges thermiques et mécaniques.

- il doit présenter un haut degré de transmission solaire caractérisé par une faible teneur en fer.
- il doit être doté d'une surface structurée permettant de réduire les reflets directs.

La qualité du verre est caractérisée par son rendement optique ou taux de transmission ζ qui dépend de la nature et de l'épaisseur du vitrage ainsi que de l'angle d'incidence i et de la nature du rayonnement (direct ou diffus) (valeur habituelle de ζ : 0,91).

Actuellement, un nouveau verre, dit « antireflet », équipe certains capteurs. Ce verre a un taux de transmission de l'ordre de 96% et son effet se marque davantage pour le placement de capteurs à la verticale.

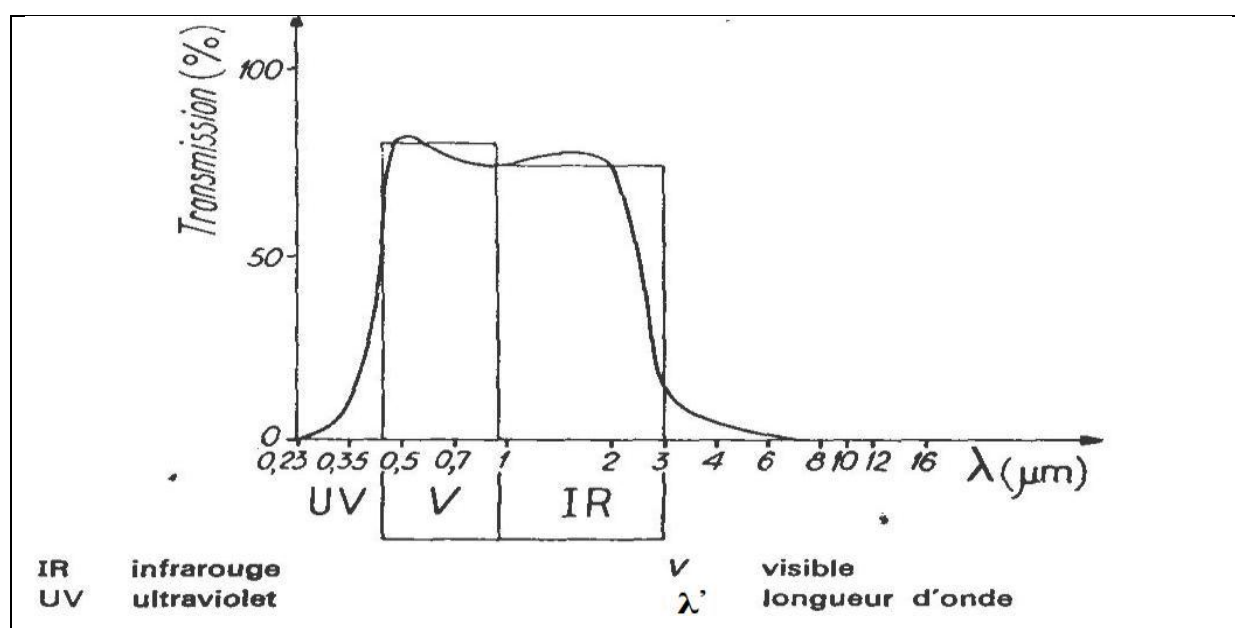


Figure (II-14): Transparence du verre [33].

* Les polycarbonates

sont des dérivés de matières plastique à double et à triple lame très fine, reliées entre elles par une multitude de parois pour former des cavités alvéolaires, ces dernières réduisent le mouvement de l'air incarcéré dans cet espace, et permettent de minimiser les pertes thermiques par convection vers l'avant. C'est ce genre de couvertures qu'on utilise dans notre laboratoire. Leur coefficient de transmission au rayonnement solaire, est de l'ordre de 83% sous une incidence normale à l'état neuf, qui diminue légèrement avec le temps (79% au bout de cinq ans). Il faut noter que l'effet de serre est nettement meilleur avec des couvertures transparentes en verre et en particulier avec des plaques alvéolaires à double paroi. Les polycarbonates, en comparaison avec des couvertures en verre, présentent l'avantage d'avoir une bonne résistance aux chocs thermomécanique.

| Matériaux | Transmissivité à incidence normale | |
|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| | $\lambda' = 0,4-2,5 \mu m$ | $\lambda' = 2,5-0,4 \mu m$ |
| Le verre | 0.83-0.91 | 0.00-0.03 |
| Les plastiques en feuilles | 0.76-0.92 | 0.02-0.06 |
| Les plastiques en films | 0.85-0.87 | 0.2-0.26 |

Tableau (III-3) : Transmissivité de divers types de couvertures dans les gammes du visible et de l'infrarouge [34].

III.3.3.3 L'isolant

Limiter les pertes de transmission vers l'extérieur est primordial pour optimiser les performances du capteur [35].

Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation des capteurs, mais il faut veiller à la tenue de la température, car une coupure de circulation du fluide caloporteur peut faire monter la température intérieure du capteur à plus de 150°C.

Les isolants généralement utilisés sont la laine de verre et les mousses polyuréthanes. Leur épaisseur varie de 4 à 8 cm.

Un bon isolant doit les qualités suivantes :

- ✓ une faible conductivité thermique.
- ✓ Une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- ✓ La chaleur massique doit être basse.
- ✓ une résistance thermique dans l'intervalle des températures de service.

On distingue trois types d'isolants :

❖ isolants minéraux :

✓ La laine de verre constituée de fibres de verre très fines, commercialisée sous de nombreuses formes : en plaques, en rouleaux et enrobée dans du plâtre. Sa conductibilité varie entre $0,034 \text{ Wm}^{-1} \text{ k}^{-1}$ à 0°C et $0,053 \text{ Wm}^{-1} \text{ k}^{-1}$ à 200°C.

✓ La vermiculite connue aussi sous le nom de mica, dont la conductibilité varie de 0,12 à $0,60 \text{ Wm}^{-1} \text{ k}^{-1}$ et qui se présente sous forme de granulés très légers.

❖ Isolants d'origine végétale :

✓ le bois bien sec, sa conductibilité varie entre 0,13 et $0,4 \text{ Wm}^{-1} \text{ k}^{-1}$, ses qualités isolantes peuvent être améliorées, s'il est utilisé sous forme de fibres agglomérées ($\lambda = 0,05 \text{ Wm}^{-1} \text{ k}^{-1}$ à $0,10 \text{ Wm}^{-1} \text{ k}^{-1}$).

✓ la sciure de bois ($\lambda = 0,11 \text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$), qui a deux inconvénients: son inflammabilité et sa conductibilité qui ont tendance à augmenter avec la chaleur, ce qui la rend inadéquate pour la calorifugation.

❖ **Isolants organiques :**

✓ les matières plastiques, sont de mauvaises conductrices de la chaleur. Leurs propriétés isolantes peuvent être améliorées en insufflant un gaz durant l'étape de solidification, ce qui leur donnent la consistance d'une mousse, telle que les mousses phénoliques ($\lambda = 0,44 \text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$) et la mousse de chlorure de polyvinyle ($\lambda = 0,033 \text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$).

✓ La mousse de polyuréthane existe sous deux aspects :

*haute densité ($d = 0,6$) suffisamment rigide pour servir à la fabrication

Des caissons de capteurs, tout en constituant un bon isolant ($\lambda = 0,08 \text{Wm}^{-1} \text{k}^{-1}$).

* Basse densité ($d = 0,03$) qui est plus fragile, mais meilleure, pour l'isolation ($\lambda = 0,025 \text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$). Il convient de recouvrir ce type de matériau d'un isolant plus résistant à la chaleur si la température dépasse la valeur de 90°C .

✓ Le polystyrène est très léger, fragile, de couleur blanche, utilisé généralement pour l'emballage. Ses propriétés isolantes sont légèrement moins bonnes que le polyuréthane, sa conductibilité thermique est de l'ordre de $0,04 \text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$, mais il est nettement moins cher et il se sublime à partir de 90°C .

| Désignation | λ (w/m °K) | ρ (Kg/m ³) | Température maxi d'utilisation | Observation |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Laine de verre | 0.034 à 0.053 | 70 | 150 | Sensible à l'humidité |
| Mousse de verre | 0.057 | 123 | 150 | Sensible à l'humidité |
| bois | 0.13 à 0.4 | 123 | 150 | |
| Liège exposé | 0.045 | 100 | 150 | |
| polystyrène | 0.042 | 15 | 85 | Moulé comprimé |
| polyuréthane | 0.035 | 35 | 85 | Moulé comprimé |

Tableau (III-4) : Conductivité thermique de quelque matériau [31].

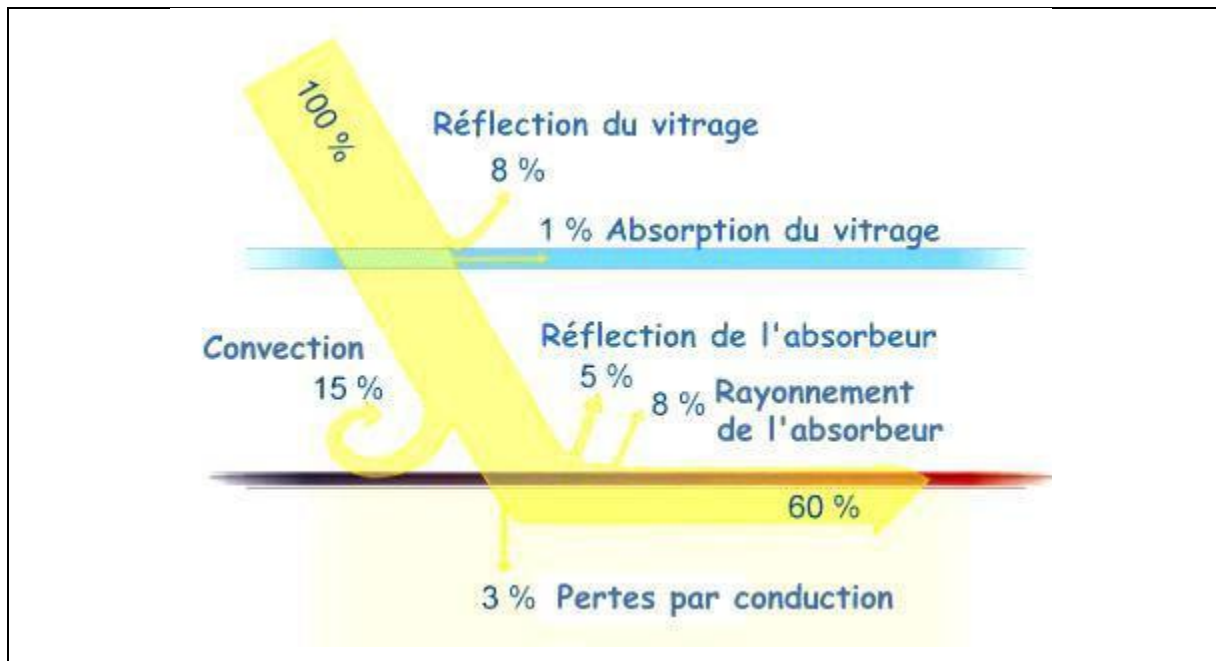


Figure (III-15) Schéma des différentes pertes [32].

La figure présente de manière schématique les différentes pertes générées par les constituants du capteur solaire plan.

On remarque aisément que sur une base de 100 % à la surface du vitrage du capteur, seulement 60 % du rayonnement arrivent directement à l'absorbeur.

Quant aux 40 % restants ils ne sont pas complètement perdus mais ils vont jouer un rôle par l'intermédiaire de l'effet de serre.

III.3.3.4 Le fluide caloporteur

Le fluide caloporteur est utilisé dans le circuit primaire de capteur solaire a pour rôle de véhiculer le chaleur cédée par l'absorbeur, différents fluides peuvent être utilisée mais doit satisfaire a des certains conditions [31] :

- 1-Grande capacité calorifique.
- 2-Faible viscosité.
- 3-Coefficient de transfert thermique élevé.
- 4-Haute point de d'ébullition est bas point de congélation.
- 5-Degré d'agressivité faible devant les matériaux constituants le capteur.

Les fluides caloporteurs plus utilisée sont :

✚ l'air

L'air comme agent de transport de calories a un grand avantage par son abondance et sa gratuité, est par l'absence des problèmes de gel et de corrosion ce qui donne au capteur une grande durée de vie est moins de travaux d'entretien.

Mais pour transporter une quantité raisonnable d'énergie il faut utiliser des volumes d'air très importants.

l'air a les avantages suivants :

- ❖ Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- ❖ Pas de problème de corrosion (l'air sec).
- ❖ Toute fuite est sans conséquence.
- ❖ Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux.
- ❖ Le système à mettre en oeuvre est plus simple et plus fiable.

Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :

- ❖ L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux ou pour le séchage solaire.
- ❖ Le produit masse volumique - capacité calorifique, est faible ($\rho \cdot C_p = 1225 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$) pour

l'air contre $4.2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ pour l'eau.

- ❖ Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

✚ l'eau

Un excellent fluide caloporteur pour sa chaleur massique mais le risque de gel pendant les nuits d'hiver et le risque d'ébullition en cas haute température pose des problèmes.

La naissance des couches de tartre dans les canalisations au fil de temps diminue la quantité de chaleur échanges.

✚ les gilotherms

Des liquides organiques a base de polyphényles hydrogénés ou d'hydrocarbures linéaires traités pour ne pas présenter les mêmes défauts que l'eau, leur chaleur massique est $0,5 \text{ Kcal/Kg.K}$.

Ces hydrocarbures se détériorent en présence des traces d'eau ou d'air et combustibles à haute température.

En utilise dans les applications de l'énergie solaire.

III.3.4 Classification des capteurs solaires plans

On peut classer les capteurs selon [36]:

III.3.4.1 Le fluide de travail utilisé

On peut trouver :

✚ Des capteurs solaires à air

Ce type de capteurs s'adapte aux appareils de chauffage à air pour le séchage des produits agro-alimentaires, et le chauffage des locaux.

Des capteurs solaires à eau

Ils s'adaptent aux appareils de chauffage à liquide, y compris ceux dont le liquide entre en ébullition pendant le chauffage (la production de l'eau chaude sanitaire).

Les capteurs à eau peuvent être classés en capteurs à :

- ❖ Faible pression de circulation, tel est le cas du chauffage des piscines.
- ❖ Haute pression de circulation où le circuit d'eau est généralement constitué de tubes de cuivre et de plaques métalliques qui augmentent la surface d'absorption.

L'eau et l'air sont les principaux fluides de travail utilisés pour les capteurs solaires plans, mais il en existe d'autres, tels que les hydrocarbures qui sont utilisés pour la réfrigération et la génération d'électricité.

III.3.4.2. Les types des composants

Les composants des collecteurs diffèrent d'un capteur à un autre, on peut classer les capteurs suivant :

La couverture

Elle peut exister ou pas, on peut alors trouver :

❖ **Les capteurs solaires plans non vitrés**

Ils sont constitués d'un réseau de tubes peints en noir en plastique résistant aux rayons U.V, sans couverture transparente. Ils sont essentiellement utilisés pour le chauffage de l'eau des piscines extérieures en été et assurent des températures relativement basses de l'ordre de 30 à 35°C.

❖ **Les capteurs solaires plans vitrés**

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.

L'absorbeur

L'absorbeur peut être classé suivant sa forme. On trouve :

- ❖ Les capteurs plans.
- ❖ Les capteurs à cavités.

III.3.4.3. 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, et 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.

III.3.5 principes de fonctionnement

Un capteur solaire plan destiné au chauffage des habitations ou à la production d'eau chaude est essentiellement constitué d'une surface absorbante exposée au rayonnement solaire, qui échange avec un fluide caloporteur, les calories produites par absorption du rayonnement incident, et émet en s'échauffant un rayonnement thermique de plus grande longueur d'onde (Loi de Stefan-Boltzman).

Si cet absorbeur est en contact direct avec l'air environnant, en plus des pertes par rayonnement, les pertes par convection peuvent être importantes. Il s'établit alors un équilibre thermique entre l'absorbeur et le milieu ambiant. On capte ainsi peu d'énergie.

Pour réduire les pertes par la face arrière du capteur, l'absorbeur est placé à l'intérieur d'un coffre dont les parois internes sont recouvertes d'un isolant thermique (laine de verre ou mousse synthétique, par exemple).

L'isolation thermique de la face avant est réalisée en interposant entre l'absorbeur et l'air, un matériau opaque au rayonnement thermique, mais transparent au rayonnement solaire. Les verres et certains matériaux synthétiques sont transparents pour le rayonnement solaire, et opaque pour le rayonnement infrarouge lointain. Ils sont donc utilisés en tant que couvertures transparentes des capteurs solaires [26].

Dans un capteur équipé d'une couverture transparente, le rayonnement thermique émis par l'absorbeur est absorbé par la couverture transparente qui s'échauffe et rayonne à son tour par les deux faces. Une certaine quantité du rayonnement se disperse dans le milieu extérieur et l'autre est réémise vers l'absorbeur qui est à l'origine de l'effet de serre.

Un boîtier contenant le tout, calorifugé de manière à réduire les pertes vers l'arrière et les côtés. En général, ces capteurs sont vendus en bloc de 1m² ou 2m², et on assemble plusieurs de ces capteurs pour obtenir les surfaces nécessaires [26].

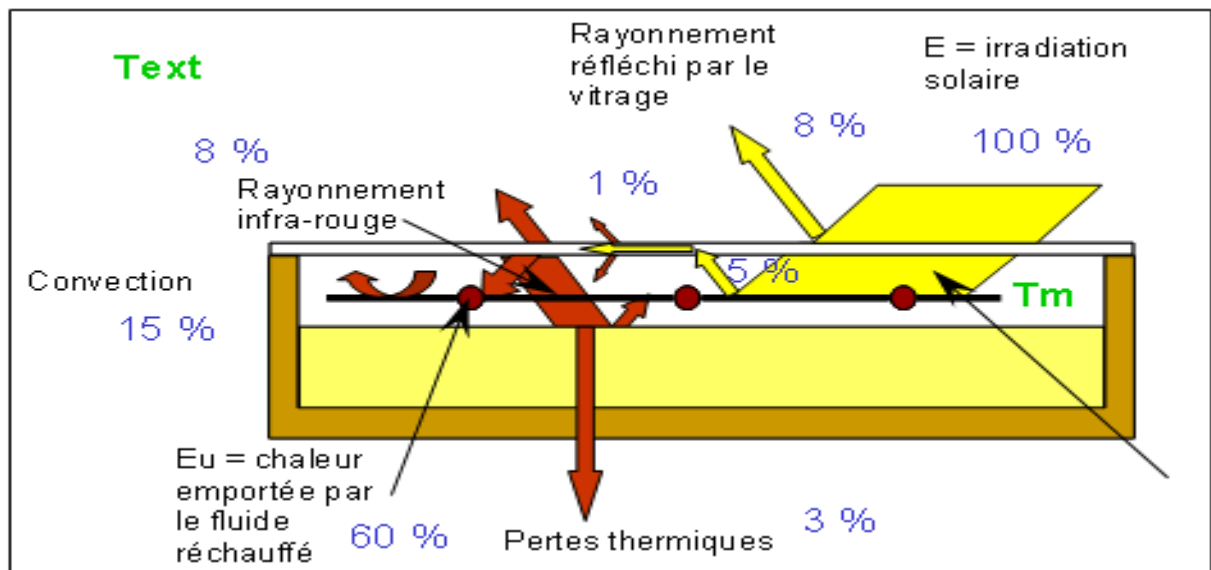


Figure (III-16) Principe de fonctionnement du capteur solaire plan [26].

III.3.6 Les avantages et les inconvénients d'un capteur solaire plan [27]

III.3.6.1 les avantages :

- Prix économique
- Fiabilité
- Longue durée de vie
- Efficacité énergétique
- Intégration aux toitures

III.3.6.2 les inconvénients :

- Ne convient pas pour les hautes températures
- La température interne peut monter très haut lorsqu'il n'y a pas de circulation de liquide.

III.4 Analyse thermique de capteur solaire plan

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

La puissance reçue par le capteur solaire plan est apportée essentiellement par le rayonnement solaire incident qui vient frapper la surface vitré.

La puissance perdue est emportée par l'eau qui circule au niveau de l'absorbeur et cédée à l'environnement ambiant par des pertes de part et d'autre du capteur. Ces échanges sont engendrés par des bilans thermiques au niveau de chaque constituant.

III.4.1 Bilan thermique et calcul de rendement

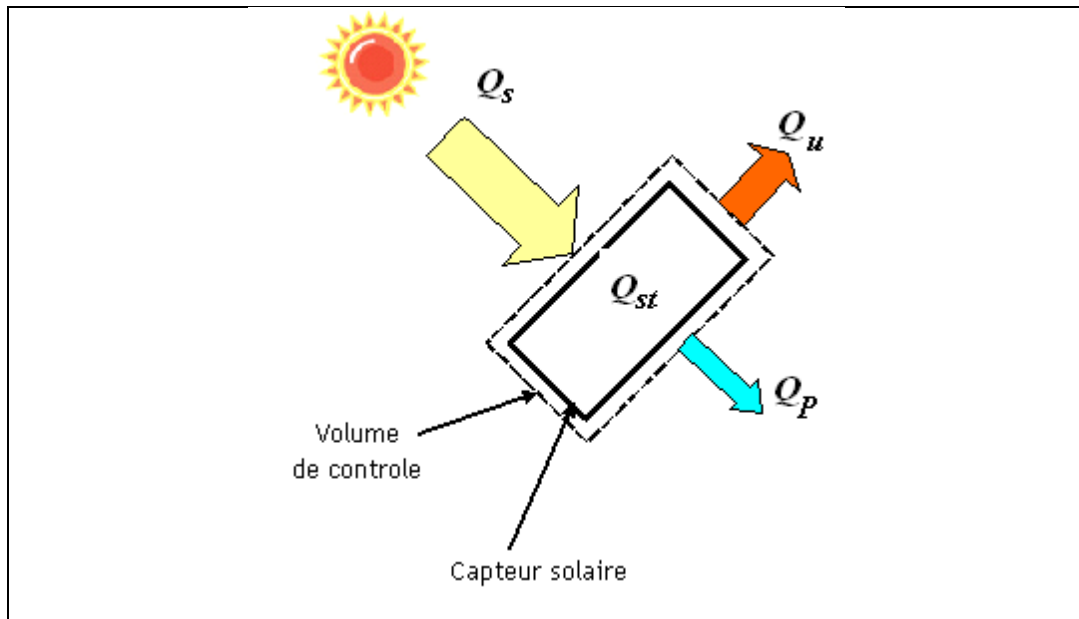


Figure (III-17): Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire [1].

Le bilan thermique d'un élément absorbant s'écrit [1] :

$$Q_{sa} = Q_p + Q_u + Q_{st} \quad (\text{III} - 23)$$

Où:

Q_{sa} : Flux solaire absorbé en $[\text{w}/\text{m}^2]$.

Q_p : Flux perdu par un élément absorbante en $[\text{w}/\text{m}^2]$

Q_u : Flux utile transmis au fluide caloporteur en $[\text{w}/\text{m}^2]$

Q_{st} : Flux stocké dans le capteur $[\text{w}/\text{m}^2]$

Dans le cas du régime thermique permanent et pour les capteurs à air, la quantité d'énergie stockée dans les différentes parties du capteur solaire est négligeable, ce qui conduit à :

$$Q_{sa} = Q_p + Q_u \quad (\text{III} - 24)$$

III.4.1.1 La puissance absorbée

La puissance absorbée par le capteur s'écrit [37]:

$$\varphi_{sa} \approx \tau_{cs} \alpha_{ps} G^*_{(i,\gamma)} S \quad (\text{III} - 25)$$

Où :

φ_{sa} : Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)

$G^* (i,\gamma)$: Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

α_{ps} : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire.

τ_{cs} : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire.

S : Surface de la paroi absorbante.

III.4.1.2 Flux utile

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit [37] :

$$\varphi_u = q_{cf}(T_{fs} - T_{fe}) [W] \quad (\text{III} - 26)$$

Où :

q_{cf} : Débit calorifique du fluide caloporteur ($W \cdot ^\circ C^{-1}$) = débit massique x capacité calorifique

T_{fe} : Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur

T_{fs} : Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

III.4.1.3 Flux perdu

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme [37] :

$$\varphi_p = h_p(T_{pm} - T_a) S [w] \quad (\text{III} - 27)$$

Où :

h_p : Coefficient global de pertes du capteur.

T_{pm} : Température moyenne de la paroi absorbante.

T_a : Température de l'air extérieur.

Dans le cas d'un capteur plan, la température moyenne T_{pm} peut en première approximation être calculée par :

$$T_{pm} = \frac{3T_{fs} + T_{fe}}{4} + \Delta T [^\circ C] \quad (\text{III} - 28)$$

Pour tenir compte de la non-linéarité de l'évolution de la température du fluide dans le capteur et de l'écart de température ΔT existant entre le fluide et la paroi absorbante.

III.4.1.4 Flux stocké

Le flux stocké par le capteur s'écrit [37]:

$$\varphi_{st} = M_f C_f \frac{\partial T}{\partial t} [w] \quad (\text{III} - 29)$$

Où :

M_f : masse en fluide du capteur définie par : $\sum m_i c_i = \sum M_f c_f$, i : représentant les différents éléments constitutifs du capteur

T : Température moyenne du capteur

t : Temps

III.4.2 Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire

Le principe de modélisation consiste à écrire les bilans énergétiques de chaque élément constituant le capteur ; absorbeur, vitre, isolant et fluide caloporteur. Avant d'aborder les calculs il est nécessaire de considérer certaines hypothèses :

- ✓ Les propriétés physiques et thermiques du fluide caloporteur sont données en fonction de sa température moyenne.
- ✓ L'absorbeur étant en métal (acier, cuivre ou aluminium) de faible épaisseur avec une conductivité très élevée.
- ✓ Les deux faces de la vitre sont à la même température.
- ✓ La température ambiante est la même autour du capteur.
- ✓ La température dans le fluide et dans l'absorbeur ne dépend que de la dimension longitudinale (sens de l'écoulement).
- ✓ On néglige la capacité calorifique du vitrage.
- ✓ On néglige l'effet du transfert massique.
- ✓ Initialement la température de tous les composants de système égal à la température de l'ambiance.

Plusieurs modèles sont rencontrés pour ce fait, une méthode de modélisation sont rencontré également:

- Méthode par tranches

III.4.2.1 Méthode par tranche

Cette méthode est aussi dite, la méthode de modélisation " pas à pas " la méthode consiste à découper l'isolateur en tranches fictive de longueur dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur et à écrire les bilans dans chaque tranche. Il est commode pour cela d'utiliser les analogies qui existent entre le transfert de chaleur et le transfert d'électricité.

Les différents échanges thermiques qui ont lieux, sont schématisés par le circuit électrique équivalent figure (III-2)[4].

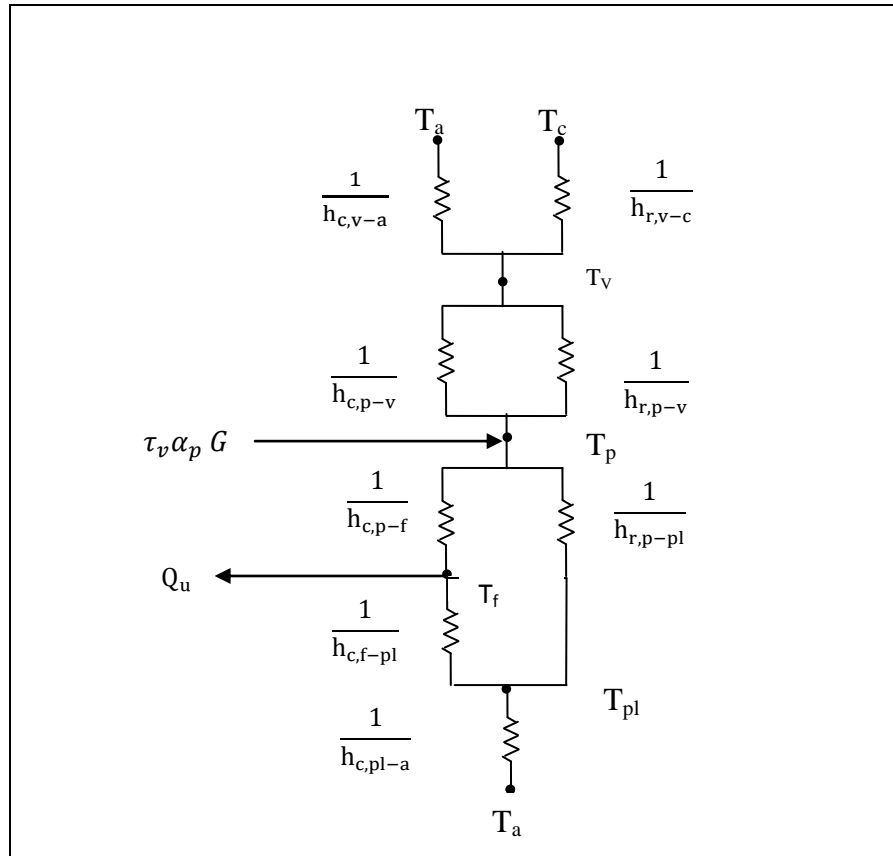


Figure (III-18) Schéma électrique relatif à une section du capteur [4].

A. Bilan thermique de la vitre (indice, v) :

$$h_{r,p-v}(T_p - T_v) + h_{c,p-v}(T_p - T_v) = U_{av1}(T_a - T_v) \quad (\text{III} - 30)$$

B. Bilan thermique de l'absorbeur (indice, p) :

$$(\tau_v, \alpha_p). G = h_{c,p-f}(T_p - T_{fm}) + h_{c,p-v}(T_p - T_v) + h_{r,p-pl}(T_p - T_{pl}) + h_{r,p-v}(T_p - T_v) \quad (\text{III} - 31)$$

C. Bilan thermique du fluide caloporteur (indice, fm) :

$$h_{c,p-f}(T_p - T_{fm}) = h_{c,f-pl}(T_{fm} - T_p) \quad (\text{III} - 32)$$

D. Pour le plan d'écoulement inférieur (coté isolant) (indice, pl)

$$h_{c,pl-f}(T_{fm} - T_{pl}) + h_{r,p-pl}(T_p - T_{pl}) = U_{ar}(T_{pl} - T_a) \quad (\text{III} - 33)$$

Avec :

T_a : Température ambiante [°C]

T_v : Température de la vitre [°C]

T_p : Température d'absorbeur [$^{\circ}\text{C}$]

T_{fm} : Température moyenne du fluide caloporteur, air [$^{\circ}\text{C}$]

T_{pl} : Température de la plaque d'aluminium près de l'isolant [$^{\circ}\text{C}$].

U_{av1} : Coefficient des pertes thermiques à l'avant de la vitre [W/m^2].

U_{ar} : Coefficient des pertes thermiques à l'arrière du capteur [W/m^2].

$h_{r,v-c}$: Coefficient de transfert radiatif entre la vitre la voûte céleste [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ k}$].

$h_{r,p-v}$: Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ k}$].

$h_{r,p-pl}$: Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ k}$].

$h_{c,v-a}$: Coefficient de transfert convectif entre la vitre et l'air ambiant [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ k}$].

$h_{c,p-v}$: Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la vitre [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ k}$].

$h_{c,p-f}$: Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et le fluide [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ k}$].

$h_{c,f-pl}$: Coefficient de transfert convectif entre le fluide et la plaque d'aluminium [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ k}$].

$h_{c,pl-a}$: Coefficient de transfert convectif entre la plaque d'aluminium et l'ambiance [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ k}$].

G : Flux solaire global reçu par le capteur plan.

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre.

α_p : Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

Considérons une tranche d'écoulement de longueur dx . La conservation de l'énergie dans cette tranche nous donne, sachant que l_c est la largeur du capteur :

$$\dot{m}.C_p.T_f + Q_u.l_c.dx = \left[\dot{m}.C_p.T_f + \frac{dT_f}{dx} . dx \right] \Rightarrow \frac{dT_f}{dx} = \frac{Q_u.l_c}{\dot{m}.C_p} \quad (\text{III} - 34)$$

Avec:

\dot{m} : Débit massique [kg/s].

C_p : Capacité calorifique massique du fluide à pression constante [$\text{J}/\text{kg.k}$].

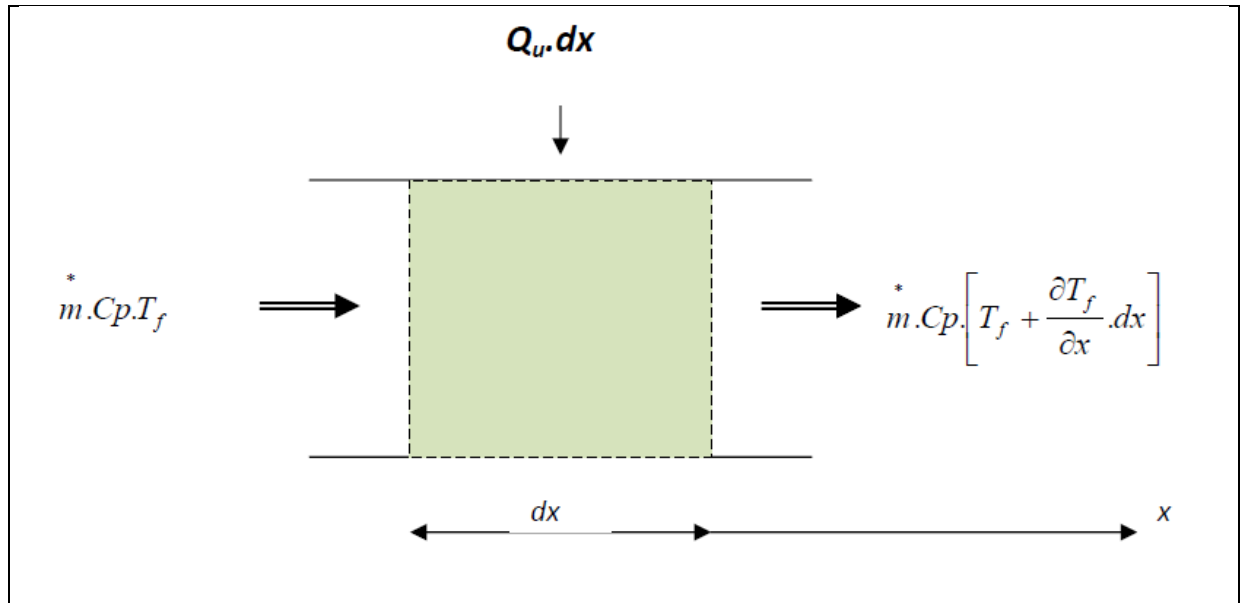


Figure (III-19) Tranche fictive de longueur dx [4].

On suppose que la température et le transfert de chaleur avec le fluide caloporteur de température T_f est uniforme le long du capteur de longueur L d'où :

$$\int_{x=0}^{x=L} \frac{dT_f}{dx} dx = \int_{x=0}^{x=L} \frac{Q_u \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p} dx \quad (\text{III} - 35)$$

Nous aurons :

$$T_f(x) = \left[\frac{Q_u \cdot l_c}{\dot{m} C_p} \right] \cdot x + T_{fe} \quad (\text{III} - 36)$$

D'où ,

$$T_{fs} = \left[\frac{Q_u \cdot l_c}{\dot{m} C_p} \right] \cdot L + T_{fe} \quad (\text{III} - 37)$$

Où T_{fe} est la température d'entrée du fluide dans le capteur , T_{fs} est sa température à la sortie.

D'autre part, nous supposons aussi que la température du fluide varie linéairement tout le long du capteur, la valeur moyenne de la température est égale donc à la moyenne arithmétique entre l'entrée et la sortie.

$$T_{fm} = \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2} \quad (\text{III} - 38)$$

Des deux dernières équations, on déduit :

$$Q_u = \frac{2 \cdot \dot{m} C_p (T_{fm} - T_{fe})}{A} \quad (\text{III} - 39)$$

$$\text{Où : } A = L \cdot l_c \quad (\text{III} - 40)$$

En remplaçant la valeur du flux transmis au fluide Q_u dans le système d'équation du bilan on aura :

$$(h_{r,p-v} + h_{c,p-v} + U_{av1})T_v - (h_{r,p-v} + h_{c,p-v})T_p = U_{av1} \cdot T_a \quad (\text{III} - 41)$$

$$\begin{aligned} (h_{c,p-v} + h_{r,p-v})T_v + (h_{c,p-f} + h_{c,p-v} + h_{r,p-pl})T_p + h_{c,p-f}T_{fm} + h_{r,p-pl}T_{pl} \\ = \alpha_p \cdot \tau_v \cdot G \quad (\text{III} - 42) \end{aligned}$$

$$h_{c,p-f} \cdot T_p - \left(h_{c,p-f} + h_{c,f-pl} + \frac{2\dot{m}C_p}{A} \right) T_{fm} + h_{c,f-pl}T_{pl} = \frac{2\dot{m}C_p}{A} T_{fe} \quad (\text{III} - 43)$$

$$h_{r,p-pl}T_p + T_{fm}h_{c,pl-f} - (h_{c,pl-f} + h_{r,p-pl} + U_{ar})T_{pl} = -U_{ar}T_a \quad (\text{III} - 44)$$

Ce système d'équation peut être mis sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} T_v a_{11} + T_p a_{12} + T_{fm} a_{13} + T_{pl} a_{14} = b_1 \\ T_v a_{21} + T_p a_{22} + T_{fm} a_{23} + T_{pl} a_{24} = b_2 \\ T_v a_{31} + T_p a_{32} + T_{fm} a_{33} + T_{pl} a_{34} = b_3 \\ T_v a_{41} + T_p a_{42} + T_{fm} a_{43} + T_{pl} a_{44} = b_4 \end{cases} \quad (\text{III} - 45)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} T_v \\ T_p \\ T_{fm} \\ T_{pl} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}$$

Les températures peuvent être déterminées par $\{T\} = [A]^{-1} \cdot \{B\}$: en connaissant les valeurs des coefficients d'échanges thermiques ainsi que les pertes à l'avant et à l'arrière, les valeurs des coefficients des pertes globales par l'avant du capteur U_{av1} et par l'arrière U_{ar} définis par les expressions :

$$U_{av1} = h_{c,v-a} + h_{r,v-c}, \quad h_{r,v-c} = h_{r,v-a} \text{ et } U_{ar} = \frac{1}{\left[\sum \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{vent}} \right]}, \quad h_{vent} = h_{c,v-a}$$

e_{is} : Épaisseur de l'isolant placé à l'arrière du capteur [m]

III.4.2.2 Évaluations des coefficients des changes radiatif et convectif [1]

III.4.2.2.1 Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant dû au vent $h_{c,v-a}$

donné par la relation de Hottel et Woertz:

$$h_{c,v-a} = 5.67 + 3.86V_{vent} \quad \text{et} \quad 0 \leq V_{vent} < 10 \text{ m/s} \quad \left(\frac{W}{m^2K} \right).$$

III.4.2.2.2 Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'absorbeur $h_{c,v-p}$

L'échange entre la vitre et l'absorbeur, à travers la lame d'air immobile si elle existe, est une convection naturelle, est exprimé en fonction du nombre de Rayleigh par la corrélation de Hollands et al (1976).

$$h_{c,p-v} = \lambda_a/d \left\{ 1 + 1.44[1 - R]^+(1 - R(\sin 1.8\beta)^{1.6}) + \left[0.66416R^{-1/3} - 1 \right]^+ \right\} \quad (\text{III} - 46)$$

$$\text{ou: } R = \frac{1708}{R_a \cos \beta}$$

$$R_a: \text{ Etant le nombre de Rayleigh, } R_a = \frac{gB'\Delta T d^3}{\alpha \nu}$$

g : Accélération de la pesanteur [m/s^2]

$$B': \text{ Coefficient de dilatation thermique de l'air, } B' = 1/T \quad \left[\frac{1}{K^\circ} \right]$$

ΔT : Écart de température entre la vitre et l'absorbeur, [K°]

d : Distance entre la vitre et l'absorbeur, [m]

α : Diffusivité thermique de la lame d'air entre la vitre et l'absorbeur, $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

ν : Viscosité cinétique du milieu, $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

λ_a : Conductivité thermique de la lame d'air entre la vitre et l'absorbeur (air) [W/mK]

β : Angle d'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontal en degré.

L'exposant [$^+$] implique seulement les valeurs positives dans les supports carrés qui devraient être utilisés (on le néglige lorsqu'elles deviennent négatives). D'autres corrélations peuvent être également employées, on cite en particulier celles établies par Ucar et Inalli.

$$\begin{cases} 100 < R_e < 2100 & N_u = 0.344R_e^{0.35} \\ 2100 < R_e < 2850 & N_u = 16810^{-9}R_e^{2.25} \\ 2850 < R_e < 5650 & N_u = 2.5510^{-3}R_e^{1.04} \\ 5650 < R_e < 100000 & N_u = 19.810^{-8}R_e^{0.8} \end{cases} \quad (\text{III} - 47)$$

III.4.2.2.3 Échanges convectifs entre l'absorbeur et le fluide $h_{c,p-f}$, échanges convectifs entre le fluide et l'isolant $h_{c,f-pl}$

Pour augmenter la valeur du coefficient d'échange entre le fluide et l'absorbeur, il faut favoriser l'échange, et par suite l'énergie transférée. Cela est réalisable de plusieurs façons :

- Utilisations des chicanes qui canalisent le fluide caloporteur et augmente le temps de son passage dans le capteur en allongeant son parcours.
- Accroissement de la surface d'échange entre l'absorbeur et le fluide caloporteur par introduction de plusieurs rangées d'ailettes.

Diverses corrélations ont été développées pour déterminer ce coefficient. En ce qui concerne la convection forcée, et dans le cas des conduits rectangulaires on peut utiliser l'expression empirique suivante.

$$Nu = 0.0196 \cdot Re \cdot Pr^{1/8}$$

$$h_{c,p-f} = h_{c,f-pl} = \frac{Nu \lambda}{D_H} \quad (\text{III} - 48)$$

En $w / (m^2 \cdot k)$ avec $Re = \frac{v \cdot D_H}{\nu}$

Pr : Le nombre de Prandtl .

D_H : Diamètre hydraulique (dimension caractéristique)

ν : Viscosité cinématique $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

D'autres relations reliant Nu à Pr et Re ont été proposées par Manglik et Buelow (1995), Kays ainsi que Tan et Charters.

Les corrélations de Sieder-Tate et Hausen, souvent adoptées; elles dépendent du régime d'écoulement caractérisé par la valeur du nombre de Reynolds, introduisent le nombre adimensionnel de Graetz, défini par :

$$G_Z = Re \cdot Pr \frac{D_H}{L}$$

Tels que :

- Pour le régime laminaire : $Re < 2100$

$$\begin{cases} Nu = 3.66 + 0.085 \cdot \left(1 + 0.047 \cdot G_Z^{2/3} \right) & \text{pour } G_Z < 100 \\ Nu = 1.86 \cdot G_Z^{1/3} + 0.87 \cdot \left(1 + 0.015 \cdot G_Z^{1/3} \right) & \text{pour } G_Z < 100 \end{cases} \quad (\text{III} - 49)$$

- Pour le régime transitoire : $2100 < Re < 10000$

$$Nu = 0.116 \left(Re^{2/3} - 125 \right) \cdot Pr^{1/3} \cdot \left[1 + (D_H/L)^{2/3} \right] \quad (\text{III} - 50)$$

- Pour le régime turbulent : $Re > 10000$

$$Nu = 0.027 \cdot Re^{0.8} Pr^{0.33} \quad (\text{III} - 51)$$

III.4.2.2.4 Coefficient de transfert radiatif entre la vitre la voûte céleste $h_{r,v-c}$

Le coefficient de transfert radiatif entre la vitre et la voûte céleste peut être donné par la formule suivante :

$$h_{r,v-c} = \sigma \cdot \frac{(T_v + T_c)(T_v^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\epsilon_v}} \quad (\text{III} - 52)$$

Où, σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}^4$).

La température de la voûte céleste est donnée par la formule de Swinbank

$$T_c = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \quad (\text{III} - 53)$$

III.4.2.2.5 Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre $h_{r,p-v}$

Le coefficient de transfert radiatif entre la vitre et l'absorbeur est donné par:

$$h_{r,p-v} = \sigma \cdot \frac{(T_p + T_v)(T_p^2 + T_v^2)}{\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1} \quad (\text{III} - 54)$$

Avec :

ϵ_v : Emissivité de la vitre.

ϵ_p : Emissivité de l'absorbeur.

III.4.2.2.6 Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et l'isolant $h_{r,p-pl}$

Le coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la face inférieure de l'absorbeur et la plaque inférieure où les températures T_p, T_{pl} sont exprimées en Kelvin, est donné par J.F. Sacadura, Il s'écrit ainsi :

$$h_{r,p-pl} = \sigma \cdot \frac{(T_p + T_{pl})(T_p^2 + T_{pl}^2)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_{pl}} - 1} \quad (\text{III} - 55)$$

III.4.2.3 Perte globale d'énergie

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 [26].

En reprenant le schéma descriptif du circuit électrique équivalent Figure (III-18) et on suppose les hypothèses suivantes:

- Le régime thermique est permanent.
- Les températures T_v , T_p , T_{p1} sont uniformes tout le long du capteur.
- La puissance solaire absorbée par la vitre est négligeable.
- La conductance dans la vitre est négligeable.
- Les pertes latérales sont faibles devant les pertes avant et arrière.

Ces hypothèses nous permettent d'exprimer les pertes globales de l'absorbeur Q_p par m^2 de surface de captation du capteur à l'aide du coefficient de pertes U_L et l'inverse est la résistance au transfert thermique entre les potentiels T_p et T_a :

$$Q_p = U_L(T_p - T_a) = Q_{p1} + Q_{p2} \quad (\text{III} - 56)$$

Où,

Q_{p1} : la quantité de chaleur perdue à l'avant du capteur.

Q_{p2} : la quantité de chaleur perdue à l'arrière du capteur.

On définit ainsi :

$R_{c,v-a} = \frac{1}{h_{c,v-a}}$: Résistance thermique entre la vitre et l'ambiance due à l'échange convectif.

$R_{c,p-v} = \frac{1}{h_{c,p-v}}$: Résistance thermique entre l'absorbeur et la vitre due à l'échange convectif.

$R_{r,v-c} = \frac{1}{h_{r,v-c}}$: Résistance thermique entre la vitre et l'ambiance due à l'échange radiatif.

$R_{r,v-p} = \frac{1}{h_{r,v-p}}$: Résistance thermique entre l'absorbeur et la vitre due à l'échange radiatif.

Avec,

$$h_{r,v-c} = \sigma \cdot \frac{(T_v + T_c)(T_v^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\epsilon_v}} \quad (\text{III} - 57)$$

III.4.2.3.1 Coefficient des pertes thermiques vers l'avant du capteur U_{av1}

La résistance thermique équivalente par l'avant du capteur est :

$$\frac{1}{R_{eq,v-a}} = \frac{1}{R_{c,v-a}} + \frac{1}{R_{r,v-a}} = h_{c,v-a} + h_{r,v-a} = U_{av1} \quad (\text{III} - 58)$$

$$\frac{1}{R_{eq,v-p}} = \frac{1}{R_{c,v-p}} + \frac{1}{R_{r,v-p}} = h_{c,v-p} + h_{r,v-p} = U_{av2} \quad (\text{III} - 59)$$

$$\text{Alors,} \quad R_{eq,p-a} = R_{eq,v-p} + R_{eq,v-a} = \frac{1}{U_{av1}} + \frac{1}{U_{av2}} \quad (\text{III} - 60)$$

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

$$U_{av} = \frac{1}{R_{eq,p-a}} - \left[\frac{1}{U_{av1}} + \frac{1}{U_{av2}} \right]^{-1} \quad (\text{III} - 61)$$

III.4.2.3.2 Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur U_{ar} :

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 donnée par:

$$U_{ar} = \frac{1}{\left[\sum \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{vent}} \right]} \quad (\text{III} - 62)$$

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'extérieur est la somme des deux coefficients :

$$U_L = U_{av} + U_{ar} \quad (\text{III} - 63)$$

III.4.2.4 Rendements d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante [29]:

➤ Le rendement global :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{G^*(i,\gamma) S} \quad (\text{III} - 64)$$

➤ Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{\varphi_u}{\varphi_{sa}} \quad (\text{III} - 65)$$

➤ Le rendement optique :

$$\eta_0 = \frac{\varphi_{sa}}{G^*(i,\gamma) S} \quad (\text{III} - 66)$$

S : Surface de la paroi absorbante.

φ_{sa} : Flux solaire absorbé.

φ_u : Flux utile transmis au fluide caloporteur.

$G^*(i,\gamma)$: Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur (W.m^{-2})

. On définit également des rendements moyens sur une période donnée (jour, mois, année). Pour ce faire, on intègre la relation du bilan sur la période choisie:

$$\int_0^t \varphi_{sa} dt = \int_0^t \varphi_u dt + \int_0^t \varphi_{p \rightarrow} dt \quad \text{soit} \quad Q_{sa} = Q_u + Q_{p \rightarrow}$$

On définit alors les rendements global η , interne η_i et optique η_0 moyens du capteur sur la période considérée par :

$$\bar{\eta} = \frac{Q_u}{\int_0^t G^*_{(i,\gamma)} S dt} \quad (\text{III} - 67)$$

$$\bar{\eta}_i = \frac{Q_u}{Q_{sa}} \quad (\text{III} - 68)$$

$$\bar{\eta}_0 = \frac{Q_{sa}}{\int_0^t G^*_{(i,\gamma)} S dt} \quad (\text{III} - 69)$$

Ces rendements sont à considérer lors d'un calcul de dimensionnement d'un capteur solaire. Il ne faut pas les confondre avec les rendements instantanés qui sont toujours plus élevés (un rendement journalier moyen tient compte du refroidissement nocturne par exemple).

❖ **Rendement instantané du capteur solaire:**

L'analyse faite dans ce domaine par **Hottel, Willier, Wortz et Bliss** permet d'aboutir à une équation unique donnant le rendement instantané du capteur que l'on définit par le rapport suivant [29] :

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par } m^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}}$$

$$\eta = \frac{Q_u}{G} \quad (\text{III} - 70)$$

IV.1 Introduction

Pour la simulation de notre modélisation, nous avons fait une programmation dans l'environnement MATLAB,

MATLAB est une abréviation de *Matrix LABORatory*. C'est un environnement complet, ouvert et extensible pour le calcul et la visualisation. Il dispose de plusieurs centaines (voir milliers, selon les versions et les modules optionnels autour des noyaux Matlab) de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. L'approche matricielle de MATLAB permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symboliques de façon fiable et rapide. Grâce aux fonctions graphiques de MATLAB, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits [31].

Dans ce chapitre on a deux partis :

IV.2 Modélisation de rayonnement solaire

IV.2.1 Estimation de l'irradiation incidente sur le plan du capteur

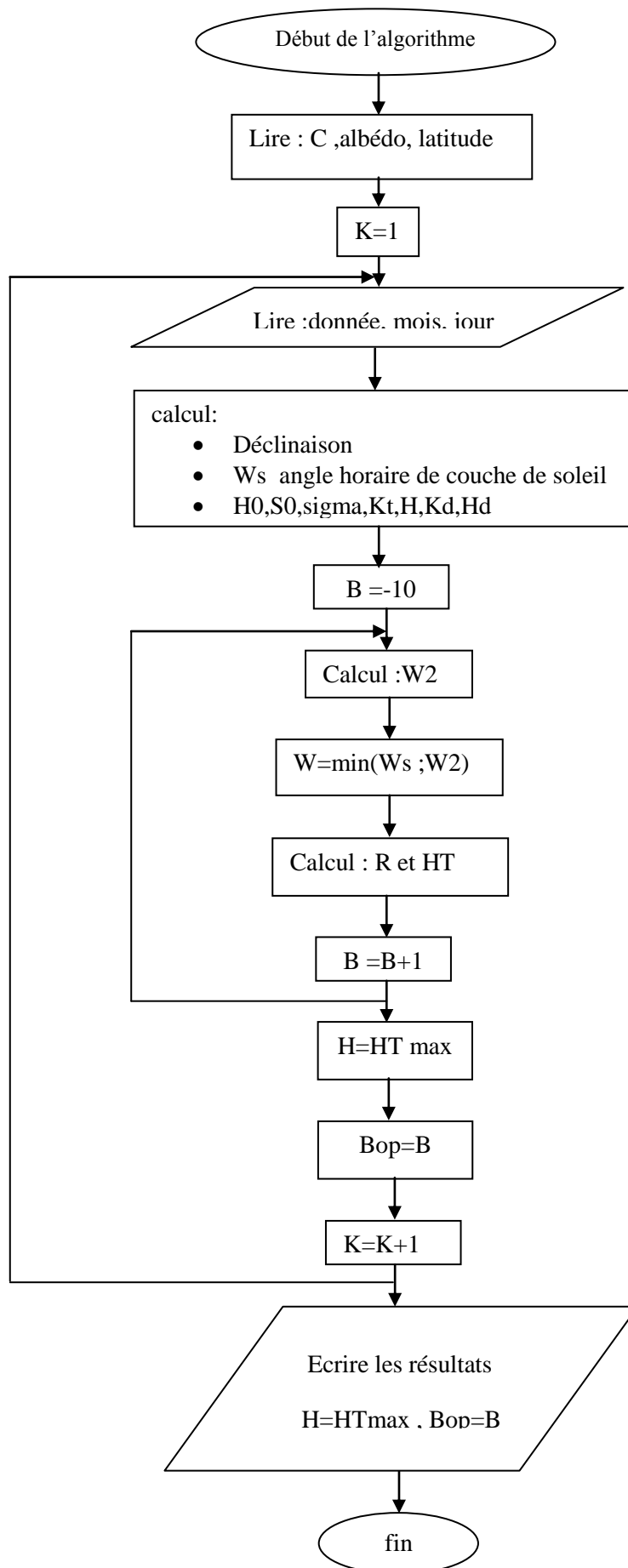
IV.2.1.1 Inclinaison optimale d'un capteur

L'angle pour lequel le capteur doit être incliné pour capter le maximum de rayonnement solaire s'appelle l'angle d'inclinaison optimal du capteur, ce qui revient à le positionner perpendiculairement aux rayons incidents du soleil.

Compte tenu des mouvements permanents de la terre et du soleil, à chaque instant correspond une inclinaison optimale, donc la meilleure solution serait d'équiper le capteur d'un mécanisme de poursuite, mais cette solution n'est pas gratuite

Pour obtenir l'angle d'inclinaison optimal pour une irradiation maximale reçue sur un capteur incliné, on fait varier l'angle d'inclinaison dans le mois afin d'identifier l'angle pour laquelle l'énergie reçue atteint sa valeur maximale.

IV.2.1.1.1 Organigramme du calcul numérique du modèle recherché l'angle optimale



On fait varier l'angle d'inclinaison β du mois hiver jusqu'à l'obtention de l'énergie maximale, ainsi on obtient l'angle d'inclinaison optimale mensuelle.

✚ Mois décembre (Cas d'adrar)

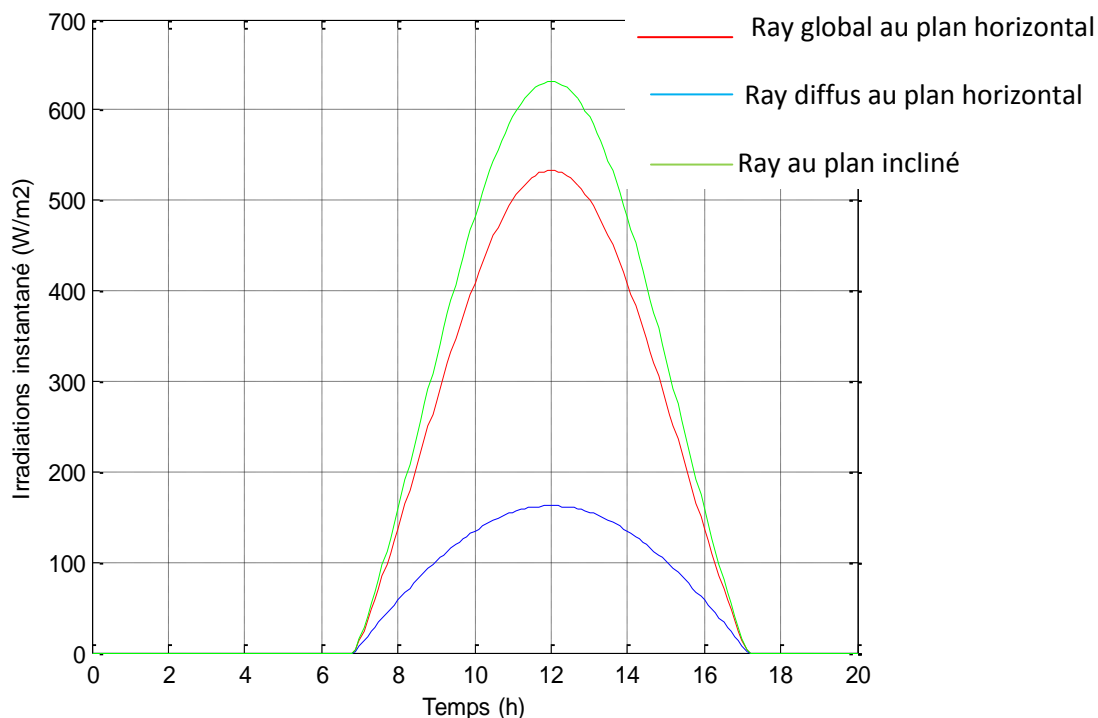


Figure IV.1: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 10°

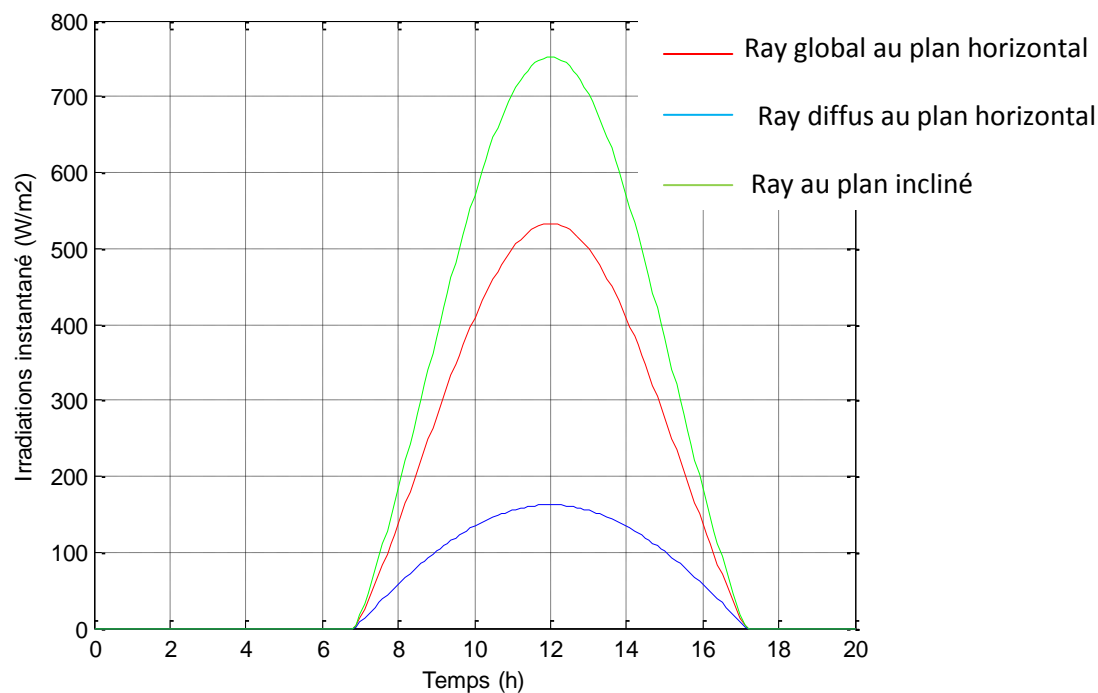


Figure IV.2: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 25°

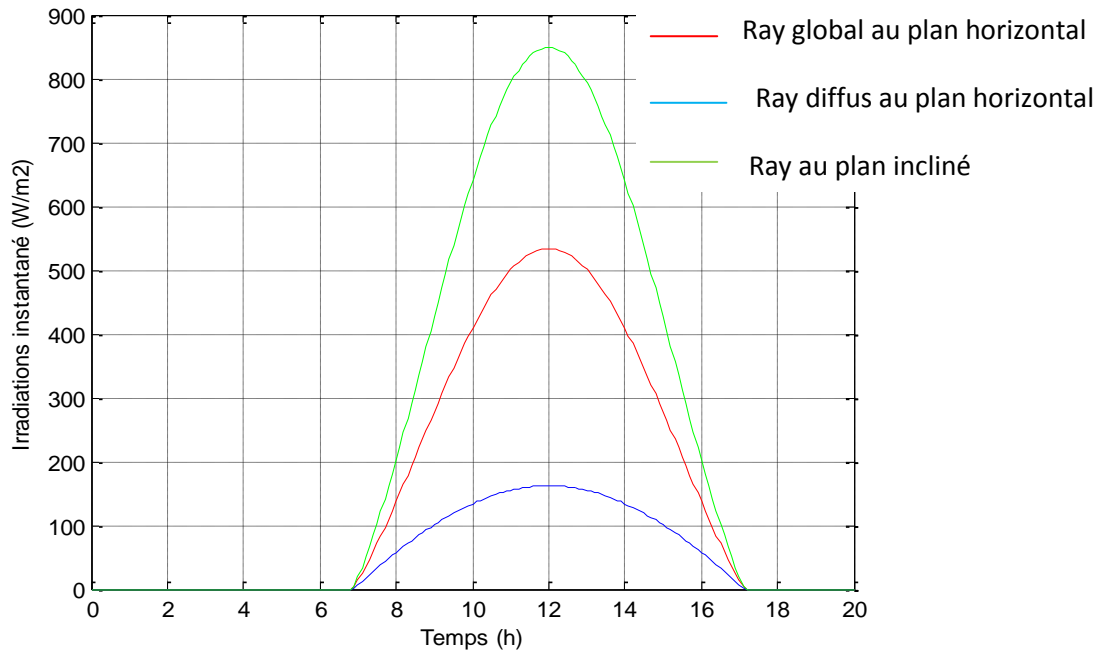


Figure IV.3: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 45°

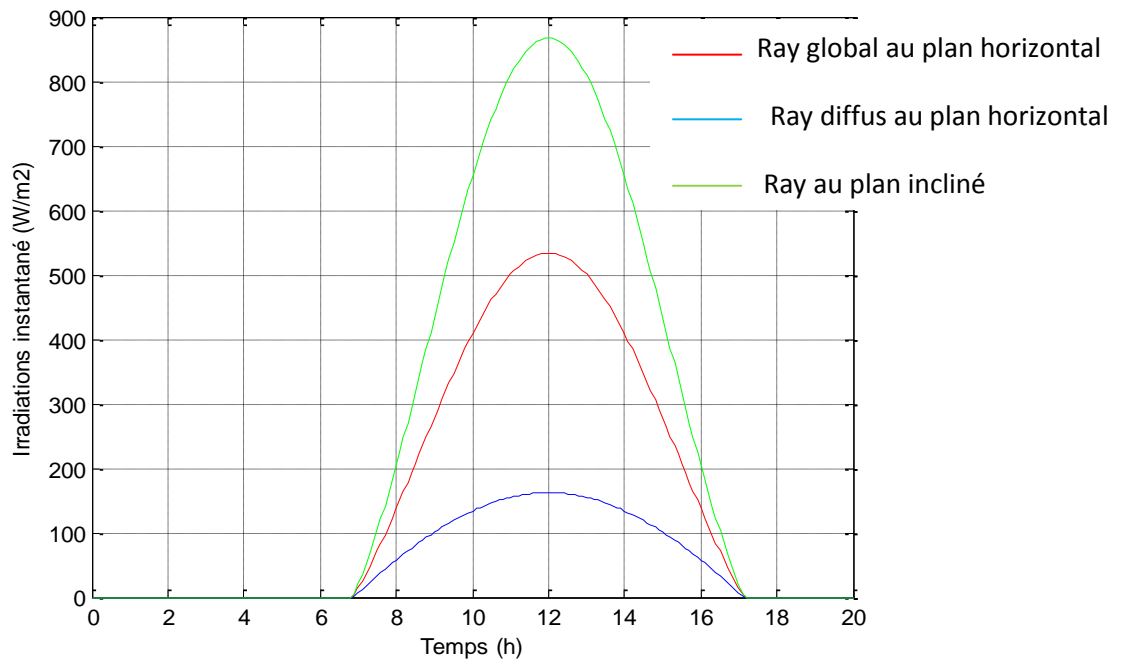


Figure IV.4: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 60°

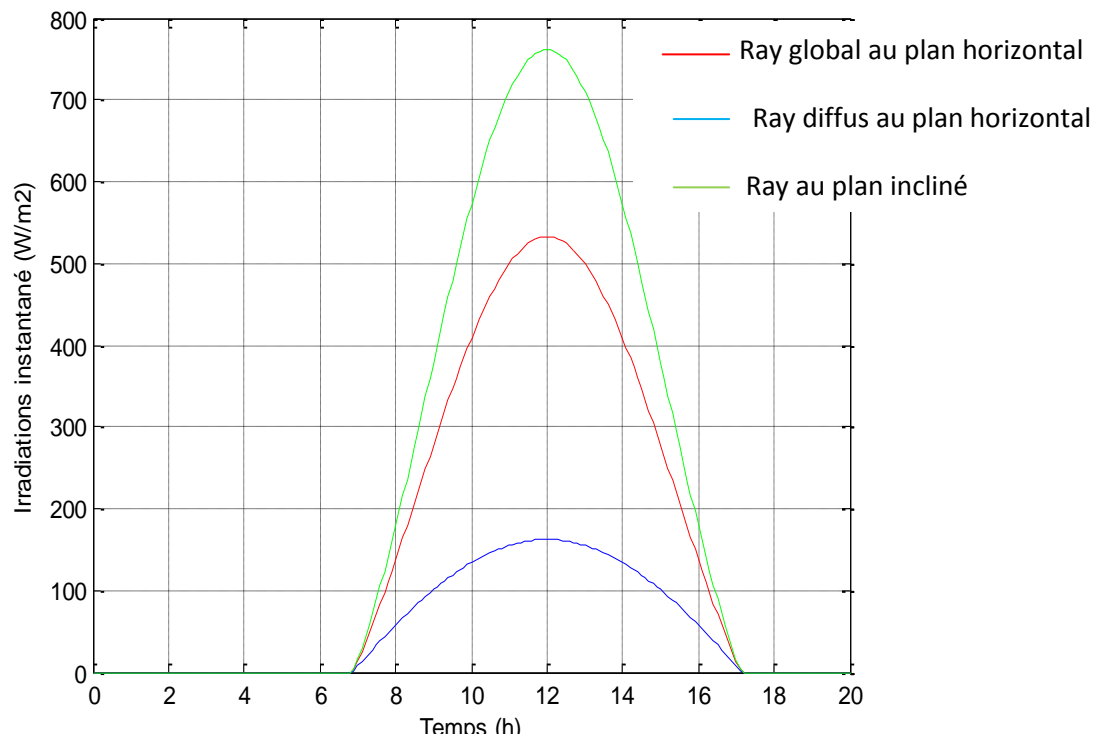


Figure IV.5: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 90°

✚ Le mois janvier (Cas d'adrar)

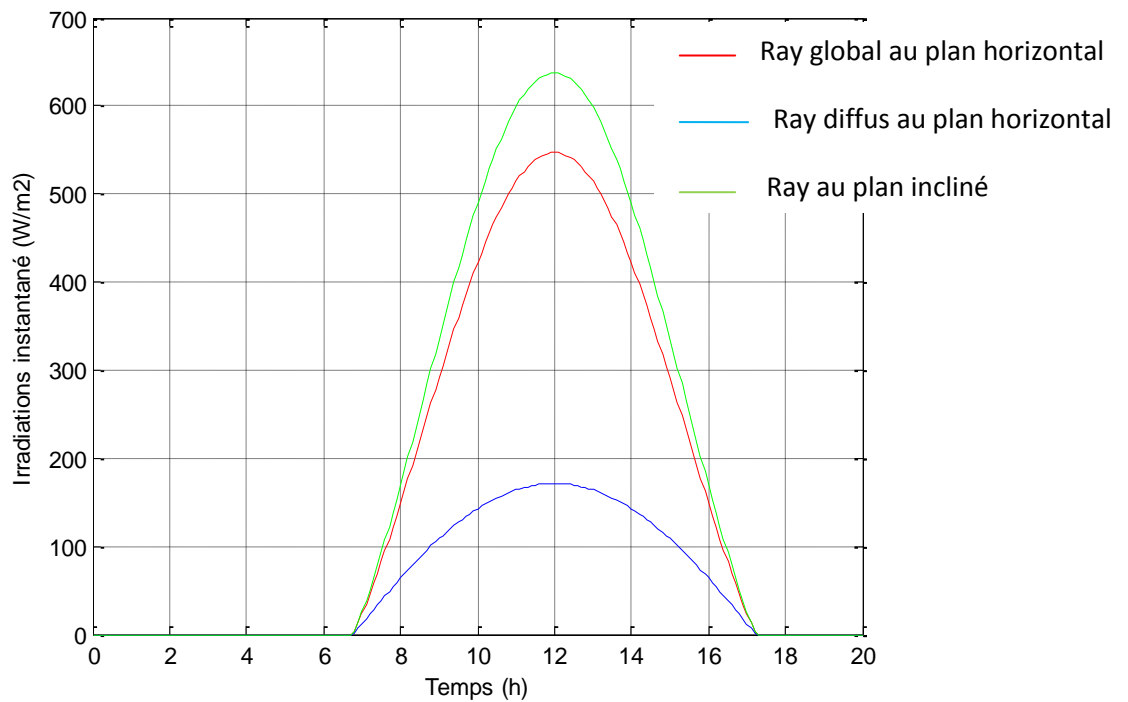


Figure IV.6: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 10°

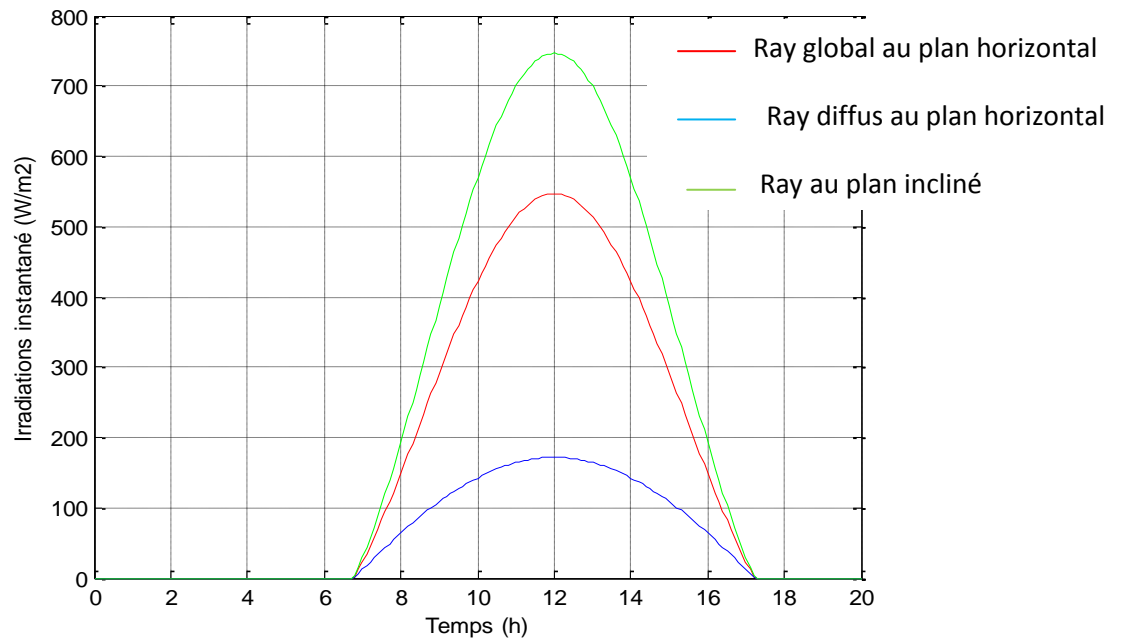


Figure IV.7: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 25°

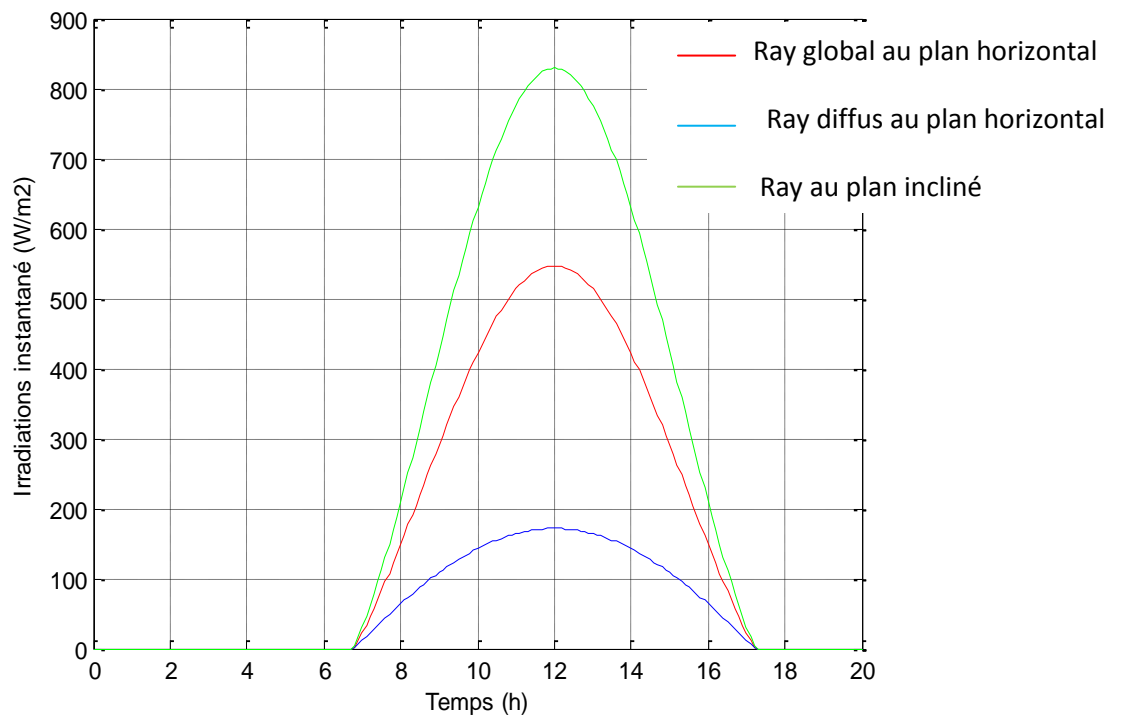


Figure IV.8: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 45°

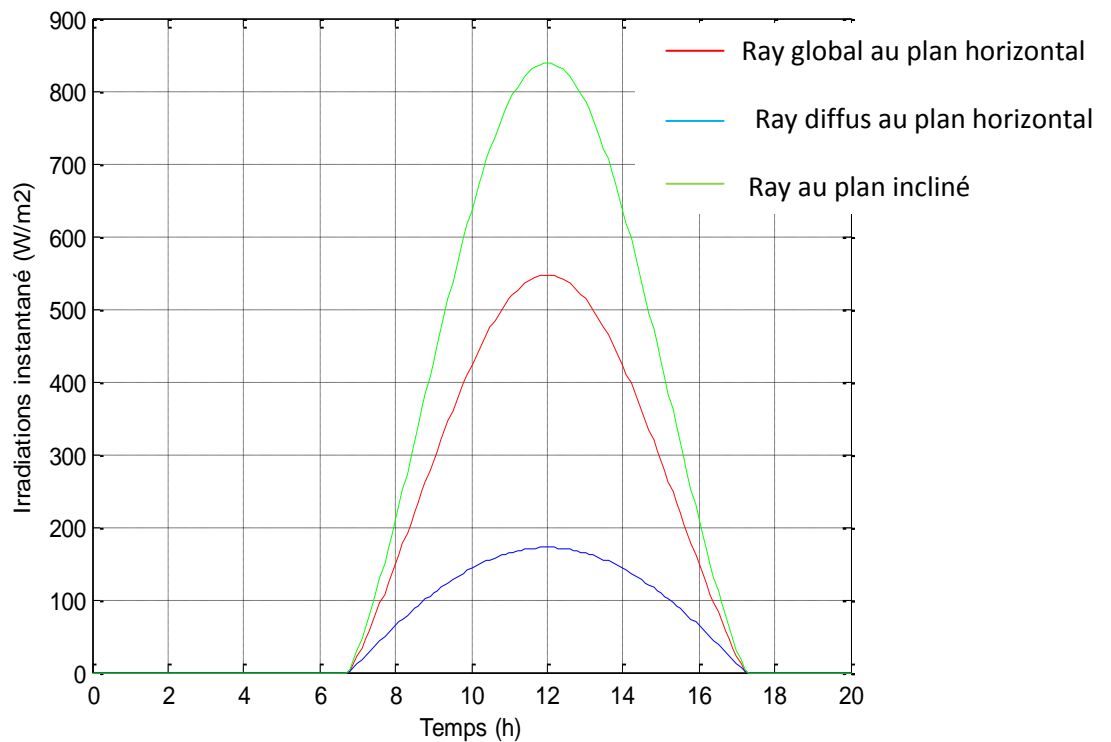


Figure IV.9: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 60°

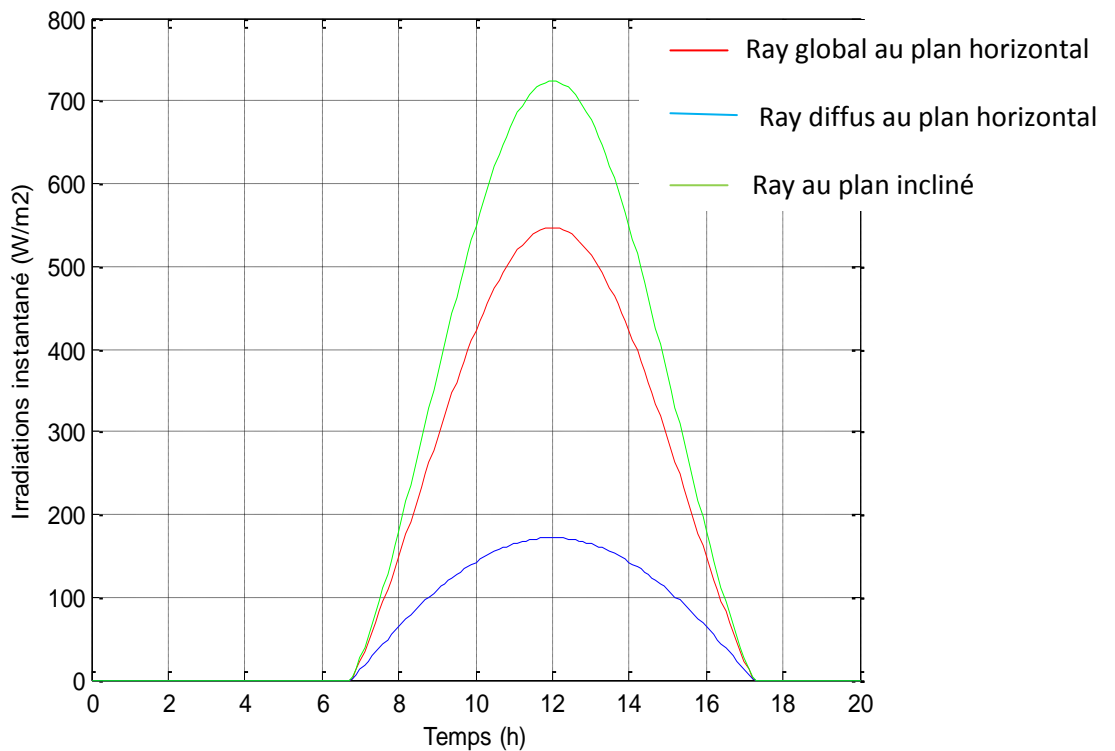


Figure IV.10: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 90°

✚ Le mois février (Cas d'adrar)

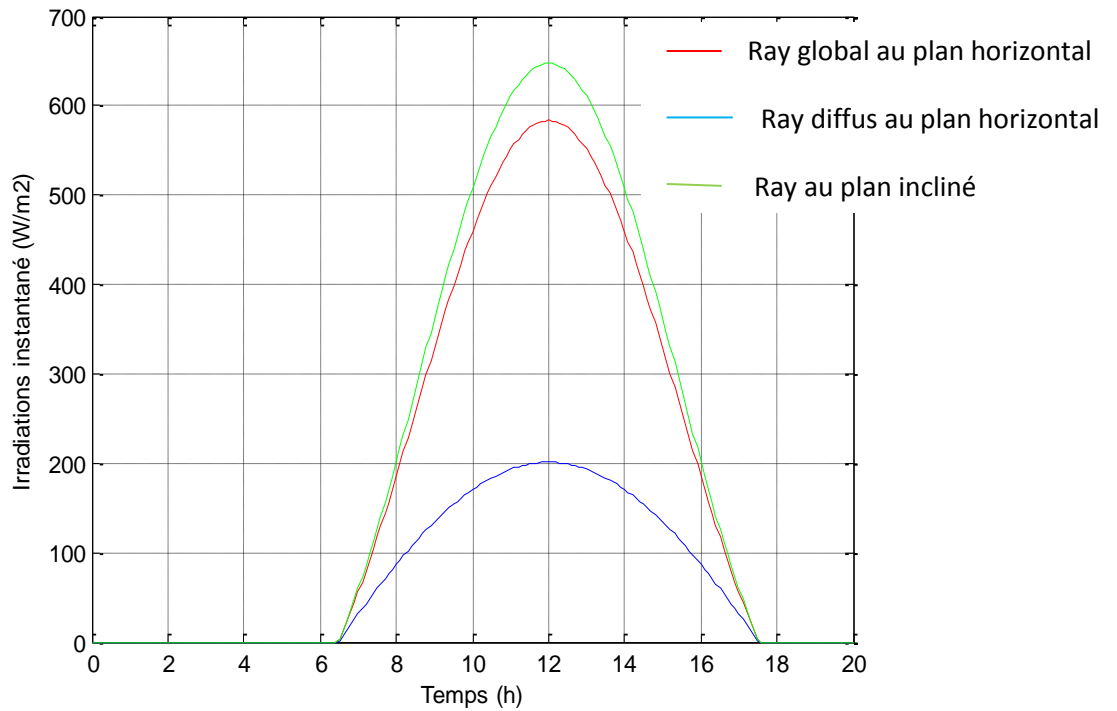


Figure IV.11: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 10°

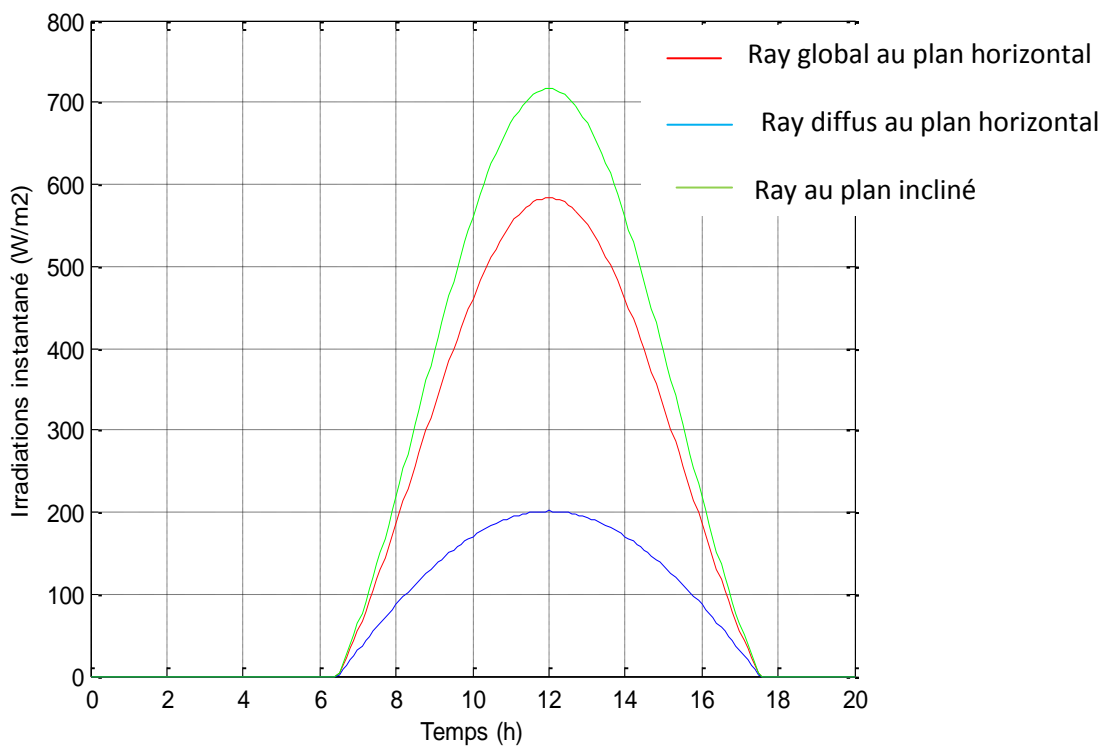


Figure IV.12: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 25°

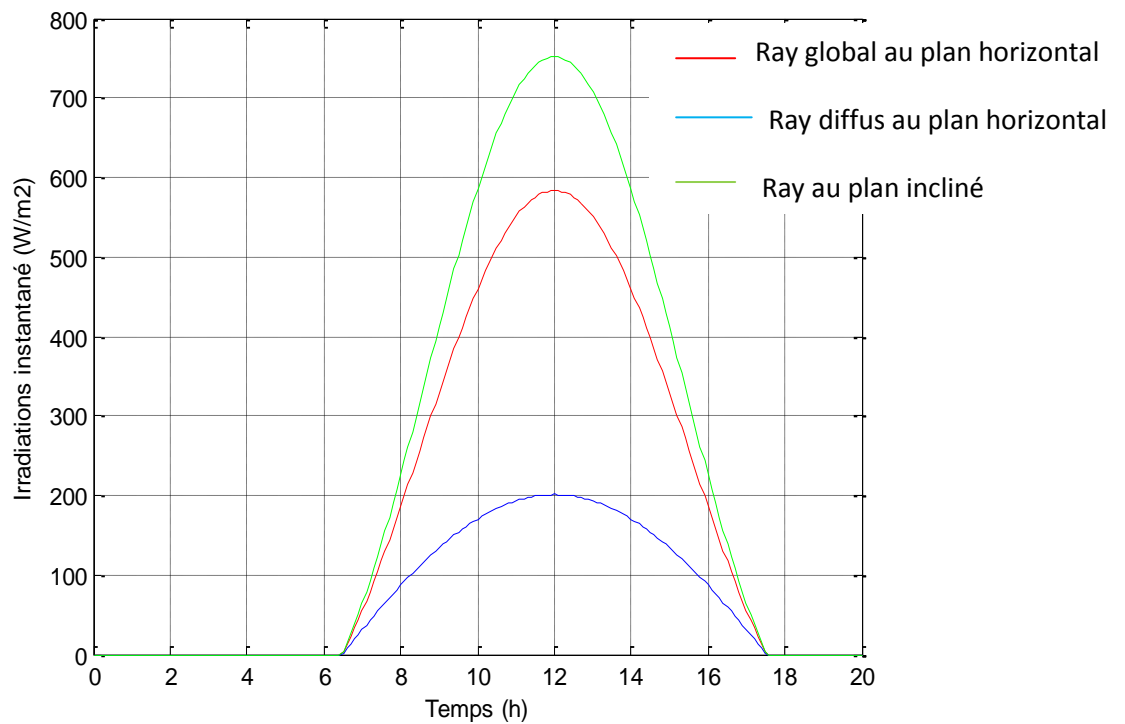


Figure IV.13: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 45°

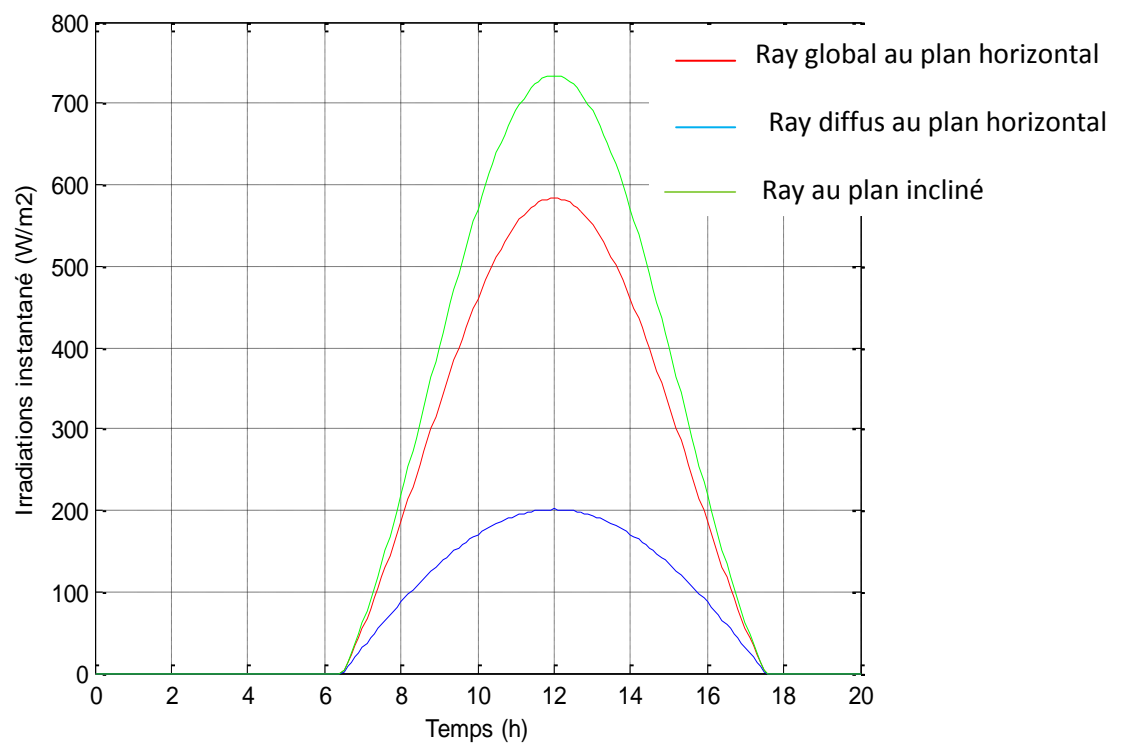


Figure IV.14: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 60°

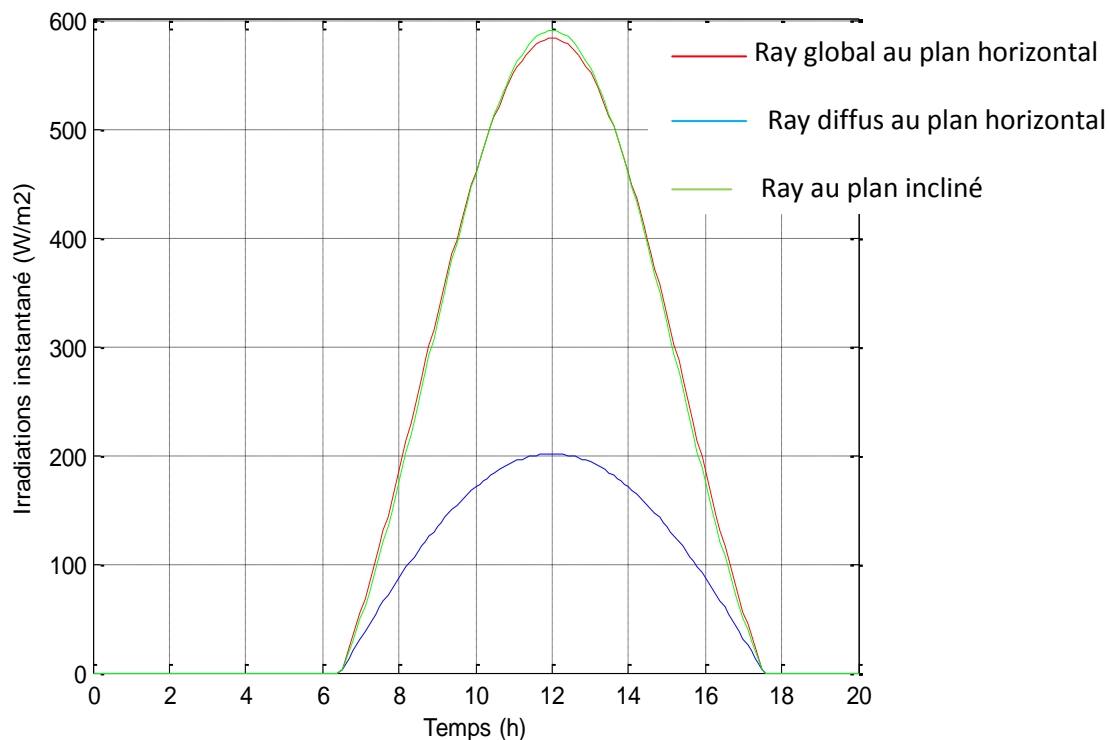


Figure IV.15: l'irradiation incident sur plan du capteur avec une inclinaison égale à 90°

Les figures représentent l'irradiation incidente sur plan du capteur (globale, diffus et incliné) en (hiver décembre, janvier et février) on remarque que l'irradiation diffus est très petite par rapport à l'irradiation globale et incliné.

On peut résumer l'angle optimal et les irradiances maximales des trois mois sur le tableau suivant :

| Le mois | L'angle optimal ($^\circ$) | L'irradiation maximale (wh/m ²) |
|----------|------------------------------|---|
| Décembre | 60 | 867 |
| Janvier | 60 | 839 |
| Février | 45 | 752 |

Tableau (IV-1) : les irradiances maximales en hiver.

✚ L'angle optimal de chaque mois

| Le mois | Angle optimal (°) | L'irradiation (wh/m ²) | L'irradiation moyenne (wh/m ²) |
|-----------|-------------------|------------------------------------|--|
| Décembre | 60 | 867 | 819.36 |
| Janvier | 60 | 839 | |
| Février | 45 | 752.1 | |
| Mar | 25 | 868.8 | 619.47 |
| Avril | 10 | 614.3 | |
| Mai | 10 | 575.2 | |
| Juin | 10 | 552.1 | 568.53 |
| Juillet | 10 | 560 | |
| Aout | 10 | 593.5 | |
| Septembre | 25 | 637.3 | 718.86 |
| Octobre | 45 | 713.2 | |
| Novembre | 60 | 806.1 | |

Tableau (IV-2): Valeurs de l'angle optimal pour chaque mois et l'énergie maximale correspondante.

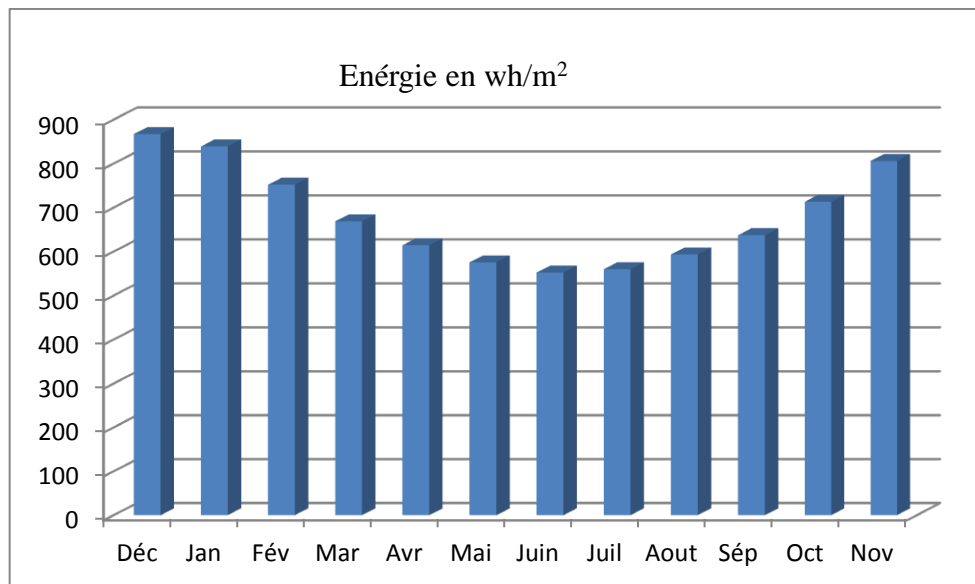


Figure (IV-16) : L'irradiation globale journalière mensuelle pour une inclinaison optimale de chaque mois.

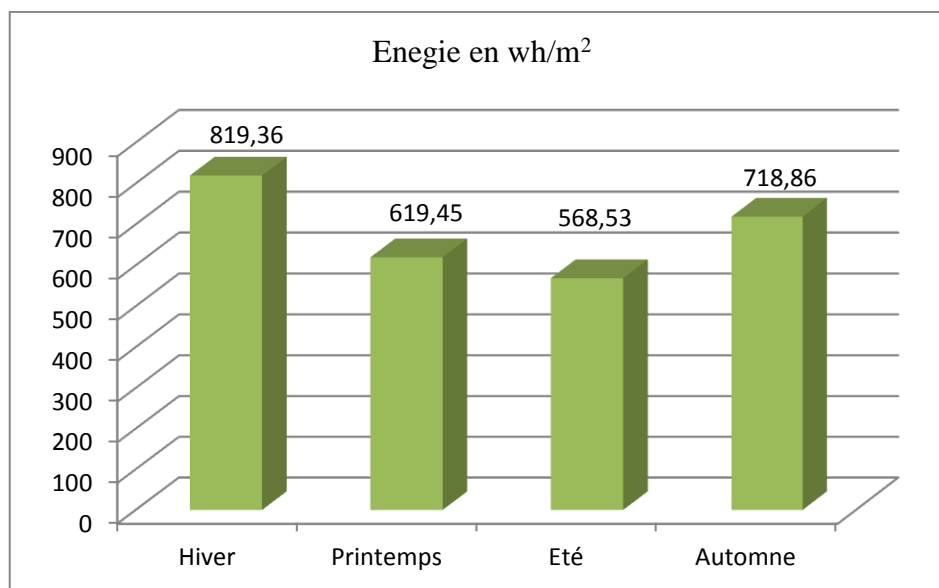


Figure (IV-17) : L'irradiation globale journalière mensuelle pour une inclinaison optimale saisonnière.

On peut en déduire l'angle d'inclinaison saisonnière de la valeur de l'inclinaison mensuelle, ce qui permet de changer l'inclinaison quatre fois par an au lieu de les changer chaque mois.

On obtient le tableau suivant :

| Le mois | saison | Angle moyenne optimal ($^{\circ}$) | L'irradiation (wh/m^2) | L'irradiation moyenne (wh/m^2) |
|-----------|-----------|--------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Décembre | Hiver | 55 | 866.3 | 817.1 |
| Janvier | | | 840.9 | |
| Février | | | 744.3 | |
| Mar | Printemps | 15 | 654.8 | 611.96 |
| Avril | | | 613.8 | |
| Mai | | | 567.3 | |
| Juin | Eté | 10 | 552.1 | 568.53 |
| Juillet | | | 560 | |
| Aout | | | 593.5 | |
| Septembre | Automne | 44 | 608.6 | 708.2 |
| Octobre | | | 713.8 | |
| Novembre | | | 802.2 | |

Tableau (IV-3): Valeurs des angles moyennes d'inclinaison saisonnière et de l'irradiation globale correspondante.

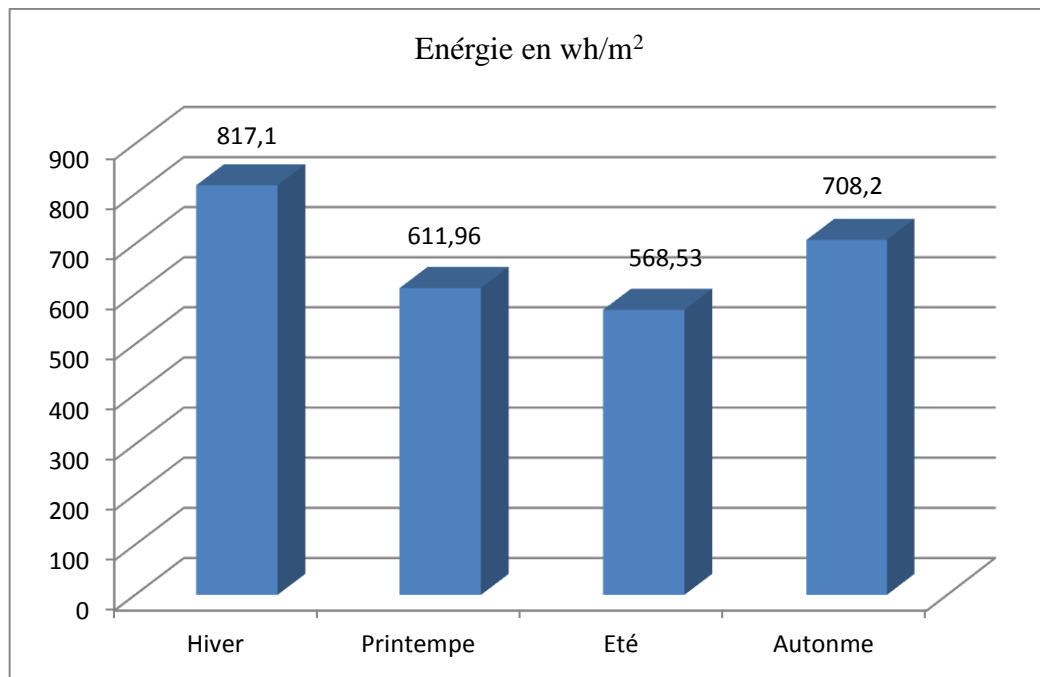


Figure (IV-18) : L'irradiation globale journalière mensuelle pour une inclinaison optimale saisonnière.

La figure (IV-17) et (IV-18) représentera l'irradiation maximale de chaque saison on remarque que l'irradiation en hiver toujours max par rapport à les autres saisons.

Nous remarquons que l'énergie solaire reçue est bien maximale en utilisant les valeurs d'angles optimaux.

D'autre part on remarque que l'irradiation maximale (à 12h00). Il faut noter à ce point, qu'il y a un effet de l'angle d'inclinaison sur la production solaire.

Pour une inclinaison optimale de chaque mois, l'éclairement solaire incident peut atteindre [500 w.m^{-2} - 800 w.m^{-2}].

- ❖ Pour mieux comprendre l'importance de l'angle d'inclinaison, nous étudierons ci-après l'énergie reçue pour différentes valeurs d'angle d'inclinaison
 - ✓ Plan horizontal.
 - ✓ Plan d'inclinaison égale à la latitude.
 - ✓ plan d'inclinaison égale à l'angle optimal.
 - ✓ inclinaison optimale saisonnière.

On a tracé la variation de l'énergie moyenne mensuelle pour les quatre cas d'inclinaison :

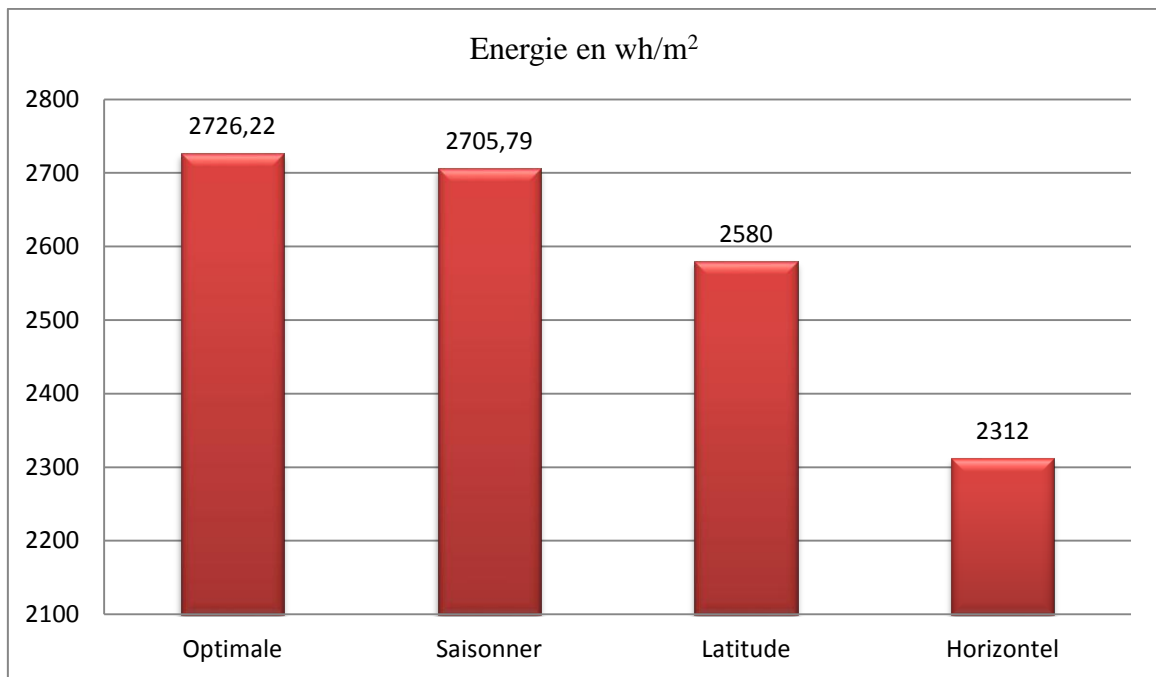


Figure (IV-19): L'énergie acquise annuellement par quatre inclinaisons.

La figure (IV-19) montre les différentes valeurs d'énergie annuelle pour différentes valeurs d'angle d'inclinaison. Nous constatons que l'énergie est bien maximale pour un angle optimal mensuel. Cependant, il est très intéressant de remarquer que l'énergie reste aussi importante avec un angle optimal saisonnier.

IV.3 Modélisation de capteur solaire plan

IV.3.1 Méthode de résolution numérique :

Le système d'équation (III-23) régissant le fonctionnement du capteur solaire se compose de quatre équations différentielles du premier ordre. Pour sa résolution nous avons choisi la méthode numérique de Gauss Seidel dont Nous rappellerons brièvement dans ce qui suit son principe.

IV.3.1.1 Principe de la méthode de Gauss Seidel

La méthode de Gauss-Seidel est une méthode itérative de résolution d'un système linéaire (de dimension finie) de la forme $Ax=b$, ce qui signifie qu'elle génère une suite qui converge vers une solution de cette équation, lorsque celle-ci en a une et lorsque des conditions de convergence sont satisfaites (par exemple lorsque A est symétrique définie positive). L'algorithme suppose que la diagonale de A est formée d'éléments non nuls.

✚ Caractéristiques du capteur simulé

| | |
|--------------------------|---------------------------|
| Coefficient d'absorption | 0.95 |
| Surface de captation | 1.44 m ² |
| Angle d'inclinaison | latitude de lieu (27°.88) |

Tableau (IV-4): Caractéristiques du capteur simulé.

IV.3.2 Etude paramétrique

IV.3.2.1 Variation temporelles des températures des différentes parties du capteur

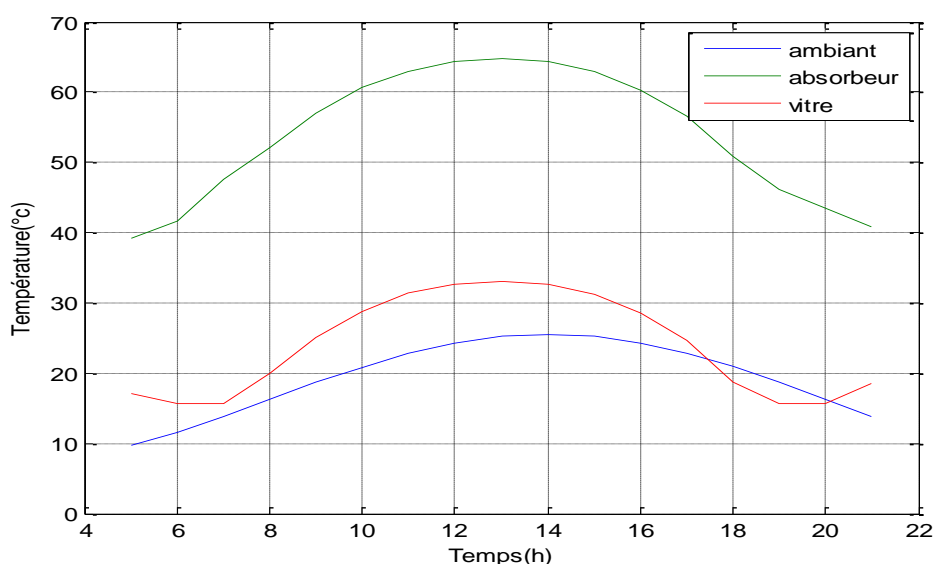


Figure (IV-20) : Variation temporelles des températures des différentes parties du capteur.(mois décembre)

D'après la figure IV.16 on remarque que la température la plus élevée est celle de l'absorbeur, résultant de la puissance importante qu'il absorbe.

La température de la vitre qui est légèrement inférieure, ceci est dû à son affectation par l'action du vent qui cause des déperditions thermiques par convection avec l'air ambiant.

IV.3.2.2 Influence de la localisation géographique sur la productivité (cas d'hiver)

Nous avons représenté sur la figure suivante l'influence de la localisation géographique sur la production solaire, trois sites climatiques ont été choisis : Oran, Bechar et Adrar, qui représentent successivement la région Nord, les hauts plateaux et le sud [32].

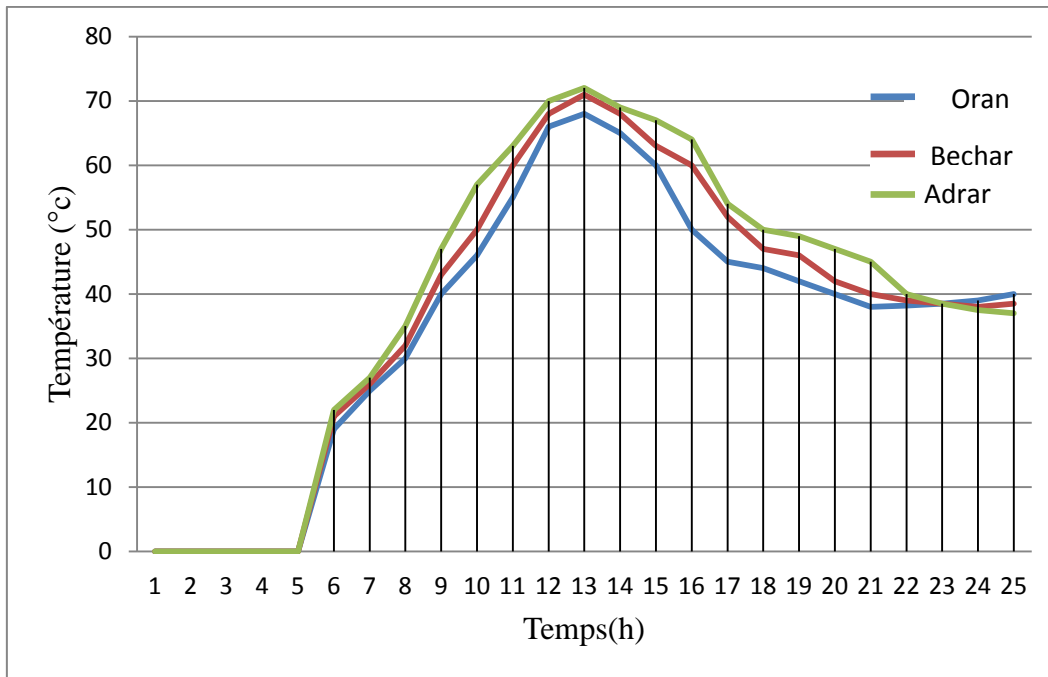


Figure (IV-21) Evaluation de la température de capteur dans différents sites
(Mois Décembre)

La figure présentée ci-dessus, montre l'impact de la situation géographique sur la production d'énergie solaire. On remarque que lorsque la latitude augmente, la température de l'absorbeur chute.

IV.3.2.3 L'influence de l'épaisseur de l'isolation sur la production solaire

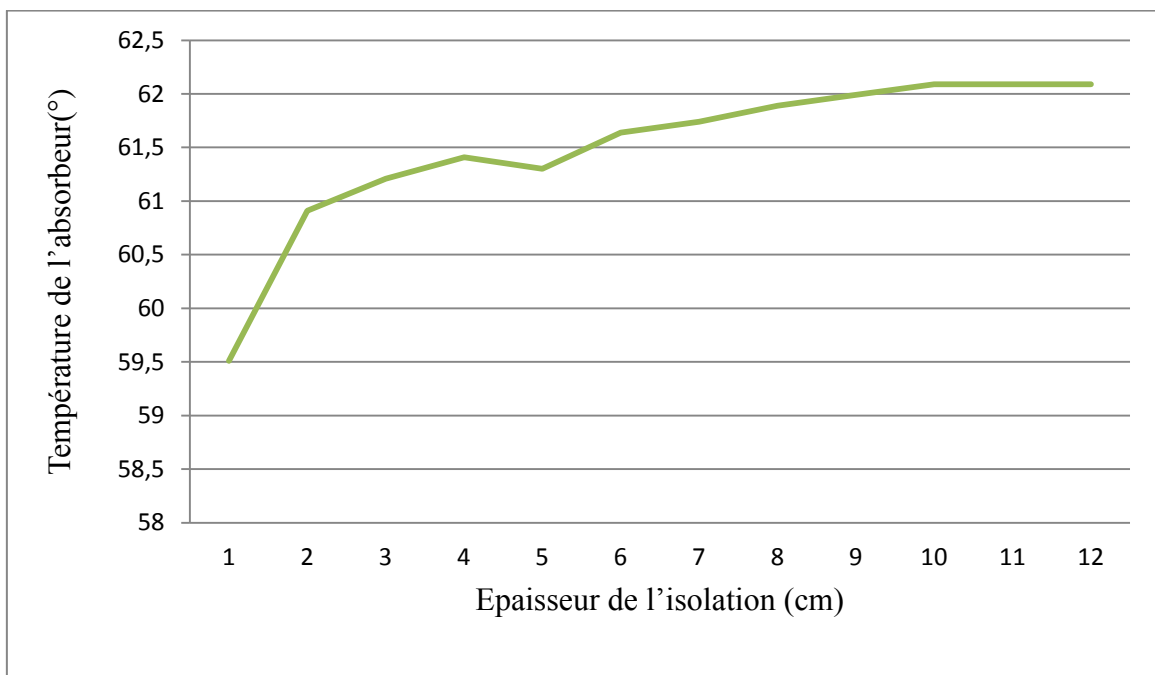


Figure (IV-22) : Evaluation de la température de l'absorbeur en fonction d'épaisseur de l'isolant (Mois Décembre)

La figure (IV-22) montre la variation de la température de l'absorbeur en fonction de l'épaisseur de l'isolant, on remarque que la température de l'absorbeur est augmenté durant l'augmentation de l'épaisseur d'isolant.

D'autre part la température de l'absorbeur reste constante ($62,09^{\circ}$) à partir d'une épaisseur d'isolant égale à 10 cm. .

IV.3.2.4 L'influence de la distance entre l'absorbeur et le vitrage sur la production solaire

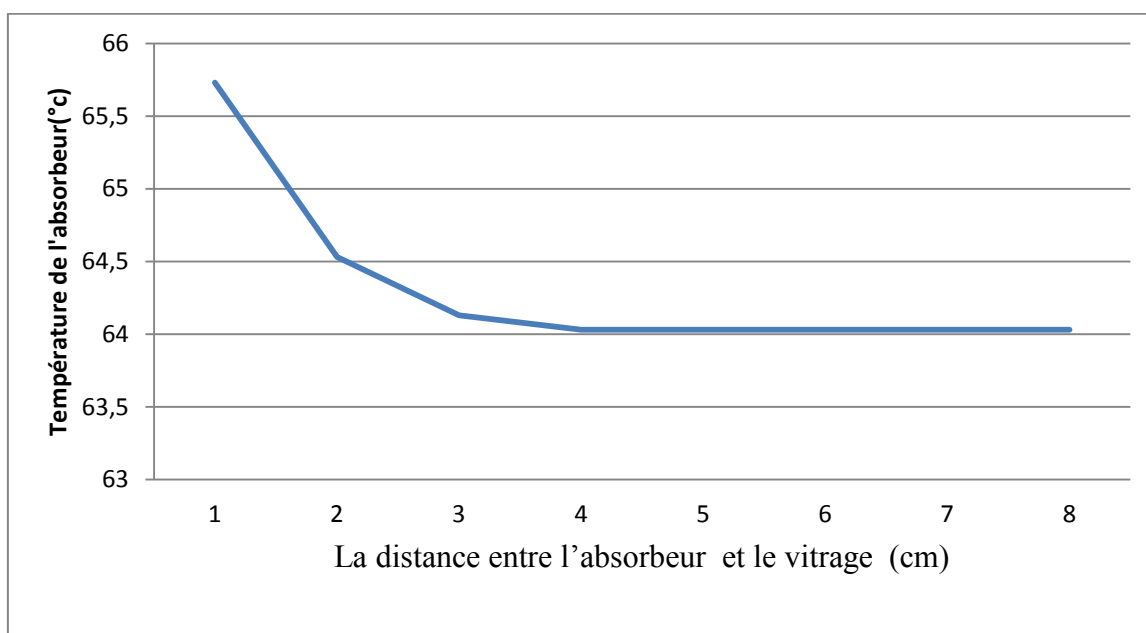


Figure (IV-23) : Variation des températures de l'absorbeur en fonction de la distance (Mois Décembre)

D'après la figure (IV.23) on remarque que la température de l'absorbeur est diminuée durant l'augmentation de distance entre l'absorbeur et le vitrage, elle reste constante à partir d'une distance égale à 4 cm.

D'autre part la température de l'absorbeur est augmenté durant la diminution de distance entre l'absorbeur et le vitrage.

IV.3.2.5 Etude de performance de système

L'efficacité des capteurs solaires thermiques est un paramètre très important et nécessaire pour tout calcul. Pour préciser ce que l'on entend ici par "efficacité" (ou rendement) disons que l'on considère la proportion d'énergie utilisable en sortie du capteur par rapport à l'énergie que celui-ci reçoit du soleil.

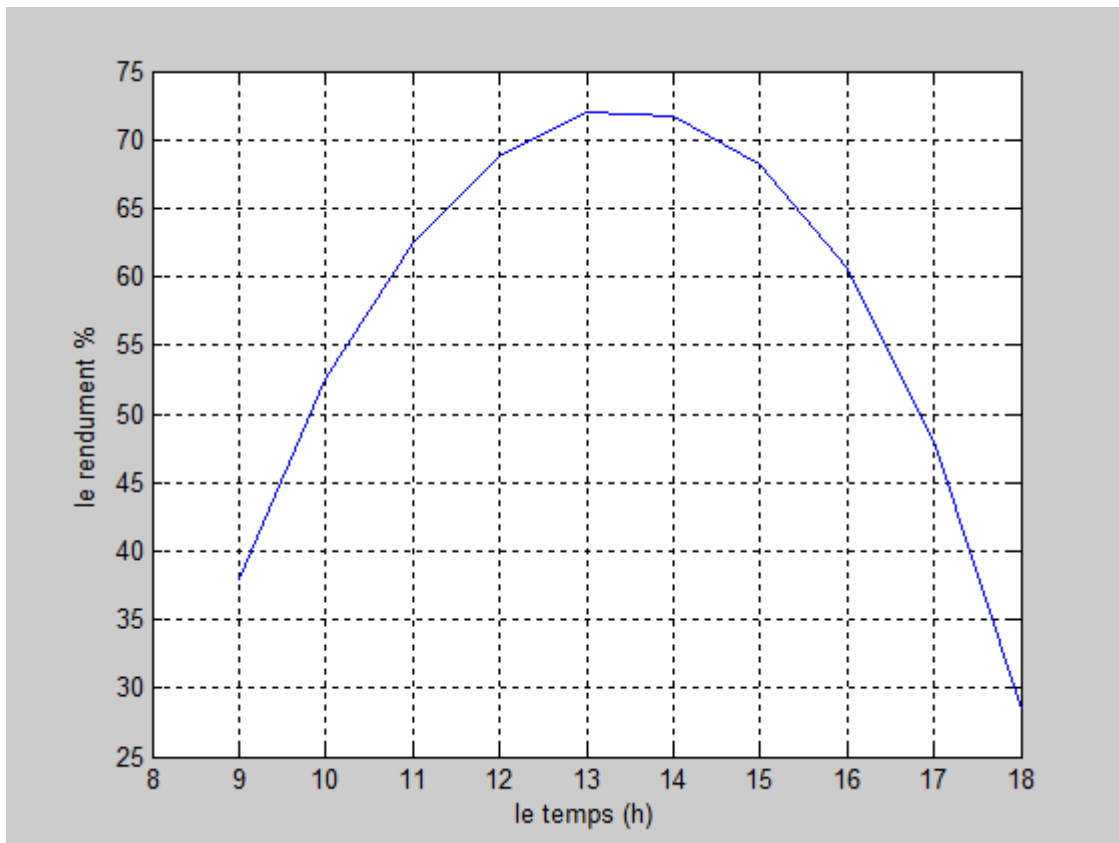


Figure (III.24) : rendement thermique en fonction du temps.

La figure (IV-24) montre que le rendement augmente graduellement durant les premières heures de la journée pour atteindre des valeurs maximales de 70%, bien que l'irradiation solaire commence à décroître à partir de 12 h.

Dans le cadre de ce travail, on a développé un code de calcul pour la simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans. 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 qui décrivent les phénomènes de transfert de chaleur entre les différentes parties du capteur solaire qui mis en jeu à l'intérieur d'un capteur afin d'établir les équations gouvernant le comportement thermique de ce dispositif. On a procédé à la programmation de la méthode de calcul, en s'appuyant sur un modèle de *Liu & Jordan* pour estimer théoriquement l'éclairement solaire, ensuite nous avons réalisé et intégré la partie du logiciel concernant la base de données des capteurs plans.

La résolution du système d'équations discrétisées par la méthode numérique de **Gauss Seidel**. Au sein du programme principal, nous avons introduit des corrélations exprimées en fonction des nombres sans dimensions (NUSSELT, RAYLONDS). De ce fait, nous avons utilisé la boucle conditionnelle pour ajuster les données d'entrées correspondantes.

Le code qui est implémenté dans ce travail est un code utilisable pour n'importe quelle paramètres de capteur. Démontrent qu'il est possible de suivre les évolutions instantanées des différents paramètres, tel que le rayonnement solaire global, la température de l'absorbeur, et le rendement thermique.

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. La modélisation mathématique, basée sur la méthode des bilans globaux des énergies, prend en compte les conditions initiales associées au capteur. Les résultats de simulation numérique permettent de découvrir les profils de l'irradiation incliné sur le capteur et les températures de l'absorbeur, et du vitrage.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres internes (l'effet de l'épaisseur de l'isolant, distance entre le vitre et l'absorbeur) et externes (l'effet de la localisation géographique) sur le rendement instantané du capteur plan. Il apparaît 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 ambiante favorise l'amélioration du rendement instantané du capteur.

On conclue que :

- l'étude de l'irradiation incident à pour le but de changer l'inclinaison quatre fois par an au lieu de les changer chaque mois ;
- l'énergie est bien maximale pour un angle optimal mensuel. Cependant, il est très intéressant de remarquer que l'énergie reste aussi importante avec un angle optimal saisonnier ;
- Nous constatons que l'énergie est bien maximale pour un angle optimal mensuel. Cependant, il est très intéressant de conclue que l'énergie reste aussi importante avec un angle optimal saisonnier ;
- la température la plus élevée est celle de l'absorbeur, résultant de la puissance importante qu'il absorbé ;
- la température de l'absorbeur augment durant la diminution de distance entre l'absorbeur et le vitrage ;
- la latitude du lieu augmente, la température de l'absorbeur chute ;
- la température de l'absorbeur augmente lorsque l'épaisseur de l'isolant augmente, on remarque que la température de l'absorbeur reste constante ($62,09^\circ$) à partir d'une épaisseur d'isolant égale à 10 cm ;

Par ailleurs, pour avoir un bon rendement il faut :

- Maintenir une faible distance entre l'absorbeur et la couverture afin de diminuer les pertes thermiques convectives à l'avant du capteur ;
- le rendement du capteur solaire thermique suivant l'intensité du rayonnement, c'est-à-dire plus le rayonnement est bon et plus on récolte d'énergie sur le capteur, et plus il les transforme en énergie. Mais en plus, bon est son rendement propre ;
- Donc on peut dire que l'augmentation du rayonnement incident agit directement sur le rendement du capteur est le rend plus efficace ;

Après la découverte et la recherche dans le stade de ce domaine, nous envisageons à suivre ce travail pour d'autres applications de la conversion thermique de l'énergie solaire ;

Référence bibliographique

- [1] Amraoui Mohammed Amine, "Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité", mémoire de magister en génie mécanique, p 48,49,53,56,(2011-1012).
- [2] Mohamed Mogharbi et Daoud Halassa, "Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air", Mémoire de Magister en Génie mécanique, p 28,29, (2010-2011).
- [3] R, Bernard G, menguy M, Schwartz "Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications", Technique et Documentation. (1979).
- [4] Ferdjani Ahmed Taha, " Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans", Mémoire de Magister en Génie mécanique, p 4,5,8, (2013).
- [5] Abdelkarim Bouras, "Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire", Mémoire de Magister en physique, p 21,22,23,24, (2007).
- [6] S. Youcef-Ali, "Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates", with various glazing , Renewable Energy, 30 (2005), p. 271 ,280.
- [7] Donatien Njomo , "Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre" , Rev. Gén. Therm, 37 (1998), p. 973,980.
- [8] Suleyman Karsli , "Performance analysis of new-design solar air collectors for drying Applications", Renewable Energy, 32 (2007), p. 1645,1660.
- [9]A. Abene*, V. Dubois, M. Le Ray, A. Ouagued, "Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape", Journal of Food Engineering, 65 (2004), p. 15,22.
- [10]Marwa M. Hassan, Yvan Beliveau, Design," construction and performance prediction of integrated solar roof collectors using finite element analysis", Construction and Building Materials, 21 (2007), p. 1069,1078.
- [11] N. Moumami, S. Youcef-Ali, A. Moumami and J.Y. Desmons, "Energy Analysis of a Solar Air Collector with Rows of Fins", Renewable Energy, Vol. 29, N°13, p. 2053 ,2064, 2004.
- [12] Letz,T,"Modélisation et dimensionnement économique d'un système de chauffage domestique biénergie (solaire-électrique),expérimentation de capteur à air",Thèse de Doctorat ,I.N.S.A.Lyon,(1985).
- [13] K. R. Aharwala, B. K. Gandhib, J. S. Sainib, "Experimental investigation on heat-transfer enhancement due to a gap in an inclined continuous rib arrangement in a rectangular duct of solar air heater", Renewable Energy, 33 (2008), p. 585,596.

[14] D. Laplace, "Le rayonnement solaire estimation et mesures, éditions Erasme", La Garenne-colombes, France 1990.

[15] J. M. Chassériaux , "Conversion thermique du rayonnement solaire", Bordas Paris 1984.

[16] Chiba Younes, "étude de l'utilisation d'un bassin d'eau comme capteur solaire, mémoire magister en génie climatique", option thermique du Batiment et Refrigeration, université M'entouré Constantine, décembre 2005.

[17] Mouhamed Lakhdar Louzene," Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla ",Mémoire de magister, université de BATNA juin 2008.p 3,14.

[18] M. Dagueneat, "Les séchoirs solaires, théorie et pratique Unesco", Paris 1985.

[19] R. Giblin, "Transmission de la chaleur par convection naturelle", Saint-germain Paris 1974.

[20] C. P.Brighambaut, C. Vauge, "Le Gisement Solaire-Evaluation de la Ressource Energétique", Edition Lavoisier, Tec & Doc, Paris, 1982.

[21] Daoudi Ahmed, Hadadji Moustafa, "Calcul du rayonnement solaire pour une surface inclinée (cas d'un site situé a Ouargla)", mémoire d'ingénieur d'état, Université Kasdi Merbah Ouargla, juin 2009.

[22] J.F. Sacadura, "Initiation aux transferts thermiques", Technique et Documentation Paris 1982.

[23] R. Marchal, "Transmission de la chaleur par convection dans les tubes", Saint-germain Paris 1974.

[24] A. Gouffe, "Transmission de la chaleur par rayonnement", Saint-germain Paris 1978.

[25] Y. Jannot, "Thermique solaire", cours libre 2003.

[26] Akermi Mustapha, "Contribution à l'étude d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau et application aux sites de Tiaret et Adrar", mémoire de Magister en physique, p65

[27] Quoilin Sylvain , "Les Centrales Solaires à Concentration" ,Université de Liège Faculté des sciences appliquées Mai 2007 Ingénieur Civil Electromécanicien/Energéticien.

[28] guezha Med lazhar, "impact de l'espace entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire sur le rendement du capteur plan à double vitrage", mémoire magister université d'Ouargla.

- [29] Kadraoui Hicham, "Etude comparative et rendement énergétique des différents degrés de concentration des convertisseurs thermodynamique de l'énergie solaire", Mémoire de Magister ,p 20 ,(2010-2011).
- [30] Abdelaoui Med Khimmusti et Guricha Foud , "Etude expérimentale d'un bassin d'eau utilisé comme capteur solaire plan", d'ingénieur d'état universite de Ouargla.
- [31] J, Bernard," Energie solaire calculs et optimisation", Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [32] A, Sfeir ; G, Guarracino,"Ingénierie des systèmes solaires", Technique et documentation, Paris. (1981).
- [33] A, H, Khedim, "Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque", Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [34] J, Bonal; P, Rossetti," Les énergies alternatives", Omniscience. (2007).
- [35] S, El Mokretar; R, Miri; 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 énergies renouvelables, Vol 7, p 109,123. (2004).
- [36] Saadi Souad, "effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan", Mémoire de Magistère en physique, p 25, (2010).
- [37] Bouragbi Lakhdar, "Etude et amélioration du rendement de la conversion photothermique du capteur solaire", Mémoire de Magister, p 50-51,(2008).
- [38] Bada Abdelmalek, "Simulation du comportement thermique d'un chauffe-eau solaire de type autostockeur", Mémoire de Magister, p73,(2009).
- [39] Bassoud.A," Etude de la faisabilité du conditionnement climatique des locaux par utilisation d'un conduit enterré", thèse de magister, USTO (Algérie) 2008,p 125.

Annexe A : Programmation du calcul de l'angle optimal

On a structuré la programmation en trois parties (sous programme) comme suit :

1^{ère} partie :

```

    %Annexe A%

clear;clc;

% Calcul de l'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface inclinée
% Calcul de l'inclinaison optimal d'un panneau solaire
for k=1:1:12;
x=[8.2 8.58 9.62 9.60 9.73 10.06 10.25 9.21 9.3 9.14 8.47 8.80];
% le numéro de jour type du mois
y=[17 47 75 105 135 162 198 228 258 288 318 344];
G=1367;L=27.88*pi/180;
q=0.30;
j=1;
S=x(j,k);
n=y(j,k);
HT_max=0;
dec=23.45*sin(2*pi*(284+n)/365);
dec1=dec*pi/180;
ws=acos(-tan(L)*tan(dec1));
% H0 l'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère
c=1+0.033*cos(2*pi*n/365);
H0=(24*c*G/pi).*(cos(L).*cos(dec1).*sin(ws)+ws.*sin(L).*sin(dec1));
% La durée astronomique du jour
S0=(2/15)*ws*180/pi;
% la taux d'insolation
sigma=S./S0;
KT=0.3+0.43*sigma;
H=KT*H0;
% Hannulle=(365/12)*sum(H)
Kd=0.91-0.98*KT;
Hd=Kd.*H;

```

```

Hb=H-Hd;
for B=-10:1:90;
%B=27.88;
B1=B*pi/180;
w2=acos(-tan(L-B1).*tan(dec1));
w3=min(ws,w2);
%R:le facteure de conversion
R1=cos(L-B1).*cos(dec1).*sin(w3)+w3.*sin(L-B1).*sin(dec1);
R2=cos(L).*cos(dec1).*sin(ws)+ws.*sin(L).*sin(dec1);
R=R1/R2;
HT=(H-Hd).*R+Hd.*(1+cos(B1))/2+H*q.*(1-cos(B1))/2;
Hannulle=(365/12)*sum(HT);
if HT>HT_max;
    HT_max=HT;
    B_op=B1*180/pi;
end
end
HT_fin=HT_max;%L'irradiation globale journalière moyenne mensuelle maximale
B_fin=B_op;%L'inclinaison optimale Correspondant
%eval(['save E:\fich_hor','.dat HT_fin -ascii']);
kk=[Hd']
LL=[H']
end
f=1:12;
A=[0 0 6.5737 6.4158 6.1880 6.1076 6.2179 6.1252 6.3405 6.2682 5.7863
5.8217];%expérimentale
ecart=abs(A);
%plot(HT_fin,B_fin,'b');
figure(1);
plot(f,A,'r');hold on
plot(f,HT,'g');hold on
legend('modèle','expérimentale')

```

2^{ème} partie :

```

function [KT,H0,H,Hd,HT,Hin,Hdin,HTin,rd,rh,HL,HC]=ray_instantane(mois,date,phi,B,Tsv,S)
%function [KT,H0,H,Hd,HT]=ray_jour(mois,date)
%global phi B
%la taux d'insolation
% x=[0.88 0.87 0.93 0.93 0.89 0.92 0.89 0.91 0.88 0.86 0.86 0.86];
month=[0 31 59 90 120 151 181 212 243 273 304 334];
G=1367;L=phi*pi/180;B1=B*pi/180;
q=0.30;
n=month(mois)+date;
dec=23.45*sin(2*pi*(284+n)/365);
dec1=dec*pi/180;
ws=acos(-tan(L)*tan(dec1));
HL=12-ws*(180/pi)/15;
HC=12+ws*(180/pi)/15;
%H0'irradiation journaliere moyenne mensuelle hors atmosphere
c=1+0.033*cos(2*pi*n/365);
H0=(24*c*G/pi)*(cos(L)*cos(dec1)*sin(ws)+ws*sin(L)*sin(dec1));
S0=(2/15)*ws*180/pi;
Q=S/S0;
KT=0.3+0.43*Q;
H=KT*H0;
%Hannulle=(365/12)*sum;
Kd=0.91-0.98*KT;
Hd=Kd*H;
w2=acos(-tan(L-B1)*tan(dec1));
w3=min(ws,w2);
%R:le facteure de conversion
R1=cos(L-B1)*cos(dec1)*sin(w3)+w3*sin(L-B1)*sin(dec1);
R2=cos(L)*cos(dec1)*sin(ws)+ws*sin(L)*sin(dec1);
R=R1/R2;
HT=(H-Hd)*R+Hd*(1+cos(B1))/2+H*q*(1-cos(B1))/2;

```

```

% passage de irradiation journalière au instantanie
Tsv0=Tsv/3600;
w=15*(Tsv0-12)*pi/180;
a=0.409+0.05016*sin(ws-pi/3);
b=0.6609-0.4767*sin(ws-pi/3);
rd=(pi*(cos(w)-cos(ws)))/(24*(sin(ws)-ws*cos(ws)));
rh=rd*(a+b*cos(w));
Hdin=rd*Hd;
Hin=rh*H;
HTin=(Hin-Hdin)*R+Hdin*(1+cos(B1))/2+Hin*q*(1-cos(B1))/2;
% calcul la produite absorbtivité_transissivité
% incdir=acos(cos(L-B1)*cos(dec1)*cos(W)+sin(L-B1)*sin(dec1))*180/pi;
% incciel=59.7-0.1388*B1+0.0001497*B1^2;
% incsol=90-0.5788*B1+0.002693*B1^2;
% alfad=alfan*(1+2.0345*(10^-3)*incdir-1.99*(10^-4)*incdir^2+5.324*(10^-6)*incdir^3-
4.799*(10^-8)*incdir^4);
% alfac=alfan*(1+2.0345*(10^-3)*incciel-1.99*(10^-4)*incciel^2+5.324*(10^-6)*incciel^3-
4.799*(10^-8)*incciel^4);
% alfas=alfan*(1+2.0345*(10^-3)*incsol-1.99*(10^-4)*incsol^2+5.324*(10^-6)*incsol^3-
4.799*(10^-8)*incsol^4);
% todir=-2.3492*(10^-8)*incdir^4+1.4435*(10^-6)*incdir^3-4.4526*(10^-
6)*incdir^2+5.004*(10^-4)*incdir+0.72;
% tociel=-2.3492*(10^-8)*incciel^4+1.4435*(10^-6)*incciel^3-4.4526*(10^-
6)*incciel^2+5.004*(10^-4)*incciel+0.72;
% tosol=-2.3492*(10^-8)*incsol^4+1.4435*(10^-6)*incsol^3-4.4526*(10^-
6)*incsol^2+5.004*(10^-4)*incsol+0.72;
% toalfa_dir=1.02*todir*alfad;
% toalfa_ciel=1.02*tociel*alfac;
% toalfa_sol=1.02*tosol*alfas;
% Rayonnement solaire absorbée par le capteur
% G=(Hin-Hdin)*R*toalfa_dir+Hdin*(1+cos(dec1))*toalfa_ciel/2+Hin*q*(1-
cos(dec1))*toalfa_sol/2);

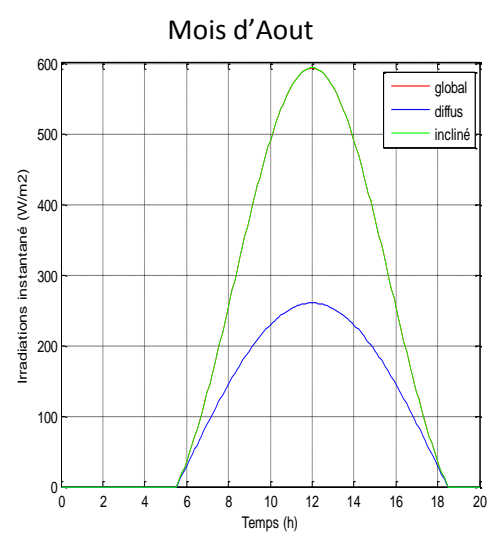
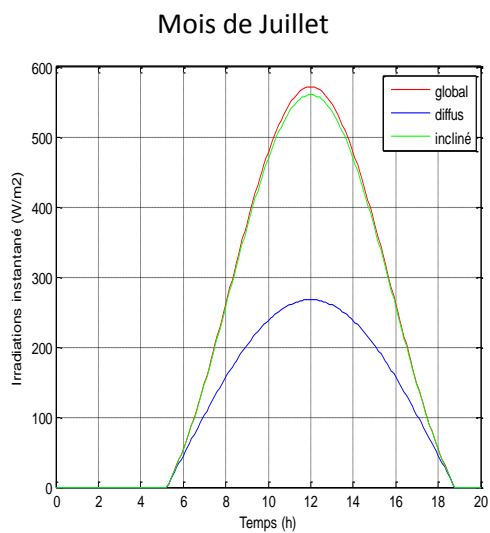
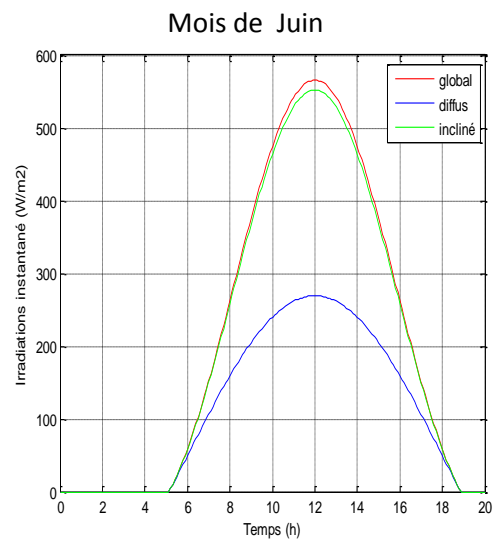
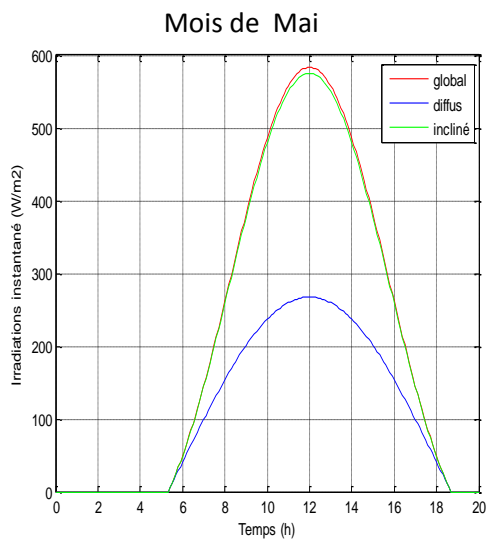
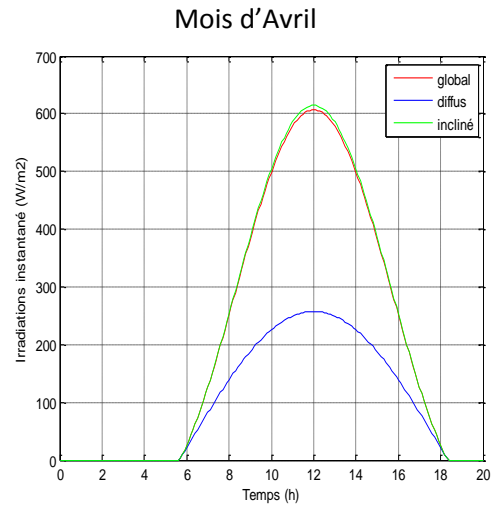
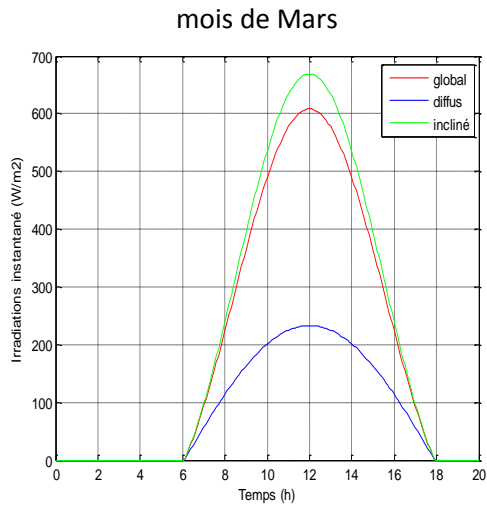
```

```

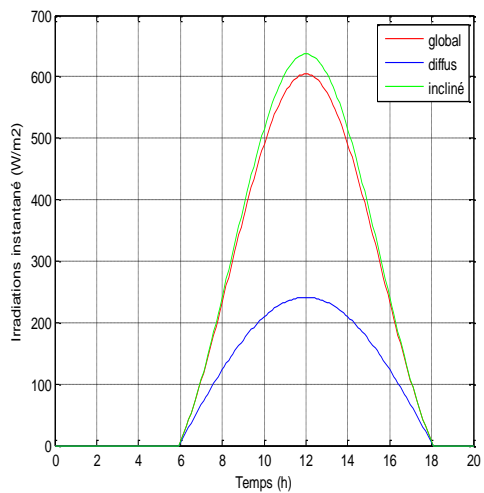
%Rayonnement solaire absorbée par 2eme vitrage
%Gv2=(Hin-Hdin)*R*alfa*to+Hdin*(1+cos(dec1))/2+Hin*q*(1-cos(dec1))/2);
%Rayonnement solaire absorbée par 1eme vitrage
%Gv1=(Hin-Hdin)*R*alfa+Hdin*(1+cos(dec1))/2+Hin*q*(1-cos(dec1))/2);
3ème partie :
clear;
B=input('donne inclinaison du capteur b')
phi=input('donne latitude de lieu phi')
mois=input('donne le mois')
S=input('donne durée d'enseillement S')
jtype=[17 16 16 15 15 11 17 16 15 15 14 10];
j=0;
for Tsv=0*3600:360:20*3600
    j=j+1;
    tim(j)=Tsv/3600;
    [KT,H0,H,Hd,HT1,Hin(j),Hdin(j),HTin(j),rd,rh,HL,HC]=ray_instantane(mois,jtype(mois),phi,B,
    Tsv,S);
    rdd(j)=rd;
    if tim(j)<HL
        Hin(j)=0;
        Hdin(j)=0;
        HTin(j)=0;
    end
    if tim(j)>HC
        Hin(j)=0;
        Hdin(j)=0;
        HTin(j)=0;
    end
end
end
hh=[HC']
%figure(1);
%plot(B1,HT,'r');

```

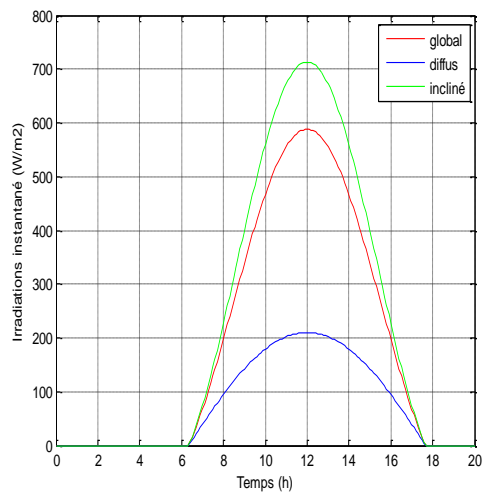
```
%[rd']  
figure(2);  
%plot(tim,rdd,'b');  
plot(tim,Hin,'r',tim,Hdin,'b',tim,HTin,'g');  
legend('global','diffus','incliné');  
%plot(tim,G,'r',tim,Gv1,'b',tim,Gv2,'g');  
xlabel('Temps (h)');  
ylabel('Irradiations instantané (W/m2)');  
eval(['save d:\fich_test','.dat Hin Hdin HTin -ascii']);
```

Annexe B : Les figures représentent l'angle optimal des mois

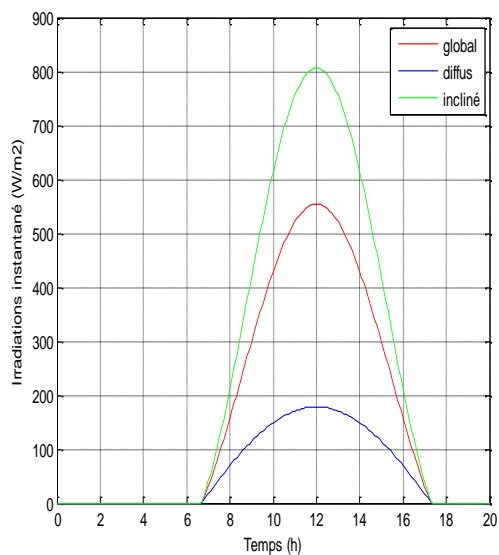
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



**Annexe C : L'énergie moyenne mensuelle pour deux cas : plan horizontal – plan
d'inclinaison égale à la latitude**

1/plan horizontal :

| Le mois | L'Angle (°) | L'irradiation (wh/m ²) | moyenne |
|-----------|-------------|------------------------------------|---------|
| Décembre | 27.88 | 770.7 | 753.16 |
| Janvier | 27.88 | 763.1 | |
| Février | 27.88 | 725.7 | |
| Mar | 27.88 | 670.3 | 602.06 |
| Avril | 27.88 | 598.8 | |
| Mai | 27.88 | 537.1 | |
| Juin | 27.88 | 506.5 | 530.53 |
| Juillet | 27.88 | 517.8 | |
| Aout | 27.88 | 567.3 | |
| Septembre | 27.88 | 635.6 | 695.2 |
| Octobre | 27.88 | 701.1 | |
| Novembre | 27.88 | 748.9 | |

Tableau (1.B) : Valeurs moyennes mensuelles de l'irradiation globale incidente sur un plan incliné d'un angle égale à la latitude.

2/plan d'inclinaison égale à la latitude :

| Le mois | L'Angle (°) | L'irradiation (wh/m ²) | moyenne |
|-----------|-------------|------------------------------------|---------|
| Décembre | 0 | 533.2 | 554.63 |
| Janvier | 0 | 547.1 | |
| Février | 0 | 583.6 | |
| Mar | 0 | 608.6 | 599.3 |
| Avril | 0 | 606.3 | |
| Mai | 0 | 583 | |
| Juin | 0 | 565.9 | 576.76 |
| Juillet | 0 | 571.3 | |
| Aout | 0 | 593.1 | |
| Septembre | 0 | 604.2 | 582.13 |
| Octobre | 0 | 588.2 | |
| Novembre | 0 | 554 | |

Tableau (2.B) : Valeurs moyennes mensuelles de l'irradiation globale incidente sur un plan horizontal.

Annexe D : Résolution des systèmes d'équations linéaires par les méthodes itératives**METHODE DE GAUSS –SEIDEL**

On veut résoudre le système linéaire :

$$A.T = B$$

Ou :

A : est une matrice carrée d'ordre n.

B : est la matrice colonne du deuxième membre.

T : est le vecteur des inconnues, $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$.

Ecrivons A sous la forme :

$$A = M - N$$

Ou

$$A = D - L - U$$

Avec :

L : matrice inférieure

U : matrice supérieure

A partir d'un vecteur initial $T(0)$ on peut écrire :

$$T^{(1)} = (D - L)^{-1} \cdot U T^{(0)} + (D - L)^{-1} \cdot B$$

Comme l'inverse de $(D - L)$ peut être compliquée à calculer, pour ce la on

Ecrire le système comme suite :

$$(D - L). T^{(1)} = U .T^{(0)} + B$$

$$D T^{(1)} - L .T^{(1)} = U .T^{(0)} + B$$

$$T^{(1)} - D^{-1} \cdot L .T^{(1)} = D^{-1} \cdot U .T^{(0)} + D^{-1} \cdot B$$

Ce qui est équivalent à :

$$T^{(1)} = D^{-1} \cdot L .T^{(1)} + D^{-1} \cdot U .T^{(0)} + D^{-1} \cdot B$$

.....

$$T^{(n+1)} = D^{-1} \cdot L .T^{(n+1)} - D^{-1} \cdot U .T^{(n+1)} + D^{-1} \cdot B$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient :

$$T_1^{(n+1)} = (B_1 - a_{12} \cdot T_2^{(n)} - a_{13} \cdot T_3^{(n)} - \dots - a_{1n} \cdot T_n^{(n)}) / a_{11}$$

$$T_2^{(n+1)} = (B_2 - a_{21} \cdot T_1^{(n+1)} - a_{23} \cdot T_3^{(n)} - \dots - a_{2n} \cdot T_n^{(n)}) / a_{22}$$

.....

$$T_n^{(n+1)} = (B_n - a_{n1} \cdot T_1^{(n+1)} - a_{n2} \cdot T_2^{(n+1)} - \dots - a_{nn-1} \cdot T_{n-1}^{(n+1)}) / a_{nn}$$

On dira que la méthode de Gauss-seidel convergera si :

$$1) \text{Abs}(T_i^{(n+1)} - T_i^{(n)}) < \varepsilon$$

ou :

$$2) \text{Abs}((T_i^{(n+1)} - T_i^{(n)}) / T_i^{(n+1)}) < \varepsilon$$

Remarque :

❖ une simple permutation de lignes peut transformer une convergence en divergence ou inversement.

❖ La méthode de Gauss-Seidel est plus rapide en convergence que la méthode de Jacobi. En effet, dans la même itération on utilise les valeurs des résultats précédents pour calculer une nouvelle composante, Donc intuitivement le (n+1)-ième itération est plus proche (en un certain sens) de la limite, pour la méthode de Gauss-Seidel.

❖ elle prend moins de mémoire.

Résumé

Ce présent mémoire et une contribution à l'étude d'un capteur solaire plan avec une circulation du fluide caloporteur destiné à transférer la chaleur récupérée dans l'absorbeur pour différentes utilisations.

L'objectif du travail consiste à estimer le rayonnement solaire sur un plan incliné et simuler les performances thermiques d'un capteur solaire plan, dans le but d'étudier les effets des paramètres sur le rendement du capteur solaire plan.

Pour atteindre notre objectif, nous avons effectué l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire, ainsi les caractéristiques d'un capteur solaire plan puis nous avons montré les principaux paramètres qui influent sur le rendement global du capteur, puis les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système.

Nous avons élaboré aussi un code de calcul sous Matlab basé sur la modélisation mathématique des différentes équations du bilan thermique du capteur solaire.

Mots clés : Rayonnement solaire, Capteur solaire plan , performances thermiques , Matlab.

ملخص

هذه المذكرة هي مساهمة في دراسة الملتقطات الحرارية للطاقة الشمسية العاملة بفعل الكثافة حيث تمثل الموائع سائل نقل الحرارة المستردة في الجهاز للاستخدامات المختلفة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة الاشعاع الشمسي على سطح مائل و محاكاة التحميلات الحرارية المدعمة لمستقبل سطحي شمسي. والهدف من ذلك دراسة تأثير العوامل على مردود المستقبل السطحي الشمسي .

لتحقيق هذا الهدف قمنا بدراسة بعض الظواهر الفلكية الشمسية و تقديم بعض المفاهيم والتعاريف المتعلقة بالشمس, ودراسة خصائص المستقبل السطحي الشمسي, مع برهنة العوامل المؤثرة على مردود المستقبل الشمسي و مختلف المعادلات التي تحقق البرنامج.

لتسهيل هذا العمل قمنا بإنشاء برنامج حسابي للمحاكاة تحت بيئة Matlab حيث يتركز على التمثيل الرياضي لمختلف المعادلات الحرارية للمستقبل السطحي الشمسي.

الكلمات المفتاحية: الإشعاع الشمسي , مستقبل سطحي شمسي , تحميل حراري , محاكاة Matlab