**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**

**Faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur**


**N° d'ordre…….**
**Série……..**

# MEMOIRE

**Présenté pour obtenir le diplôme de Magister**
**Option**
**Physique Energétique**
**Par**


**Hadj Ammar Mohammed Ali**


## Thème

# Impact de l'écart de Température Entre l'absorbeur et la vitre sur l'efficacité du Capteur Solaire à double Vitrage

**Soutenu publiquement le 24 / 02 / 2009**

**Devant le jury :**

| | |
|---|---|
| **Président : SAOULI SALAH** | **Professeur , Université de Ouargla** |
| **Rapporteur : A . KAABI** | **Professeur, Université de Constantine** |
| **Examinateur : BOUGUETTAIA HAMZA** | **Maître de Conférences, Université de Ouargla** |
| **Examinateur : Y. KHETIB** | **Maître de Conférences, Université de Constantine** |

**Année Universitaire**
**2008 - 2009**

# Remerciements

Tout d'abord :

Merci à Dieu

Je tiens à remercier vivement mon encadreur Pr . **KAABI Abdenacer** professeur au département de génie climatique à l'université de Mantouri Constantine .

Je voudrais remercier aussi messieurs membres de jury :

- ✓ Mr : **SAOULI SALAH** Professeur à l'université de Ouargla comme président de jury .
- ✓ Mr : **BOUGUTTAIA HAMZA** Maître de conférences à l'université de Ouargla comme examinateur .
- ✓ Mr : **KHATIB YACINE** Maître de conférences à l'université de Mantouri Constantine comme examinateur .

Je reconnais aussi tout personne qui m'a aidé particulièrement à ma famille et mes amis .

Mes remerciements sont faits aux enseignants, personnel et aux étudiants de l'université de Ouargla

# Listes des Figures

**Figure I -1:** Deux système de cordonnées sphérique ……5

**Figure II -1:** Schéma d'un Capteur Solaire……....8

**Figure II - 2:** Capteur solaire thermique à eau ( vue en coupe)……10

**Figure II - 3:** Schéma de principe d'un capteur à air ……11

**Figure III -1:** le flux absorbé par le verre…….....17

**Figure III -2:** Les réflexions dans un capteur à double vitrage.……....22

**Figure III -3:** bilan énergétique pour un capteur à double vitrage ……..29

**Figure IV-1:**Schéma différents nœud considérés dans la maille d'un capteur à double vitrage....40

**Figure IV-2:** Coupe verticale d'un capteur à double vitrage ……41

**Figure IV-3:** Schéma des différent échanges thermique au niveau d'une maille d'un capteur à double vitrage ……....42

**Figure IV-4 :** Schéma électrique équivalant d'un capteur à double vitrage ……43

**Figure A -2:** Représentation schématique de la masse d'air optique……... 79

**Figure B :** les réflexions dans un capteur à simple vitrage ……...……80

**Figure H :** addition d'un vitrage supplémentaire……89

# Listes des Tableaux

**Tableau III -1:** valeur de A et B ……..15

**Tableau IV-1:** Analogie du système thermique au modèle électrique …… 38

**Tableau D-1 :** les valeurs mensuelles moyennes des vitesses du vent pour " El oued " ……. 83

**Tableau D-2:** Les Température des El Oued ( 1997 – 2006 ) ……83

**Tableau G 1:** Propriétés de quelques matériaux utilisées dans le calcul ……..87

**Tableau G 2:** Propriétés de quelques couches sélectives …….87

**Tableau G 3:** valeur A , B et C ……...88

**Tableau H :** le réflexion et la transmission d'un système de vitrage ……...90

# Nomenclature

| Notation Latines | Désignation | Unité |
|---|---|---|
| h | Hauteur du soleil | Degré |
| n | Indice de réfraction | - |
| i | Angle d'icidence | Degré |
| ev | Epaisseur de verre | m |
| L | Longueur ou longitude | m – degré |
| T | Température | K |
| a | Albédo | - |
| S | Surface du capteur | $m^2$ |
| t | Temps | s |
| V | Vitesse | m / s |
| P | Périmètre | m |
| Cp | Capacité calorifique massique | J / kg . K |
| D | Diamètre | m |
| H | Coefficient de tranfert de chaleur | W / $m^2$ K |
| Hc | Coefficient d'échage par conduction | W / $m^2$ K |
| Hr | Coefficient d'échage par rayonnement | W / $m^2$ K |
| Hv | Coefficient d'échage par convection | W / $m^2$ K |
| q | Débit massique de l'eau | mg / S |
| R | Résistance thermique | $m^2$.K / W |
| N | Nombre de vitrage | - |

| Indices | Désignation | Unité |
|---|---|---|
| a | ambiant | - |
| dir | direct | - |
| dif | diffus | - |
| i | intérrieur ou isolant | - |
| p | Plaque (absorbeur ) ou pertes | - |
| s | Sol | - |
| v | vitre ou vent | - |
| t | tube | - |
| av | avant | - |
| arr | arrière | - |
| lat | latéral | - |
| g | global | - |
| sys | système | - |
| h | horizontal | - |
| fe | entrée fluide | - |
| e | extérieur | - |
| c | voûte céleste | - |
| b | boitier | - |

| Cacactère grecs | Désignation | Unité |
|---|---|---|
| $\Phi$ | Flux thermique ou latitude du lieu | $W/m^2$ , - |
| $\alpha$ | Coefficient d'absorption | - |
| $\tau$ | Coefficient de transmission | - |
| $\rho$ | Coefficient de réflexion ou masse volumique | - , $kg / m^2$ |
| $\eta$ | Rendement | ( % ) |
| $\lambda$ | Conductivité thermique | W / m.K |
| $\varepsilon$ | Emissivité | - |
| $\sigma$ | Constante de Stephan – Boltzman | - |
| $\nu$ | Viscosité cinématique | $m^2 / s$ |
| $\mu$ | Viscosité dynamique | Kg / m.s |
| $\beta$ | Incliaison du capteur | Dégre |

| Nombre adimensionnel | Désignation | Unité |
|---|---|---|
| Re | Nombre de Reynolds | - |
| Ra | Nombre de Rayliegh | - |
| Pr | Nombre de Prandtl | - |
| St | Nombre de stanton | - |
| Nu | Nombre de Nusselt | - |
| Gz | Nombre de Graetz | - |
| Gr | Nombre de Graschoff | - |

| Opérateur mathématique | Désignation | |
|---|---|---|
| d | Dérivée | - |
| $\Delta$ | Pas de temps | - |
| grad | gradient | - |
| exp | exponentiel | - |

# Sommaire

**Introduction** ..... 1

## Chapitre I - Gisement Solaire

I-1 Le gisement solaire……. ..3

I -1-1 Notions sur le gisement solaire …….. 3

I -1-2 Caractéristique du soleil …….. ..3

I -1-3 Constants solaire …….. ..3

I -1-4 Rayonnement au voisinage du sol …… 3

I -1 -5 Données astronomique …… 4

I -1-5 -1 L'équateur ……. 4

I -1-5 -2 Latitude du lieu…….. 4

I -1-5 -3 Longitude …….. 4

I -1-5 -4 L'altitude …….. 4

I -1-5 -5 La déclinaison …….. 4

I - 1-5- 6 L'albédo……. 4

I -1-6 Mouvement de la terre auteur du soleil…… 4

I -1-7 Détermination du temps solaire…… 6

I -1-7-1 L'angle horaire……. 6

I -1-7-2 Définition des différents temps…….. 6

I -1-7-2-1 Le temps solaire vrai …… 6

I -1-7-2-2 Le temps solaire moyen …….. 6

I -1-7-2-3 Le temps civil …….. 6

I -1-7-2-4 Le temps universel…… 6

I -1-7-2-5 Le temps légal …….. 7

## Chapitre II – Technique de Captation Solaire

II-1 Les capteurs solaires …….. 8

II -1-1 Les bases des captation …….. 9

II -1-1-1 Corps noirs ……. 9

II -1-1-2 Effet de serre …….. 9

II -1-2 - Classification et description des capteurs solaires ……. . 9

II -1-2-1 Fluide de travail utilisé…….. 9

II-1-2-2 Orientation ……....11

II -1-2-3 Type de composants…….. 11
II-2-3 Description générale et composants du capteur à double vitrage ……. 12
II -2-3-1 L'absorbeur……. 12
II -2-3-2 L'isolant…….. 12
II -2-3-3 Les vitres…….. 12
II -2-3-4 Le boîtier …… 12
II-2-4 Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires…… 13

## Chapitre III- Etude Théorique du Système

III-1 Les apports solaire…… 14
III-1-1 Puissance incidentes……. .14
III-1-1-1 Calcul du rayonnement direct……... 14
III-1-1-2 Calcul du rayonnement diffus …….. 15
III-1-1-3 Le flux solaire reçu par la surface du capteur ……. 16
III-1-2 Les Puissance absorbée ……. 17
III-1-2-1 Puissance absorbée par la vitre……... 20
III-1-2-2 Puissance absorbée par le corps noir ……. 21
III -2 Différents modes des transfert de chaleur au niveau du capteur…… 23
III-2-1 Echange par conduction …….. 23
III-2-2 Echange par rayonnement…… 24
III-2-3 Echange par convection ……..... 25
III -3 Bilan Energétique du capteur solaire à double vitrage …….. 29
III-3-1 Puissance utile récupérée par le fluide ……... 30
III-3-2 Les pertes…… 32
III-4 Calcul du rendement d'un capteur ……. 34

## Chapitre IV – Résolution Mathématique des Système

IV-1 Modélisation……..35
IV-2 Analogie électrique ……...35
IV-3 Hypothèses simplificatrices ……..36
IV-4 Descriptions des modèles ……37
IV-5 Schéma électrique équivalent……39
IV-6 Mise en équation des système ..... 44
IV-7 Discrétisations des Equations……... 45

IV-8 Résolution du système d'équation …….52

IV-8-1 Principe de simulation……52

IV-8-2 Programme Principal de calcul ……..53

IV-9 Organigramme développé pour le calcul numérique des paramètres inconnues……...55

## Chapitre V – Interprétation et discussions des résultas

V-1 Variation des puissances…….58

V-2 Variation des température……... 61

V-3 Variation de l'écart de température…… 64

V-4 Variation des rendement…… 67

V-5 Impact de l'écart de température sur ;

1- l'efficacité globale de l'échanges thermique ……..73

2- le rendement thermique instantané ……74

**Conclusion et Recommandations** …….….. 75

**Références Bibliographiques** …….…….. 77

**Annexe** …….…… 79

# Résumé

Le but de ce travail est d'étudier l'impact de l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre intermédiaire sur le rendement du capteur solaire à double vitrage (eau) .

la région considéré dans cette étude est El Oued " sud - est de l'Algérie " ou' le climat en été est chaud et sec et ou' le ciel est dégagé offrant une énergie solaire ( rayonnement solaire ) durant presque toute l'année ( le 15 juillet qui est choisi comme le jour d'étude ).

les différentes études théoriques et expérimentales effectuées dans le domaine des capteurs solaires ont montré que le rendement et l'efficacité globale des capteurs solaires sont influencés par des paramètres physique thermique et de construction , en particulier par l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre .

Notre étude a montré que l'optimisation de cet écart nous permet d'obtenir un meilleur rendement.

A cet effet, une modélisation mathématique ( Algorithme de calcul ) a été effectuée moyennant certaines hypothèses simplificatrices de base, et en se basant sur des bilans énergétiques du système .la résolution des équations , nous a permis de constater qu'un meilleur rendement est obtenue durant la période où l'écart de température est presque constant étant au minimum entre l'absorbeur et la vitre intermédiaire ( les pertes de chaleur sont au minimum ) .

tout comme on peut aussi obtenir ce dernier par :

* une faible épaisseur de la vitre de 2 mm .
* une inclinaison de capteur à 30 degré .
* un espace optimal entre l'absorbeur et la vitre intermédiaire de 30 mm .
* un espace optimal entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire de 10 mm .
* une vitesse de vent 3.7 m / s .



**Mots Clés :** Rayonnement, Absorbeur, Capteur solaire à double vitrage, Ecart de température, Rendement thermique instantané.

# Abstract

The aim of this work is to study the impact of temperature-difference between the absorber and the mediane glass on the efficiency of double-glazing collector .

The study area is El Oued " south – east of Algeria " where the climate is hot and dry in the summer and the sky is mostly clear giving then a free heat ( radiation ) .

Different theoretical and experimental studies carried out in the field of solar collector , have shown that global efficiencies are affected by physical thermal and building parameters especially by the temperature-difference between the absorber and the glass .

our study has shown that better efficiencies are obtained for optimum temperature difference. A mathematical modeling has been carried out ( Algorithms ),taking into account some simplified hypotheses and different energetic balances .Resolution of equations, has allowed us to notice that a better efficiency is obtained at the period when the temperature-difference between the absorber and the mediane glass is mosthy constant.

as well as we can obtain this latter by :

* A low glass thickness of 2 mm .
* An Optimum inclination of the collector $30^0$ .
* An optimum space between the absorber and the mediane glass 30 mm .
* An optimum space between the protection glass and the mediane glass 10 mm .
* A wind velocity 3.7 m / s .



**Key words:** Radiation ,absorber, double-glazing collector **,** temperature-difference, instantaneous thermal efficiency

# Introduction

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986,avant de retrouver un second souffle en 1998 à la suite de la signature du protocole de Kyoto, protocole qui prévoit notamment une baisse de 5.2 % des émissions de gaz à effet d e serre des pays riche sur la période 2002 -2012 par rapport à 1990.A cette même période a été mis en place au niveau national le plan national de lutte contre le changement climatique ainsi que le plan national d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire sera lié non seulement à ses avantage économique qui augmentant au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossile diminueront,mais surtout pour des considérations liées à la protection de l'environnement : pas de rejet de certains polluants tels que les fumées contenant du $CO_2$ et du NO, issues des centrales thermique, pas de danger radioactif et de déchets encombrants issus des centrales nucléaires, possibilité de limitation de l'emploi des CFC ( production de froid solaire par adsorption ).

Ainsi le rayonnement solaire peut être transformé en chaleur à basse température, par des capteur plans utilisant conjointement l'absorption par une surfaces sélective et l'effet de serre crée par le vitrage. Ces dispositifs servent à la production d'eau ou de l'air chaud Pour des applications,autres que le chauffage des locaux,il est parfois nécessaire d'atteindre des température supérieure à environ 100 $^0$C, les capteur solaire doivent utiliser des surfaces absorbants sélectives, ou bien concentrer le rayonnement solaire grâce à leur forme géométrique ( paraboloïdes ), ainsi on atteint des températures très élevées de chaleur industrielle [ 1, 7 ].

L'objectif de ce travail est d'étudier l'efficacité énergétique globale d'un capteur solaire à double vitrage, qui est conditionné par l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre intermédiaire ainsi que l'influence de cet écart par certains paramètres météorologiques, géométriques.

Cette étude comprend cinq chapitres en plus d'une partie annexe.

- Le premier chapitre comprend une étude bibliographique sur le gisement solaire.
- Le second chapitre comprend les différentes technique de captation solaire et composante du capteur solaire à double vitrage .
- Le troisième chapitre concerne l'étude théorique du capteur .
- Le quatrième chapitre est consacré à la résolution mathématique de système, ou nous procédons à une modélisation des système en plus des études numériques établies afin de résoudre nos différentes équations à l'aide d'un outil informatique appelé " VISUL FORTRAN " .

- Le cinquième chapitre aborde l'interprétation et la discussion des différents résultats issus des différent modèles.

Enfin nous clôturons cette étude par une conclusion et des recommandations,en plus d'une partie annexe.

# Capitre I

# Gisement Solaire

# Capitre II

# Technique de Captation Solaire

# Capitre III

# Etude Théorique

# Capitre IV

# Résolution Mathèmatique de Systéme

# Capitre V

# Interprétation et Discussion des Résultats

# Conclusion

# Référence Bibliographique

# Résumé

# Introduction

# Annexes

# I-1 Le gisement solaire

## I-1-1 Notions sur le gisement solaire:

Le gisement solaire représente l'énergie disponible sous forme de rayonnement .L'énergie solaire est le moteur de toutes les grandes sources naturelles d'énergie [ 10 ] .

## I-1-2 Caractéristique du soleil :

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km sa masse est de l 'ordre de $2.10^{27}$ tonnes. composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium , il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes, Elles transforment à chaque seconde 564.106 tonnes d'hélium , la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E= m C^2$),ce qui représentes une énergie totale de $36.10^{22}$ KW. La terre étant à une distance de $150.10^6$km du soleil, elle reçoit une énergie de$1.8.10^{17}$ W [1 et3 ] .

On notera que 98 % du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'onde inférieures à 4 µm et comme première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777 K.

## I-1-3 Constante solaire :

L'énergie totale que le soleil envoie à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface de $1m^2$ placée perpendiculairement au rayonnement est appelée "constante solaire ". Elles est fondamentale et indépendante des conditions météorologiques [ 9 ].

## I-1-4 Rayonnement au voisinage du sol:

On est intéressé, du point de vue utilisation de l'énergie, par l'énergie reçue au voisinage du sol qu'à la limité de l'atmosphère terrestre. Le rayonnement solaire arrivant au sol se compose de[ 3 ]:

-**Rayonnement direct :** c'est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications .

-**Rayonnement diffus:** est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. il n'à pas de direction privilégiée.

-**Rayonnement global:** est la somme du rayonnement direct et diffus.

## I-1-5 Données astronomiques [2 , 10] :

**I-1-5-1 L'équateur:** C'est une ligne fictive de séparation entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud .

**I-1-5-2 Latitude du lieu (Φ):** La distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport l'équateur ( 0-90$^0$dans l'hémisphère nord ), mesuré en degré .

**I-1-5-3 Longitude ( L ):** C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré.

**I-1-5-4 L'altitude( Z ):** L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique ( niveau moyen de la mer = ± 0.00 ), il est mesuré en mètre.

**I-1-5-5 La déclinaison ( δ ) :** C'est l'angle formé par l'axe terre- soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. Elle vaut +23$^0$27 au solstice d'été et -23$^0$27 au solstice d'hiver et est nulle aux équinoxes. La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation :

$$\delta = 23.45^0 \sin ( 0.980^0 (j + 284 ) ) \qquad \textbf{( I -1)}$$

Où :

δ : la déclinaison mesurée en degré.

j : est le numéro du jour de l'années.

**I-1-5-6 L'albédo:** C'est la fraction de l'énergie incidente diffusée par un corps lumineux, ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.

## I-1-6 Mouvement de la terre auteur du soleil :

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le Plan de cette ellipse appelé l'écliptique .

L'excentricité de cette ellipse est faible, ce qui fait que la distance terre- soleil ne varie que de ± 1.7 % par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675.10$^6$ km .

la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur .

L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique: l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut 23$^0$27 [ 3 ] .

le repérage du soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

**a)- Hauteur angulaire du soleil (h) :** la hauteur du soleil est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire ou point d'observations et le plan horizontal , passant par le point

d'observations.

$$\text{Sin}(h) = \text{Sin}\,\Phi.\,\text{Sin}\,\delta + \text{Cos}\,\Phi\,.\,\text{Cos}\,\omega.\,\text{Con}\,\delta \qquad \textbf{( I -2 )}$$

**b) l'azimut ( ψ ) :** c'est L'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal sud (dans l'hémisphère sud ) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil.

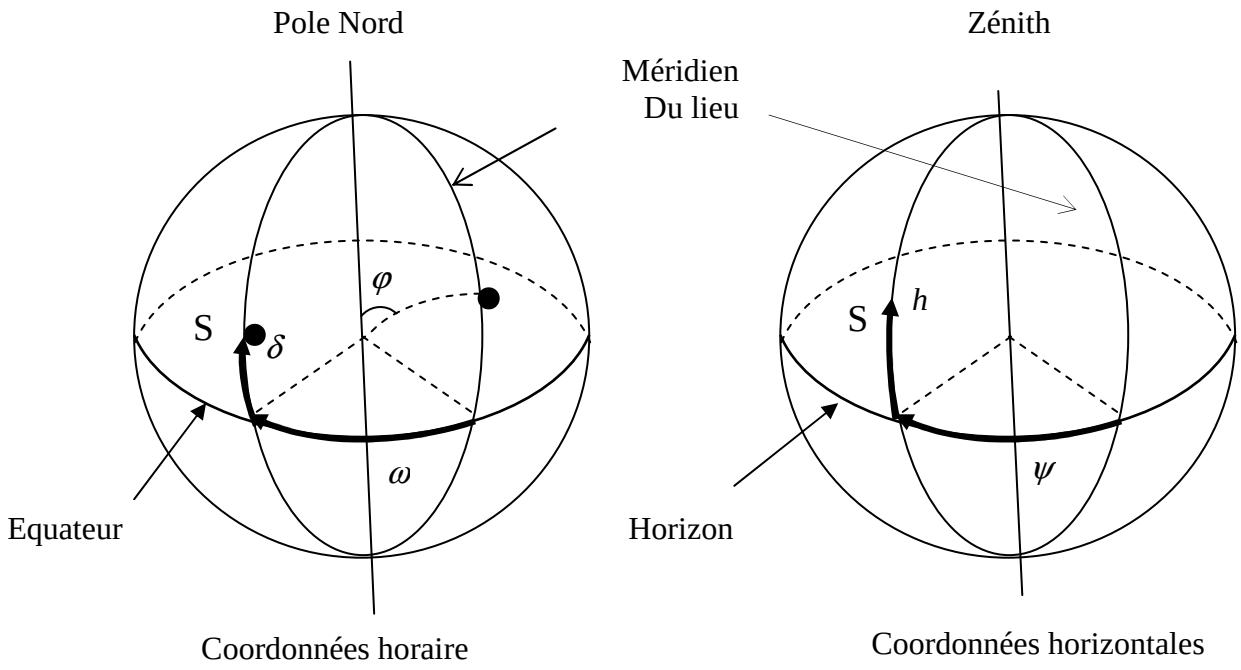
L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud. En utilisant les projections sur le plan horizontal du point d'observation [11].

$$Sin\ \psi = \frac{\cos\ \delta\ \sin\ \omega}{\cosh} \qquad \textbf{( I -3)}$$

Où:

ω: l'angle horaire solaire .

Ces deux angles sont représenté sur la **figure ( I -1 )** :




**Figure( I -1 ) : Deux système de cordonnées sphérique**

## I-1-7 Détermination du temps solaire :

### I-1-7-1 L'angle horaire:

L'angle (ω) étant l'angle formé par le plan méridien passant par la centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien). Il définit le vrai temps solaire [ 2 ] :

$$\omega = 15 ( 12 - TSV ) \qquad \textbf{( I -4)}$$

Il est midi TSV, Si $\omega = 0$.

### I-1-7-2 Définition des différents temps:

toutes les valeurs du temps dans le calcul d'énergie solaire sont exprimées en temps solaire vrai [ 10 ] .

#### I-1-7-2-1 Le temps solaire vrai (T SV):

C'est l'angle dièdre du méridien du soleil et du lieu à un instant donné ( TSV ) qui est donné par les cadrans solaires et le temps.

$$T\,SV = 12 + \omega / 15 \quad \text{(heures)} \qquad \textbf{( I -5)}$$

#### I-1-7-2-2 Le temps solaire moyen ( TSM ):

Il est Parfais appelé le temps solaire local " TSL "

$$TSM = T\,SV - ( Et / 60) \quad \text{(heures)} \qquad \textbf{( I -6)}$$

Où:

Et: équation de temps .

Elle est donnée par une formule d'approximation plus simple [ 2 ] :

$$Et \text{ (en minutes)} = 9.9 \sin [\ 2 ( 0.986\, n + 100) - 7.7 \sin (0.986\, n - 2) ]$$

Où n désigne le quantième annuel compté de 1 à 365 .

#### I-1-7-2-3 Le temps civil

Il est le temps moyen mon que comme origine minuit [ 9 ].

#### I-1-7-2-4 Le temps universel ( TU ):

Il est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore

GMT( Greenwich Mean Time ),pour un lieu situé à la longitude " L "

TU = TSM – ( L / 15) pour les longitudes Est

TU = TSM – ( L / 15) pour les longitude Ouest

**I-1-7-2-5 Le temps légal ou local :**

C'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 [ 11 ].

## II-1 Les capteurs solaires:

Le capteur solaire plan est un système thermique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique,La chaleur reçue de cette conversion est utilisée soit directement (cas de chauffage), soit elle même convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire de cycles thermodynamiques. Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet de serre qui consiste à piéger le rayonnement solaire,ce dernier arrive au niveau du couvert et le traverse pour atteindre une surface revêtue d'une peinture noire, appelée absorbeur. L'absorbeur va absorber une grande partie du rayonnement solaire entraînant une augmentation de sa température. Le rayonnement réfléchi par l'absorbeur arrive sur la vitre et comme celle-ci est opaque aux rayonnements infrarouges, le rayonnement est ainsi piégé [ 8 ].

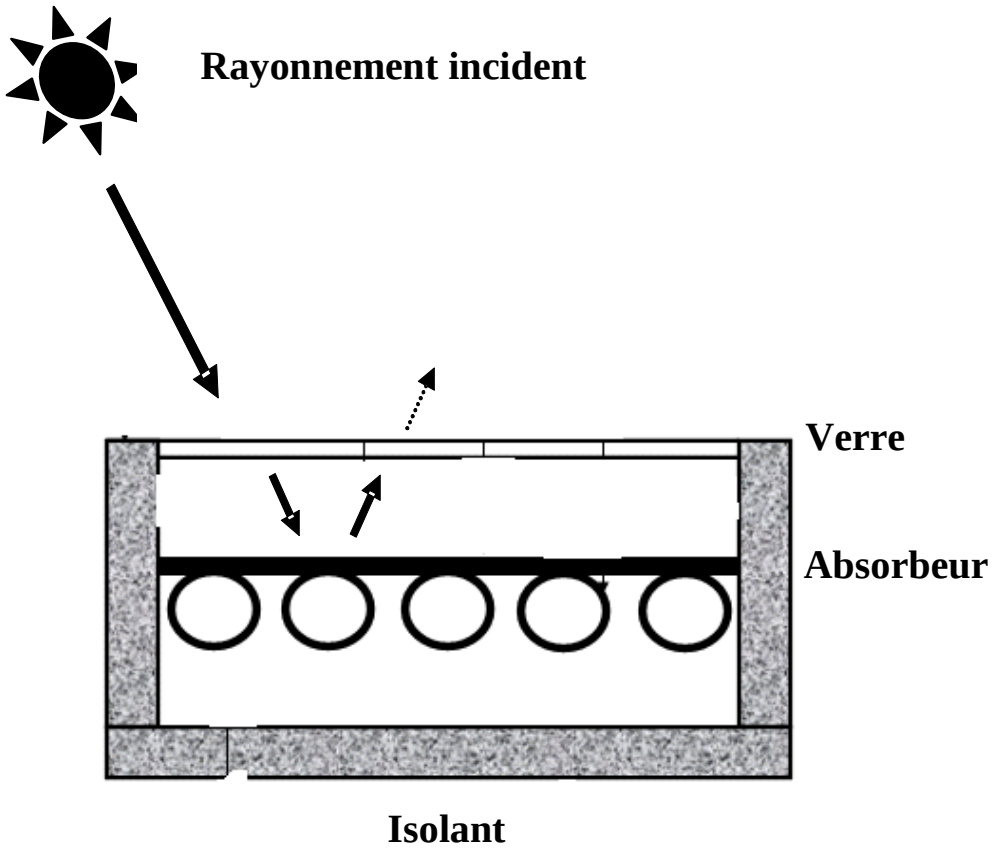



**Figure ( II -1 ) : Schéma d'un Capteur Solaire**

## II-1-1 Les bases de captation :

### II-1-1-1 Corps noirs:

C'est un corps ou une surface qui absorberait de façon idéale la totalité d'un rayonnement qu'il reçoit, et qui,à une température donnée et pour une longueur d'onde donnée, émétterait aussi le maximum de flux par rayonnement.

### II-1-1-2 Effet de serre :

Sur terre, les constituants qui dans l'effet de serre sont les nuages et quelques gaz minoritaires qui constituent moins de 1% de l'atmosphère ( vapeur d'eau, dioxyde de carbone, méthane,…….). ainsi une modification de l'effet de serre modifie la convection, qui elle-même modifie la couverture, qui, à son tour, influe sur l'effet de serre.

L'effet de serre est souvent mis à profit pour la conversion thermique à base de température du rayonnement solaire. On désigne normalement par " effet de serre ", l'ensemble des modifications apportées à l'équilibre énergétique et thermique d'un corps récepteur, par la mise en place d'un couvercle de verre, transparent au rayonnement solaire, ayant une longueur d'onde comprise entre 0.01µm et 4µm et opaque au rayonnement solaire terrestre de longueur d'onde supérieure [ 9 ] .

## II-1-2 Classification et description des capteurs solaires:

On classe les capteur solaires d'après : le fluide de travail utilisé, l'orientation du capteur et type de composent

### II-1-2-1 Fluide de travail utilisé :

L'air constitue une classe de ces fluides et l'eau une autre. Naturellement il en existe d'autres. On utilise par exemple des hydrocarbures ou des hydrocarbures halogénés, en particulier pour la réfrigération et la génération d'électricité, et l'eau contenant un antigel comme l'éthylène glycol [ 6 ] .

**a) les Capteurs solaires à eau** : Le capteur solaire thermique à eau est constitué principalement d'une couverture transparente,d'un absorbeur,d'un conduit permettant à l'eau de collecter l'énergie cédée par l'absorbeur, et d'un isolant. La **figure ( II-2)** représente le principe de fonctionnement d'un tel capteur.

Le principe est le suivant : le rayonnement solaire, dont le spectre se situe essentiellement dans les longueurs d'onde du visible ( courtes longueurs d'onde), passe à travers la couverture transparente ( constituée ici d'un vitrage ), et arrive sur l'absorbeur. Celui-ci s'échauffe, et transmet de l'énergie thermique par convection à l'eau qui circule dans les conduits, et re-émet du

rayonnement thermique vers l'extérieur (grandes longueurs d'onde). L'isolant permet de réduire les pertes thermiques du capte

La couverture transparente peut être constituée d'un double vitrage, ce qui entraîne une diminution des pertes thermiques par rapport à un simple vitrage. De plus des vitrages à faible teneur en oxyde de fer permettent d'augmenter le taux de transmission du rayonnement solaire. L'absorbeur peut être recouvert d'une couche sélective pour cette fois réduire les pertes par rayonnement. L'eau qui circule dans le capteur est en général mélangée à un antigel. Le débit d'eau peut être par exemple de 50 litres/heure/m² de capteur.

On peut distinguer deux types de système: le système de circulation à basse pression et le système de circulation à haute pression [ 7 ] .

*** le Système à basse pression:** on emploie ce système pour le chauffage des piscines, le chauffage d'eau industrielle et pour le chauffage dans les foyers domestiques dans certaines régions du monde. Dans ces système, il suffit d'un film plastique mince comme réservoir pour l'eau, le plastique doit cependant être suffisamment épais pour supporter les conditions atmosphériques .

*** le Système à haute pression :** dans ce système, le circuit d'eau est généralement constitué de tubes en Cuivre et de plaque métallique qui augmentent la surface d'absorption et en collectionne plus de calories que dans le cas précédant. Les ailettes sont normalement en acier, en aluminium ou en cuivre, et ayant des épaisseurs de l'ordre de 0.25 mm pour le cuivre, 0.5 mm pour l'aluminium et 2 mm pour l'acier, à cause des différences de conductivité thermique. L'espacement entre les tubes dépend de l'épaisseur des ailettes [ 9 ] .

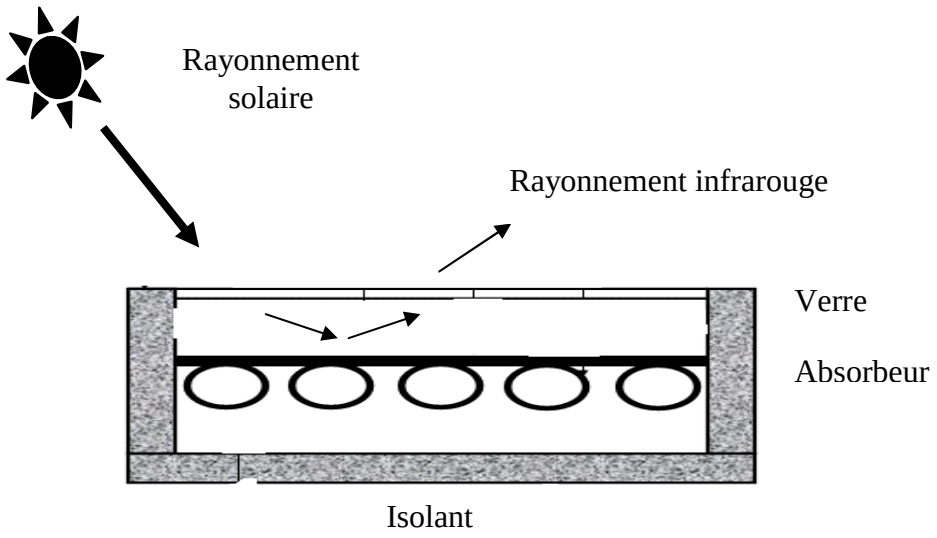



**Figure ( II -2 ) : Capteur solaire thermique à eau ( vue en coupe)**

**b) Le Capteur solaire à air :** ce type de capteur est très simple, il est constitué d'une couche absorbante à dos isolé, refroidie par un courant d'air circulant entre un couvercle de verre **(figure II- 3)**

On peut augmenter sa surface d'échange de chaleur soit en donnant un pouvoir émissif élevé au dos de l'absorbeur soit en donnant à l'absorbeur une surface striée ou rainurée[ 7 ].

Une autre méthode d'amélioration du rapport surface d'échange sur projection de la surface d'absorbeur consiste à utiliser un absorbeur poreux. On peut employer, à cet effet, du tissu noir de la fibre de verre noircie, des écrans rainurés et tirés, de la laine d'acier ou des assemblages de lamelles.

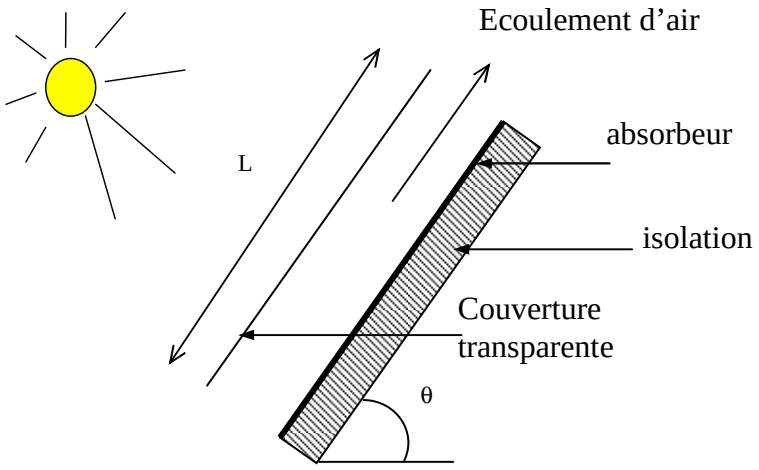



**Figure ( II -3) : Schéma de principe d'un capteur à air**

**II-1-2-2 Orientation:**

Les capteurs solaires peuvent être fixés ou à poursuite (en rotation ). Les capteurs fixés ne bougent pas pendant la journée ce qui est le cas des capteurs à usage domestique ( chauffe eau solaire). Dans l'hémisphère nord ils font face au sud et font avec l'horizontale, un angle égale à la latitude pour optimiset, la collecte moyenne du rayonnement sur l'année. Si on a besoin d'obtenir des températures élevées, le capteur ou certains de ses composants doit suivre le déplacement du soleil avec précision [ 13 ].

Il existe aussi des capteurs semi fixés dont l'angle d'inclinaison peut être réajusté à chaque saison.

**II-1-2-3 Type de Composants**:

Pour décrire une classe de capteurs solaires, on utilise souvent un certain type de couvercle, d'absorbeur et d'échangeur de chaleur .

*** le couvercle:**

Le couvercle peut ne pas exister et dans ce cas, le capteur est dit non vitré ou bien il existe une ou deux Feuilles de verre et le capteur est donc à simple vitrage ou à double vitrage

*** l'absorbeur:**

Les absorbeurs peuvent se classer d'après leur forme par exemple les absorbeur plans ou à cavités. Ils peuvent aussi absorber sélectivement ou non le rayonnement.

*** l'échange de chaleur** :

Ce type d'échange de chaleur sert aussi à classer les capteurs solaires, comme par exemple

l'échangeur plaque tube, qui est constitué d'un échangeur tubulaire faisant partie intégrante d'une plaque ou soudé à cette plaque [ 6 ].

## II-1-3 Description générale et composants du capteur à double vitrage [ 13 ] :

Le capteur à double vitrage doit être constitué des éléments suivants :

**II-1-3-1 L'absorbeur:**

C'est la transformation du rayonnement solaire en chaleur , il transport cette chaleur au fluide caloporteur, il est constitué d'une plaque métallique ( cuivre,acier, aluminium……..) revêtue d'une peinture noire matte.

Ses principales qualités sont:

-un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité;

-un pouvoir émissif dans l'infrarouge aussi faible que possible ;

-une bonne conductivité thermique ;

-une faible inertie thermique .

**II-1-3-2 L'isolant :**

Il joue un rôle très important dans les applications de l'énergie solaire, non seulement au niveau des absorbeurs, dont il faut limiter les pertes mais aussi calorifuger les tuyauteries chargées de véhiculer la chaleur et les enceintes de stockage.

On peut classer les matériaux isolants en trois catégories qui sont :

| Catégorie de l'isolant | Type de l'isolant | Conductivité en W/m.K |
|---|---|---|
| Minéral | - Feldspath<br>- Laine de verre<br>- Vermiculite | <br>0.034 à 0.053<br>0.12 à 0.60 |
| Végétal | - Bois sec<br>- Sciure de bois<br>- Cendre de bois | 0.13 à 0.40<br>0.11 |
| Organique de synthèse | - Mousse phénolique<br>- Mousse de chlorure de polyvinyle<br>- Mousse de polyuré-thane<br>- Polystyrène | 0.044<br>0.033<br>0.025<br>0.04 |

**II-1-3-3 Les vitres**:

Pour améliorer encore les propriétés des capteurs, les constructeurs utilisent parfois deux vitres:

- la vitre intermédiaire.
- la vitre de protection ( vitre extérieure): ce second verre a très peut d'incidence sur l'effet de serre, son intérêt consiste surtout en une meilleure isolation thermique de la face avant du capteur, sa qualité est aussi importante que celle de l'isolation arrière.

**II-1-3-4 Le boîtier** :

Il contient les trois éléments cités précédemment et dont les parois sont tapissées d'une couche isolante destinée à réduire les pertes vers l'arrière et les cotés du capteur, il doit être solide et résistant à la corrosion .

## II-1-4 Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires[ 9, 10]:

*** Paramètres externes:** les paramètres externes sont représentés par:

- paramètre d'ensoleillement : éclairement énergétique du au rayonnement global a la position du soleil et a La durée d'insolation

- la température extérieure sèche
- la vitesse du vent sur le capteur .

* **Paramètres internes: :** les paramètres internes sont représentes par :

- paramètre de position : l'inclinaison et l'orientation
- dimensions de capteur: épaisseur , longueur , la largeur et la surface réceptrice.
- la section de passage du fluide .

*** Paramètres de fonctionnements :** les paramètres de fonctionnement sont représentés par:

- la température d'entrée du fluide dans le capteur .
- les température des différentes parties du capteur.
- le débit du fluide caloporteur .

## III-1 Les apports solaires :

Les apports solaire sont constituésar :

* le rayonnement solaire direct.

* le rayonnement solaire diffus, ou ce dernier sera considéré par la suite comme un rayonnement direct avec un angle d'incidence de $60^0$ .

## III-1-1 Puissance incidente [ 5] :

### III-1-1-1 Calcul du rayonnement direct

La relation calculant le rayonnement direct est :

$$P_{dir} = P_{dir,h} \times \cos(i) \qquad (W/m^2) \qquad \textbf{(III-1)}$$

Où :

* i : angle d'incidence. difinit comme suit:

$$\cos(i) = \sin(\delta).\sin(\Phi).\cos(\beta)+\cos(\delta)\cos(\Phi)\cos(\beta)\cos(\omega)+ \cos(\delta).\sin(\beta).\sin(\alpha).\sin(\omega).$$
$$\sin(\delta).\cos(\Phi).\sin(\beta).\cos(\alpha) + \cos(\delta). \sin(\Phi). \sin(\beta).\cos(\alpha).\cos(\omega). \qquad \textbf{(III-2)}$$

β : angle d'inclinaison du capteur .

Pour une surface regardant l'équateur $\beta > 0$ .

Orientée au sud, on a $\alpha = 0$ et cos(i) s'écira:

$$\cos(i)=\cos(\Phi-\beta).\cos(\delta).\cos(\omega) + \sin(\Phi-\beta).\sin(\delta) \qquad \textbf{(III-3)}$$

Danc une surface orientée vers l'équateur $\alpha = 0$, inclinée d'un angle β sur l'horizontal se comporte vis-à-vis du rayon solaire comme une surface horizontale orientée vers l'équateur et située à la latitude (Φ-β) [ 9 ]

* $P_{dir,h}$ : est le flux direct reçu par un plan horizontal.

$$P_{dir,h} = I_0 \times C \times \tau_{dir} \qquad (W/m^2) \qquad \textbf{(III-4)}$$

$$C = 1 + 0.033 \times \cos(360\, d / 365) \qquad \textbf{(III-5)}$$

d: numéro du jour dans l'année.

$\tau_{dir}$ : coefficient de transmission du rayonnement direct.

En pratique, nous définissons l'état du ciel par deux coefficient A et B, qui symbolisent le trouble atmosphérique du lieu . la transmissivité totale de la couche atmosphérique, pour le rayonnement direct, s'écrit :

$$\tau_{dir} = A \exp(-B / \sinh) \qquad \textbf{(III-6)}$$

A et B sont des constantes tirées à partir du tableau suivant :

| | Ciel pur | Conditios normales | Zons industrielles |
|---|---|---|---|
| A | 0.87 | 0.88 | 0.91 |
| B | 0.17 | 0.26 | 0.43 |

**Tableau III-1-valeur de A et B**

**III-1-1-2 Calcul du rayonnement diffus:**

Il englobe deux flux [ 14 ]:

* l'un émis dans la voute céleste et qui atteint le capteur .

* l'autre en provenance du sol est reçu par le capteur .

Le premier est donné par la relation :

$$P_{dif,C} = P_{dif,h} ( (1+\cos\beta) / 2 ) \qquad (W/m^2) \qquad \textbf{(III-7)}$$

Et le second par :

$$P_{dif,S} = a ( (1- \cos \beta) / 2 ) ( P_{dif,h} . \sinh + P_{dif,h} ) \qquad (W/m^2) \qquad \textbf{(III-8)}$$

Avec :

a : albédo

$P_{dif,h}$ : le flux diffus reçu par un plan horizontal, il est donné par la relation suivante :

$$P_{dif,h} = I_0 \times C \times \sin ( h ) \times \tau_{dif} \qquad ( W / m^2 ) \qquad \textbf{(III-9)}$$

$I_0$ : est la constante solaire ( $I_0$= 1356 w / $m^2$ ).

$\tau_{dif}$ : coefficient de transmission du rayonnement diffus donné comme suit:

$$\tau_{dif} = 0.2710 - 0.2939 \times \tau_{dir} \qquad \textbf{(III-10)}$$

Enfin :

$$P_{dif} = P_{dif,c} + P_{dif,S} \qquad (w / m^2) \qquad \textbf{(III-11)}$$

**II-1-1-3 Le flux solaire reçu par la surface du capteur :**

La puissance incidente sur un isolateur de 1 $m^2$ incliné angle " $\beta$ " est la somme de deux flux : direct et diffus .

$$P_g = P_{dif} + P_{dir} \qquad (w / m^2) \qquad \textbf{( III-12)}$$

## III-1-2 les Puissance absorbées :

Considérons une radiation lumineuse $I_0$ **( figureIII-1)** incidente sur un ensemble optique; une partie de cette radiation est réfléchie, une partie est absorbée et une partie est transmise. On définit [ 5 , 12 ] :

-le facteur de réflexion $\rho = ( I_r / I_0 )$.

-le facteur d'absorption $\alpha = ( I_a / I_0 )$.

-le facteur de transmission $\tau = ( I_t / I_0 )$.

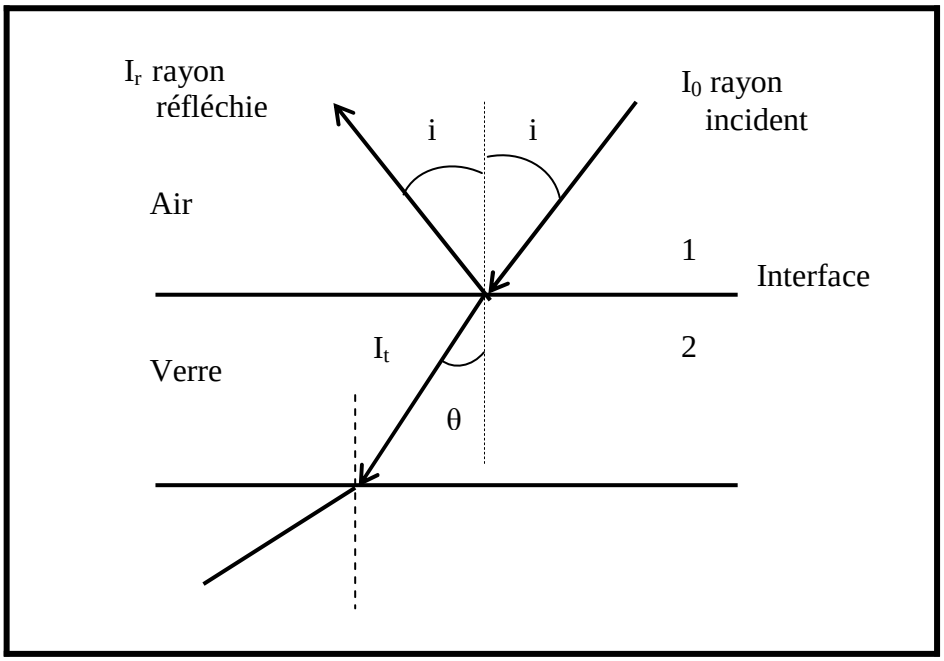



**Figure (III -1) : Le flux absorbé par le verre**

On voit que :

$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

Désignant par $n_1$ et $n_2$ les indices de réfraction de deux milieux le rayonnement solaire ( $I_0$ ) frappant l'interface d'une surface vitrée à un angle d'incidence ( i ) sera partiellement réfracté ( $I_t$ ) avec un angle ( θ ) et partiellement réfléchi ( $I_r$ ) avec un angle ( i ) telle que montrés dans la **figure ( III-1)** .

Le pouvoir réflecteur r d'une surface plane entre l'air et le matériau est donné par la relation suivante [13 ]:

$$r = \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(\theta - i)}{\sin^2(\theta + i)} + \frac{tg^2(\theta - i)}{tg^2(\theta + i)}\right] \quad \text{( Fresnel )} \qquad \textbf{(III-13)}$$

Et :

- r : le pouvoir réflecteur du verre .
- i : angle d'incidence (degré).
- θ : angle réfraction (degré). La loi de Descartes donne [ 5 ] :

$$\theta = Arc\ \sin\left[\frac{n_1}{n_2}\sin(i)\right] \qquad \textbf{(III-14)}$$

Pour une lame de verre d'épaisseur " ev ", les coefficients d'absorption, de transmission et de réflexion du au rayonnement direct sont donnés par les relations suivantes [ 12 ,18 ] :

**a) le coefficient d'absorption ( $\alpha_{v-dir}$ ) :**

il est donné par :

$$\textbf{(III-15)}\quad \alpha_{v-dir} = 1 - \tau_{dir} - \rho_{dir}$$

**b) le coefficient de transmission ( $\tau_{dir}$ ):**

il est donné par :

$$\tau_{dir} = T_{ab}(1 - r)^2 \frac{1}{1 - (rT)^2} \qquad \textbf{(III-16)}$$

On peut écrire aussi:

$$\tau_{dir} \approx T_{ab}\left(\frac{1 - r}{1 + r}\right) \qquad \textbf{(III-17)}$$

On pose:

$$T_r = \left(\frac{1 - r}{1 + r}\right) \qquad \textbf{(III-18)}$$

On aura:

$$\tau_{dir} = T_r . T_{ab} \qquad \textbf{(III-19)}$$

Tel que :

- $T_r$ : représente la transmission de à la réflexion .

- $T_{ab}$ : représente le coefficient du à l'absorption, il est donné par la relation suivante ( loi de Lambert Bougue :

$$T_{ab} = \exp\left(\frac{-k.ev}{\cos\theta}\right) \quad \textbf{(III-20)}$$

Ou :

- k : coefficient d'extinction du verre (l'indice d'absorption ) ( $m^{-1}$).

- ev : épaisseur de la couverture ( m ).

- θ : angle de réfraction ( en degré ).

**c) le coefficient de réflexion ( $\rho_{dir}$ ):**

il est donné par :

$$\rho_{dir} = r + \frac{(1-r)^2 T_{ab}^{\ 2} r}{1-(rT_{ab})^2} \quad \textbf{(III-21)}$$

On peut écrire aussi:

$$\rho_{dir} = r(1 + T_{ab}\tau_{dir}) \quad \textbf{(III-22)}$$

Lorsque on a un système de deux couvertures identiques, nous aurons [ 4, 13 ]:

**a) le coefficient d'absorption ( $\alpha_{Sys-dir}$ ) :**

il est donné par :

$$\alpha_{sys-dir} = 1 - \tau_{sys-dir} - \rho_{sys-dir} \quad \textbf{(III-23)}$$

**b) le coefficient de transmission ( $\tau_{Sys-dir}$ ):**

il est détermine par :

$$\tau_{sys-dir} = \frac{\tau^2_{dir}}{1-\rho^2_{dir}} \quad \textbf{(III-24)}$$

Il est calculé aussi par :

$$\tau_{sys-dir} = T_{ab}^{2} T_{r_2} \qquad \textbf{(III-25)}$$

Les coefficients $\tau_{dir}$ , $\rho_{dir}$ , $T_{ab}$ sont calculés par les relations précédentes pour une lame de verre.

Le coefficient $T_{r2}$ est calculé comme suit:

$$T_{r_2} = \frac{1 - r}{1 + 3r} \qquad \textbf{(III-26)}$$

**c) le coefficient de réflexion ( $\rho_{Sys-dir}$ ) :**

il est défini par :

$$\rho_{sys-dir} = \rho_{dir}\left(1 + \tau_{sys-dir}\right) \qquad \textbf{(III-27)}$$

Nous définissons de la même manière les coefficient $\alpha_{v\text{-}dif}$,$\tau_{dif}$ , $\rho_{dif}$ ,$\alpha_{Sys-dif}$ ,$\tau_{Sys-dif}$ ,$\rho_{Sys-dif}$ qui sont dues au rayonnement diffus, en l'assimilant à un rayonnement direct frappant le capteur sous un angle d'incidence , $\theta = 60^0$.

**III-1-2-1 Puissance absorbée par la vitre :**

**a) la puissance absorbée par la vitre de protection :**

Elle est donnée par [ 4 , 14 ]:

$$P_{v1} = P_{dir}\,\alpha_{v1-dir} + P_{dif}\,\alpha_{v1-dif} \qquad (W/m^2) \qquad \textbf{(III-28)}$$

**b) la puissance absorbée par la vitre intermédiaire :**

Elle est donnée par [ 7 , 13 ]:

$$P_{v2} = \tau_{dir}\,P_{dir}\,\alpha_{v2-dir} + \tau_{dif}\,P_{dif}\,\alpha_{v2-dif} \qquad (W/m^2) \qquad \textbf{(III-29)}$$

**II-1-2-2 Puissance absorbée par le corps noir [ 13,15 ] :**

On considère l'arrangement donné par la **figure ( III-2 )** , dont on a deux couvertures identiques Caractérisées par $\tau_V$ , $\rho_V$ .

La fraction $\tau_V$ de la radiaction solaire incidente est transmise vers la première couche d'air, après un nombre infini de réflexions à l'intérieur de cette couche, le flux solaire entrant dans la deuxième couche d'air est déterminé par l'expression :

$$U = \frac{P_g \tau_v^2}{1 - \rho_v^2} \qquad \textbf{(III-30)}$$

On utilise l'équation **( III 30 )** le flux absorbé " V " par la plaque après une multitude de réfections à l'intérieur de la deuxième couche d'air est donné par :

$$V = U \frac{\alpha_P}{1 - \rho_v \rho_P} = UA \qquad \textbf{(III-31)}$$

La radiation solaire réfléchit par l'absorbeur est transmise vers la première couche d'air, elle est donnée comme suit:

$$W = U \frac{\rho_P \tau_v}{1 - \rho_v \rho_P} = UB \qquad \textbf{(III-32)}$$

La radiation solaire transmise vers la deuxième couche d'air après une multitude de réflexions dans la première couche d'air est exprimée par :

$$X = W \frac{\rho_v \tau_v}{1 - \rho_v^2} = WC = UBC \qquad \textbf{(III-33)}$$

Après une infinités de réflexions dans la seconde couche d'air, la fraction ( A ) du flux solaire ( X ) est absorbée et le processus peut être répété pour donner la quantité totale de la radiation solaire absorbée par le corps noir.

La puissance totale absorbée par la plaque est décrit par :

$$P_{p0} = UA + UABC + UA(BC)^2 + UA(BC)^3 + \dots\dots\dots + UA(BC)^n .$$

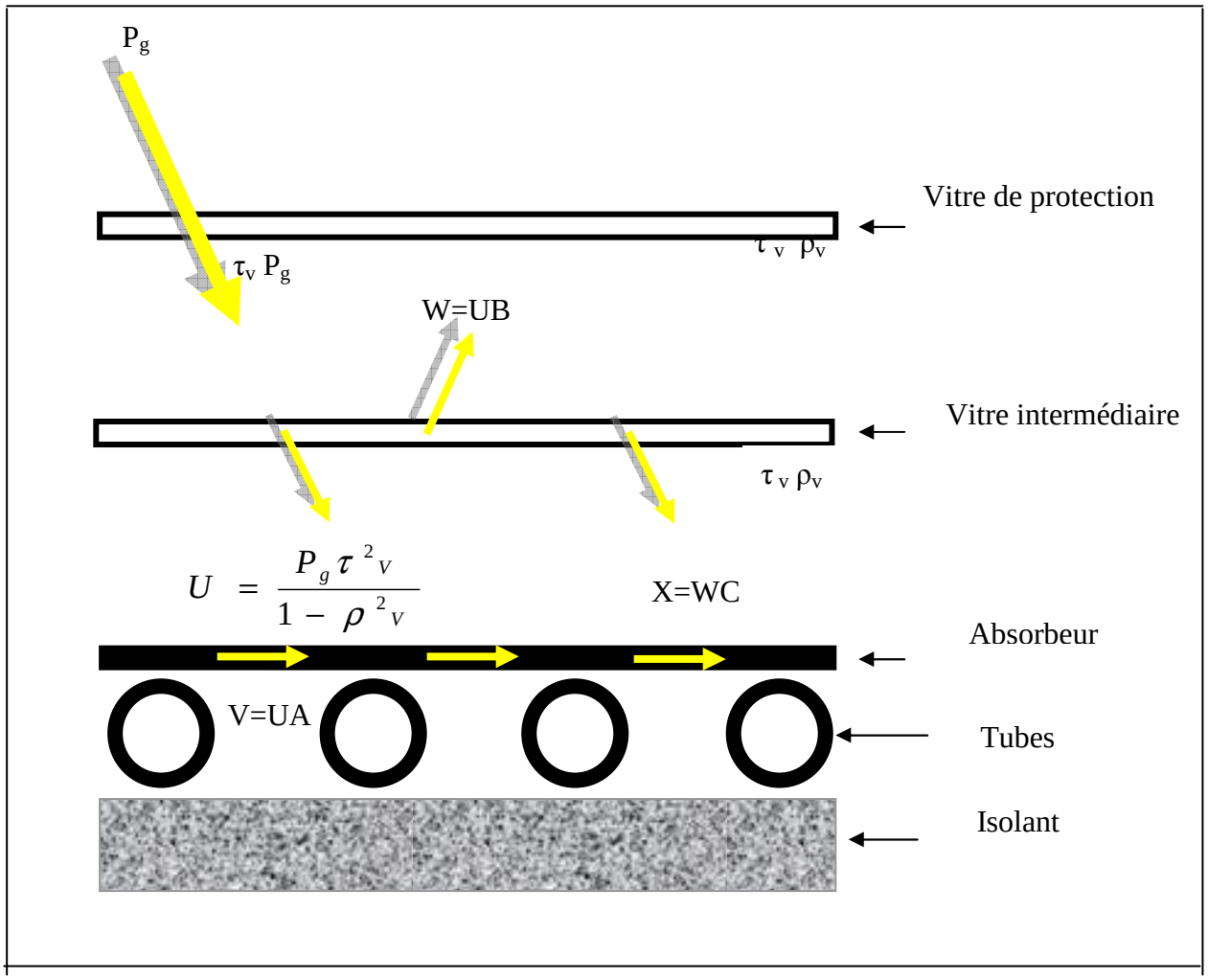



**Figure ( III-2 ) : Les réflexions dans un capteur à double vitrage**

En utilisant l'approche mathématique décrite dans **l'annexe B** on trouve:

$$P_{p0} = \frac{UA}{1 - BC} = \frac{P_g \tau_v^2 \alpha_p}{(1-\rho_v^2)(1-\rho_v \rho_p)} \frac{1}{1 - \frac{\rho_p \tau_v}{(1-\rho_v \rho_p)} \frac{\rho_v \tau_v}{(1-\rho_v^2)}} \qquad \textbf{(III-34)}$$

Après la simplification :

$$P_{p0} = \frac{P_g . \tau_v^2 \alpha_p}{(1-\rho_v^2)(1-\rho_v \rho_p) - \rho_p \rho_v \tau_v^2} \qquad (W / m^2) \qquad \textbf{(III-35)}$$

## III-2 Différents modes des transferts de chaleur au niveau du capteur :

### III-2-1 Echange par conduction :

La conduction est le mode de transfert thermique qui intervient au sein des milieux solides et cela est du, à la non homogénéité de la température, ce qui entraîne la présence d'un gradient de température [ 9 ] .

les échanges par conduction existent principalement entre **( voir figure IV-3)** :

* Les deux faces de la vitre $H_{CV}$ .
* La face supérieure et la face inférieure de l'isolant $H_{Ci}$ .
* La plaque et le tube $H_{CPt}$ .
* Le tube et l'isolant $H_{Cit}$ .

La densité du flux thermique à travers une surface élémentaire " ds ", est liée au gradient de température ( loi de Fourier ) [ 5 ].

$$\Phi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}\,(T) \qquad (W/m^2) \qquad \textbf{(III-36)}$$

$\lambda$ : conductivité thermique du milieu, exprimé par ( $w.m^{-1}.k^{-1}$ ).

La puissance qui traverse une surface S est alors donnée par :

$$\varphi = \frac{\lambda.\, S(T_1 - T_2)}{L} = H_C .S\,(T_1 - T_2) \qquad (W/m) \qquad \textbf{(III-37)}$$

$$H_C = \frac{\lambda}{L} \qquad \textbf{(III-38)}$$

Si l'épaisseur " L" de la paroi est négligeable par rapport aux autres dimensions on ne tiendra pas compte des effets de bord, et l'échange thermique se fait dans une direction à la surface des parois Et dans le cas de plusieurs parois superposées, on peut écrire [ 11 ] :

$$H_C = \frac{1}{\sum_i \frac{L_i}{\lambda_i}} \qquad \textbf{(III-39)}$$

Où :

$H_C$: coefficient de transfert thermique par conduction.

**III-2-2 Echange par rayonnement :**

Ce mode de transfert ne nécessite pas la présence d'un milieu matériel, on s'intéresse principalement aux échanges radiatifs qui existent **( voir figure IV-3) [ 9 ,12 ]**:

***** Entre la vitre de protection et le ciel $H_{r\,V1C}$ .

* Entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire $H_{r\,V1V2}$ .

* Entre la vitre intermédiaire et le plaque chauffante $H_{r\,V2\,P}$ .

* Entre l'isolant et la sol $H_{ris}$.

$$H_{rvc} = \sigma.\varepsilon_v (T_C + T_v).(T^2{}_C + T^2{}_v) \qquad \textbf{(III-40)}$$

Où :

- σ : constante de Stéphane - Boltzmann.
- $\varepsilon_v$ : émissivité de la vitre.
- $T_C$ : la température de ciel (relation de Swindank ) [11] .

$$T_C = 0.0552(T_{amb})^{1,5} \qquad \textbf{(III-41)}$$

$T_{amb}$ : la température ambiante en ( K ). **( voir annexe C )**

Alors:

$$H_{rv1c} = \sigma\varepsilon_{v1} (T_C + T_{v1}).(T^2{}_C + T^2{}_{v1}) \qquad \textbf{(III-42)}$$

$$H_{ris} = \sigma\varepsilon_i (T_{ie} + T_{sol}).(T^2{}_{ie} + T^2{}_{sol}) \qquad (T_{Sol} \approx T_{amb}) \qquad \textbf{(III-43)}$$

Considérons un transfert radiatif entre deux plaques parallèles de température $T_1$ et $T_2$. On applique la formule [ 5 ] :

$$H_{r12} = \frac{\sigma(T_1 + T_2)(T^2{}_1 + T^2{}_2)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}.\frac{S_1}{S_2}} \qquad \textbf{(III-44)}$$

Où : $F_{12}$ : facteur de forme géométrique entre les surfaces 1 et 2 .

Alors

$$H_{rv1v2} = \frac{\sigma(T_{v1} + T_{v2}).(T^2{}_{v1} + T^2{}_{v2})}{\frac{2}{\varepsilon_{v2}} - 1} \qquad \textbf{(III-45)}$$

$$H_{rpv2} = \frac{\sigma\left(T_p + T_{v2}\right).\left(T^2{}_p + T^2{}_{v2}\right)}{\frac{1-\varepsilon_p}{\varepsilon_p} + 1 + \frac{1-\varepsilon_{v2}}{\varepsilon_{v2}}} \qquad \textbf{(III-46)}$$

- $\varepsilon_p$ : émissivité de la plaque.

**III-2-3 Echange par convection :**

Les échanges par convection qui interviennent sont **( voir figureIV-3 ) [ 5,12 ]** :

* Entre la vitre de protection et l'ambiance $H_{V\,v1\,a}$.
* Entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire $H_{V\,v1\,v2}$.
* Entre la vitre intermédiaire et la plaque $H_{V\,P\,v2}$ .
* Entre le tube et le fluide $H_{V\,t\,f}$ .
* Entre le fluide et l'isolant $H_{V\,f\,i}$.
* Entre l'isolant et l'ambiance $H_{V\,i\,a}$.

Nous définissons le nombre de Reynolds, de Graschoff, de Prandtl et de Nusselt, on se basant sur des Corrélations, citées dans la bibliographie par plusieurs auteurs .

Le calcul du coefficient de transfert par convection, par l'intermédiaire du groupement de Nusselt se fait ainsi :

$$Nu = h_V \ ( L / \lambda ) \qquad \textbf{(III-47)}$$

L : la longueur caractéristique.

$\lambda$ : la conductivité thermique .

Pour déterminer le coefficient d'échanges entre la vitre et l'ambiance, nous pouvons utiliser corrélation de Hottel et Woertz [ 3 ] :

$$h = 5.67 + 3.86\ V_w \qquad ( w / m^2.K ) \qquad \textbf{( III-48)}$$

h : coefficient de transfert thermique .

$V_w$ : la vitesse du vent en ( m / s ).

-l'échange de chaleur entre la vitre et l'absorbeur s'effectue naturellement, par la détermination, en première étape, du nombre de Nusselt pour une inclinaison " $\beta$ " du capteur par apport à l'horizontal

$$Nu = \frac{90 - \beta}{90} \times Nu_0 + \frac{\beta}{90} \times Nu_{90} \qquad \textbf{(III-49)}$$

$Nu_\beta$ : Nombre de Nusselt pour une inclinaison β du capteur .

$Nu_0$ : Nombre de Nusselt pour une inclinaison nulle.

$Nu_{90}$ : Nombre de Nusselt pour une inclinaison β égale à $90^0$

D'après la corrélation de Grondin et Roux nous avons [ 12 ] :

$$N_U = A \times R^{\beta}{}_a \times F^{-C} \qquad \textbf{(III-50)}$$

F : facteur de forme de la cavité, ( F = X / Z ) .

X : longueur de la cavité formée par les deux plans, comptée dans le sens de la pente.

Z : épaisseur de la cavité .

Ra : Nombre de Rayleigh [ 16,17 ].

$$R_a = G_r . P_r \qquad \textbf{(III-51)}$$

$$G_r = \frac{g.\beta.\Delta T.L^3}{\nu^2} \qquad \textbf{(III-52)}$$

Et :

$$P_r = \frac{\mu.C_P}{\lambda} \qquad \textbf{( III-53)}$$

Où :

L : longueur caractéristique en mètre ( distance entre les deux plans ).

λ : la conductivité thermique en ( W / m.K ).

μ : coefficient de viscosité dynamique en ( w / m.s ) .

$C_p$ : capacité calorifique massique à la pression constante en ( J / kg K ) .

ν : coefficient de viscosité cinématique en ( $m^2$ / s ) .

g : accélération de la pesanteur en ( m / $s^2$ ) .

B : coefficient de dilatation thermique. $B = \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial}{\partial T}$

ΔT : Ecart de température entre les deux plans.

Les propriétés de l'air doivent être évaluées à la température moyenne entre ($T_{v1}$ ,$T_{v2}$), ( $T_{v2}$ ,$T_p$ ).

On peut calcul Nu directement par la corrélation de Hollands et al [ 5 ]:

$$N_U = 1 + 1.44\left(1 - \frac{1708}{Ra.\cos\beta}\right)\left(1 - \frac{(\sin 1.8\beta)^{1.6} 1708}{Ra.\cos\beta}\right) + \left(\left(\frac{Ra.\cos\beta}{5830}\right)^{1/3} - 1\right) \quad \textbf{(III-54)}$$

Avec : $0^0 < \beta < 75^0$

Pour le coefficient d'échange par convection, entre deux surfaces parallèles ( plaque et vitre ), plusieurs formes sont proposées, parmi ces relations on cite [12 ]:

$$H_V = 1.14.\frac{(T_P - T_v)^{0.31}}{e^{0.07}{}_{vp}}\left(1 - 0.0018.\left(\frac{T_P - T_v}{2} - 10\right)\right) \quad \textbf{(III-55)}$$

$e_{vp}$ : espace entre la vitre et la plaque.

L'échange de chaleur entre le tube et l'eau se fait par convection forcée, Pour les conduites circulaires, on peut utiliser des corrélations, en tenant compte des nombres adimensionnels suivant [ 5 , 16 ] :

$$R_e = \frac{\rho.V.D}{\mu} = \frac{V.D}{\nu} \quad \textbf{(III-56)}$$

$$G_Z = R_e \times P_r \times \frac{D}{L} \quad \textbf{(III-57)}$$

$$S_t = \frac{N_U}{R_e.P_r} \quad \textbf{(III-58)}$$

Re : Nombre de Reynolds.

Gz : Nombre de Graetz .

St : Nombre de Stanton .

ρ : masse volumique ( kg / $m^2$ )

V : vitesse moyenne du fluide ( m / s ) .

D : le diamètre du conduit (m).

μ : la viscosité dynamique ( kg / m.s).

ν : la viscosité cinématique ( $m^2$/ s ).

L : la longueur du conduit (m) .

**Remarque:**Vous trouverez les caractéristiques de l'eau et de l'air dans la partie **(Annexe F 1, 2)**

* Dans le cas d'un écoulement laminaire ( Re < 2100) :

- pour Gz < 100:

$$N_U = 3.66 + \frac{0.085.G_z}{1+0.047.G_z^{2/3}}\left[\frac{\mu_a}{\mu_P}\right]^{0.14} \quad \text{Haussen} \qquad \textbf{(III-59)}$$

- pour Gz > 100:

$$N_U = 1.86Gz^{1/3}\left[\frac{\mu_a}{\mu_P}\right]^{0,.14} + 0.87.\left(1+0.015.Gz^{1/3}\right) \quad \text{Sieder – Tate} \qquad \textbf{(III-60)}$$

* Dans la zone transitoire ( 2100 < Re < 10000 ) :

$$N_U = 0.116.\left(R_r^{2/3} - 125\right)\Pr^{1/3}.\left(1+\left(\frac{D}{L}\right)^{2/3}\right).\left[\frac{\mu_a}{\mu_p}\right]^{0,14} \quad \text{Haussen} \qquad \textbf{(III-61)}$$

* Dans le cas d'un écoulement turbulent, ( Re > 10000 ) :

$$N_U = 0,023.R_e^{0.8}.P_r^{1/3}.\left[\frac{\mu_a}{\mu_P}\right]^{0,14} \quad \text{( Sieder - Tate)} \qquad \textbf{(III-62)}$$

Avec :

$\mu_a$ : la viscosité dynamique de l'eau à la température considérée.

$\mu_P$ : la viscosité dynamique de l'eau au niveau de la paroi à la température considérée.

Ou bien on utilise la formule donnée par Tan et Charters :

$$N_U = 0,018R_r^{0.8}.P_r^{0.4} \qquad \textbf{( III-63)}$$

## III-3 Bilan Energétique du capteur à double vitrages [ 9, 13 ] :

On donne les bilans énergétiques représentés dans le **figure ( III-3)**, par unité de surface du capteur comme suit :

$$Pp_0 = Qu_0 + Qp_0 \qquad \textbf{(III-64)}$$

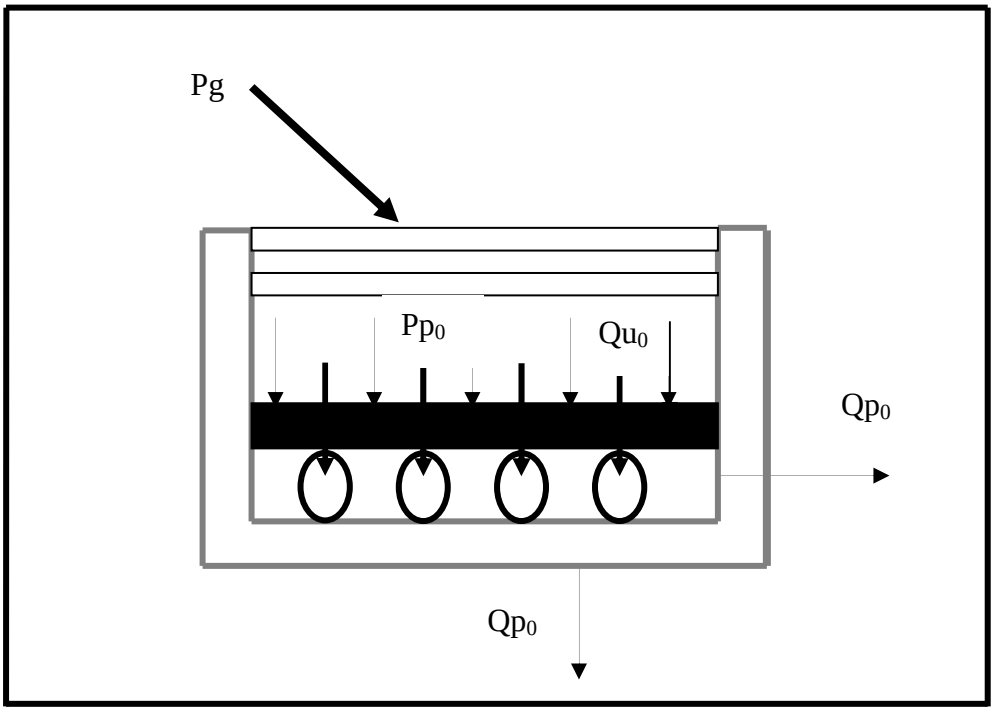



**Figure ( III -3) : bilan énergétique pour un capteur à double vitrage**

Avec :

$Pp_0$ **:** la récupération effective de l'énergie incidente par l'absorbeur .

$Qu_0$: l'échange de chaleur entre l'absorbeur et le fluide à réchauffer .

$Qp_0$ : l'échange de chaleur entre l'absorbeur et le milieu extérieur .

Le fractions $Pp_0$ du flux incident Pg sont donne par :

$$Pp_0 = (\tau^2 \alpha) . Pg \qquad \textbf{(III-65)}$$

$(\tau^2 \alpha)$ : le coefficient de transmission – absorption .

$P_g$ : le flux global au niveau du sol, sur un plan incliné .

**III-3-1 Puissance utile récupérée par le fluide :**

La puissance utile $Q_{U0}$ est égale à la puissance absorbée $P_{P0}$ diminuée des pertes $Q_{P0}$ . On peut considérer d'une façon générale que ces pertes sont proportionnelles à l'écart de température ( $T_P – T_a$ ) [ 3, 9 ] .

* Nous pouvons donc écrire ( puissance utile en fonction de $T_P$ ):

(W) $$Q_{U0} = P_{P0} - Q_{P0} = S\left(\left(\tau^2\alpha\right)P_g - U_{g0}\left(T_P - T_a\right)\right)$$ **(III-66)**

Avec :

$U_{g0}$ : coefficient global des pertes.

Tp : la température de l'absorbeur, elle est difficile a estimer en réalité car il y a des gradients de température sur l'absorbeur .

* Puissance utile en fonction de $T_f$ et l'efficacité du transfert :

$$Q_{U0} = P_{P0} - Q_{P0} = S.f_c\left(\left(\tau^2\alpha\right)P_g - U_{g0}\left(T_f - T_a\right)\right) \quad \text{(W)}$$ **(III-67)**

Où:

$f_C$ : Paramètre constructifs, du capteur ( efficacité du transfert ).

$T_f$ : la température du fluide caloporteur ( $^0$C ).

* Si le transfert était idéal entre l'absorbeur et le fluide à réchauffer ; on aurait $T_{fe} = T_P$ et on écrit alors :

La puissance utile en fonction de $T_{fe}$ et l'efficacité globale [ 13 ] :

$$Q_{U0} = P_{P0} - Q_{P0} = S.F_{r0}\left(\left(\tau^2\alpha\right)P_g - U_{g0}\left(T_{fe} - T_a\right)\right) \quad \text{(W)}$$ **(III-68)**

Avec :

$T_{fe}$: température d'entrée du fluide ( $^0$C ).

$F_{r0}$: l'efficacité globale de l'échange thermique du capteur . est défini comme suit:

$$F_{r0} = \frac{puissance\ \ utile\ \ réelle}{puissance\ \ utile\ \ idéale} = \frac{qC_P\left(T_{fs} - T_{fe}\right)}{(\tau\alpha).P_g - U_{g0}\left(T_{fe} - T_a\right)}$$ **(III-69)**

D'où :

$$F_{r0} = \frac{q.C_P}{U_{g0}.S}\left[1 - \exp\left(\frac{-f_C.U_{g0}.S}{q.C_P}\right)\right]$$ **(III-70)**

q : débit massique total du fluide ( kg / s ).

$C_P$ : chaleur massique du fluide en ( J / kg . K ).

L'efficacité " f c " du transfert, peut s'écrire comme suit :

$$f_C = \frac{\dfrac{1}{U_{g0}}}{w.\left[\dfrac{1}{U_{g0}.(d_e + (w - d_e).f)} + \dfrac{e_S.d_e}{b.\lambda_S} + \dfrac{1}{d_i.\pi.h_{Vtf}}\right]} \qquad \textbf{(III-71)}$$

$e_S$ : étant l'épaisseur de la soudure, exprimée en (m ).

b : largeur de la soudure, en (m).

$\lambda_S$ : Conductivité thermique de la soudure, ( W / m. K ).

Nous définissons le rendement de l'ailette " f " par la relation suivante :

$$f = \frac{\tan gh\left(m.\left(\dfrac{w - d_e}{2}\right)\right)}{m.\left(\dfrac{w - d_e}{2}\right)} \qquad \textbf{(III-72)}$$

$$m^2 = \frac{U_{g0}}{\lambda_p.e_p} \qquad \textbf{(III-73)}$$

$\lambda_p$ : étant la conductivité thermique du plan ( W / m .c° ).

$e_p$ : l'épaisseur de l'absorbeur ( m ) .

w : la distance entre les tubes .

$d_e$ : le diamètre extérieur du tube ( m ).

**III -3-2 Les pertes :**

Les pertes thermique du capteur sont données sous la forme suivante [ 3 ]:

$$Q_{P0} = S.U_{g0}\left(T_{Pm} - T_a\right) \quad \textbf{(III-74)}$$

-S : surface du capteur .

-$U_{g0}$ : le coefficient global des pertes est défini comme suit :

$$U_{g0} = U_{arr} + U_{lat} + U_{av} \quad \textbf{(III-75)}$$

-$T_a$ : la température de l'air extérieur.

-$T_{Pm}$ : la température moyenne de la plaque absorbante.

$$T_{Pm} = \frac{3T_{fs} + T_{fe}}{4} + \Delta T \quad \textbf{(III-76)}$$

$T_{fS}$ : la température de sortie du fluide .

$T_{fe}$ : la température d'entrée du fluide .

$\Delta T$ : l'écart de température existant entre le fluide caloporteur et la paroi absorbante.

Les pertes par arrière ( par le fond ) du capteur sont dues à la conduction par l'isolant arrière, le coefficient des pertes arrières par unité de surface s'écrit ainsi [ 9, 10 ] :

$$U_{arr} = \frac{\lambda_i}{e_i} \quad (W/m^2.K) \quad \textbf{(III-77)}$$

$\lambda_i$ : conductivité thermique de l'isolant .

ei : épaisseur de l'isolant .

Dans la pratique, la relation des pertes latérales par unité de surface est :

$$U_{lat} = \frac{\lambda_{i,lat}.e_b.P_b}{e_{lat}.S} \quad \textbf{(III-78)}$$

$\lambda_{i,lat}$ : conductivité thermique de l'isolant latéral.

$e_b$ : épaisseur du boîtier .

$P_b$ : périmètre du boîtier.

$e_{lat}$ : épaisseur de l'isolant latéral.

Les pertes avant sont dues à la convection et aux échanges radiatifs entre la surface d'absorption et la face extérieur de la couverture **(voir figure IV-4) [ 13 ].**

Le coefficient des pertes avant est défini comme suit:

$$U_{av} = \frac{1}{R_i + R_e + R_C} \qquad \textbf{(III-79)}$$

La résistance intérieure $R_i$ s'opposant au transfert entre la surface de captation et la surface de la vitre intermédiaire :

$$R_i = \frac{1}{H_{VPv2} + H_{rPv2}} \qquad (\ m^2.K/W) \qquad \textbf{(III-80)}$$

La résistance extérieure $R_e$ s'opposant au transferts convectif et radiatif entre la surface de la vitre de protection et l'environnement :

$$R_e = \frac{1}{H_{Vv1a} + H_{rv1C}} \qquad \textbf{(III-81)} \qquad (\ m^2.K/W\ )$$

La résistance $R_C$ s'opposant au transfert entre la surface de la vitre de protection et la vitre intermédiaire :

$$R_C = \frac{1}{H_{Vv1v2} + H_{rv1v2}} \qquad (\ m^2.K/W) \qquad \textbf{(III-82)}$$

Finalement nous arrivons à :

$$U_{av} = \left[ \frac{1}{H_{VPv2} + H_{rPv2}} + \frac{1}{H_{Vv1a} + H_{rv1C}} + \frac{1}{H_{Vv1v2} + H_{rv1v2}} \right]^{-1} \qquad \textbf{(III-83)}$$

## III-4 Calcul du rendement d'un capteur :

Le rendement global du capteur est définit comme étant le quotient de la puissance utile sur la puissance incidente [ 3 ]

$$\eta = \frac{Q_{U_0}}{P_g . S} \qquad \textbf{(III-84)}$$

Nous déduisons les expressions du rendement global η du capteur à double vitrage comme suit [13 ] :

$$\eta = F_{r0} . \left[ \left( \tau^2 \alpha \right) - U_{g0} . \frac{\left( T_{fe} - T_a \right)}{P_g} \right] \qquad \textbf{(III-85)}$$

Comme nous pouvons aussi définir un autre rendement dit optique dont il représente le rapport entre la puissance reçue par la plaque et la puissance incidente [ 9 ] .

$$\eta_0 = \frac{P_{P_0}}{P_g} \qquad \textbf{(III-86)}$$

Si bien que :

$$\eta = F_{r0} \left[ \eta_0 - U_{g0} . \frac{\left( T_{fe} - T_a \right)}{P_g} \right] \qquad \textbf{(III-87)}$$

## IV-1 Modélisation,

Il existe plusieurs méthodes de simulation, l'une d'elles est suivie par Bliss et Whillier ,elle suppose que le régime est permanent et que les éléments du capteur se trouvent à une température moyenne constante. Cette approche néglige les effets transitoires mais elle constitue un outil commode, bien qu'il faille,là aussi procéder à des itérations [4,5 ] .

L'autre méthode est suivie par Lin et Jordan, elle donne des rendements moyens sur une période donnée, il faut intègre les équations sur celle-ci .

La méthode que nous avons suivie est la résolution du système d'équations dit " Pas a pas ". Cette méthode nous permet de rendre compte de l'évolution des températures de tous les éléments du capteur dans le temps et l'espace.

Le capteur est découpé en tranches fictives égales ( mailles ), cette coupe est faite dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur, puis on établit le bilan des échanges énergétiques qui interviennent aux niveau des nœuds **( voir figure IV-1)**, places aux endroits dont on veut étudier l'évolution temporelle de leurs températures [13 ,19] :

Pour pouvoir déterminer le bilan énergétique entre les nœuds, il serait commode d'utiliser les analogies qui existent entre le transfert de chaleur et le transfert électrique.

## IV-2 Analogie électrique [ 5,12]:

On détermine la densité du flux du chaleur échangé entre deux points l'un porté à une température $T_1$ et l'autre à la température $T_2$ , de manière générale comme suit :

$$\Phi = h\,(T_1 - T_2) \qquad \textbf{(IV-1)}$$

$\Phi$: densité de flux thermique ( $w / m^2$ )

h : coefficient du mode de transfert de chaleur ( $w / m^2.k$ )

Cette dernière équation ressemble à la loi d'Ohm en électricité et s'écrit :

$$E_2 - E_1 = R_{eq}\, I \qquad \textbf{(IV-2)}$$

$E_1$ et $E_2$ : sont les potentielles électriques aux points 1 et 2 du circuit .

$R_{eq}$ : la résistance aux transferts de charge électrique entre les points 1 et 2.

I : intensité du courant [ 13 ]

Cette analogie **( voir tableau IV-1)** , nous permet de représenter les échanges de chaleur par des schémas électrique sur lesquels on peut appliques la loi d'Ohm et Kirchhoff.

Lorsque le transfert de chaleur entre deux élément s'opère suivant modes simultanés ( par exemple convection et rayonnement ), le circuit électrique modèle comportera des résistances en parallèles.

Lorsqu'il s'effectue suivant plusieurs modes successifs ( par exemple conduction et convection ), le circuit électrique comportera de résistances en séries.

Considérons une maille à l'instant t , " i " un nœud de cette maille, de masse $M_i$ ( kg ), de capacité spécifique $C_{pi}$ ( j / kg.k ), de section Si ( $m^2$) et de température $T_i$ (k) .

En appliquant la loi d'Ohm au nœud " i " on obtient :

$$\frac{M_i}{S_i} C_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} = P_i + \sum_{j=n} h_{ij} \left( T_j - T_i \right) \qquad \textbf{(IV-3)}$$

$M_i$ : masse du milieu i du système ( kg ) .

$Cp_i$ : chaleur spécifique ( j / kg. K ).

$S_i$ : la section ($m^2$ )

$P_i$ : facteur de puit ou de source .

∂t : pas de temps.

## IV-3 Hypothèses simplificatrices :

Nous avons trouvé que la formulation de certaines hypothèses est nécessaire, pour une simulation approchée du système,est qui sont présentées comme suit [5,9 ]:

* le ciel est considéré comme un corps noir de température équivalente calculée.
* la température de sol est prise égale à la température de l'ambiance.
* l'écart de température entre la face supérieure et la face inférieure de la couverture transparente est considérés négligeable.
* les surfaces d'échange de chaleur par rayonnement sont supposées grises et diffusantes .
* les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes .
* le rayonnement diffus atmosphérique est isotrope [ 12 ].
* la direction du vent est parallèle à la surface de la vitre.
* la température du fluide à l'entrée d'une tranche quelconque est égale à la température de sortie de la tanche précédente.
* le régime d'écoulement est transitoire .

* les différents milieux solides ont une température uniforme dans un plan normal au sens de l'écoulement [ 14 ].

* les flux de chaleur sont unidimensionnels.

## IV-4 Descriptions des modèles:

Soit un capteur constitué de éléments suivant **(figure IV-2)**

- une vitre sur sa face avant ( vitre de protection ).
- une vitre intermédiaire.
- une plaque métallique peinte en noir mat servant d'absorbeur .
- une tubulure en forme parallèle soudée contre la plaque, servant à la circulation du fluides caloporteur.
- un isolant sur ses faces arrières et latérales.
- un boîtier en bois contenant l'ensemble des éléments.

**Tableau IV-1 : Analogie du système thermique au modèle électrique [ 12 ] .**

| Système thermique | | | Modèle électrique | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Paramètre** | **Symbole Usuel** | **Unité** | **Paramètre** | **symbole Usuel** | **Unité** |
| **Température** | T | K | **Potentiel** | V | Volts |
| **Flux de chaleur** | Q , Φ | W | **Intensité** | I | Ampères |
| **Densité de flux de chaleur** | φ | $W / m^2$ | **Densité de courant** | i | $A / m^2$ |
| **Conductivité thermique** | λ | W / m / K | **Conductivité électrique** | K | |
| **Coefficient d'échange** | H | $W / m^2 / K$ | | | |
| **Conductances thermique** | | W / K | **Conductance électrique** | | $Ω^{-1}$ |
| **Résistance thermique** | R | K / W | **Résistance électrique** | $R_e$ | Ω |
| **Résistance** | | m.K / W | **Résistivité** | P | m. V / A |
| **Thermique** | | | **Electrique** | | |
| **Chaleur massique** | $C_P$ | J / K | | | |
| **Capacité calorifique m .$C_P$** | C | J / K | **Capacité électrique** | C | Farad |

## IV-5 Schéma électrique équivalent [4,9,13 et 14]:

On prend une maille et on fait le bilan des échanges thermique entre les déférents nœuds de cette maille ainsi que l'apport énergétique sur chaque nœud **( figure IV-3 )** , nous définissons :

-$H_{v\,v\,1\,a}$ **(w / m$^2$.K )** : coefficient d'échanges thermique par convection entre la vitre de protection et l'ambiance.

-$H_{r\,v\,1\,c}$ **(w / m$^2$.K )** : coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre de protection et le ciel.

-$H_{c\,v}$ **(w / m$^2$.K )** : coefficient d'échange thermique par conduction entre la face externe et la face interne de la vitre.

-$H_{v\,v1\,v2}$ **(w / m$^2$.K )** : coefficient d'échanges thermique par convection entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire .

-$H_{r\,v1\,v2}$ **(w / m$^2$.K)** :coefficient d'échanges thermique par rayonnement entre la vitre de protection et La vitre intermédiaire .

-$H_{v\,p\,v2}$ **(w / m$^2$.K)** :coefficient d'échanges thermique par convection entre la vitre de intermédiaire et l'absorbeur .

-$H_{r\,p\,v2}$ **(w / m$^2$.K)** : coefficient d'échanges thermique par rayonnement entre la vitre intermédiaire et l'absorbeur .

-$H_{C\,p\,t}$ **( w / m$^2$.K**) :coefficient d'échanges thermique par conduction entre la plaque et le tube du capteur

-$H_{v\,t\,f}$ **(w / m$^2$.K )** :coefficient d'échanges thermique par convection entre le tube et le fluide du capteur

-$H_{vif}$ **(w / m$^2$.K )** : coefficient d'échange thermique par convection entre l'isolant et le fluide du capteur

-$H_{Ci\,t}$ **(w / m$^2$.K)** : coefficient d'échange thermique par conduction entre le tube et l'isolant du capteur

-$H_{Ci}$ **(w / m$^2$.K)** : coefficient d'échange thermique par conduction entre l'isolant de la face externe et la face interne du capteur.

-$H_{v\,i\,a}$ **(w / m$^2$.K )**:coefficient d'échange thermique par convection entre la face externe de l'isolant du capteur et l'ambiance.

-$H_{r\,i\,s}$ **(w / m$^2$.K )** : coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la face externe de l'isolant du capteur et le sol.

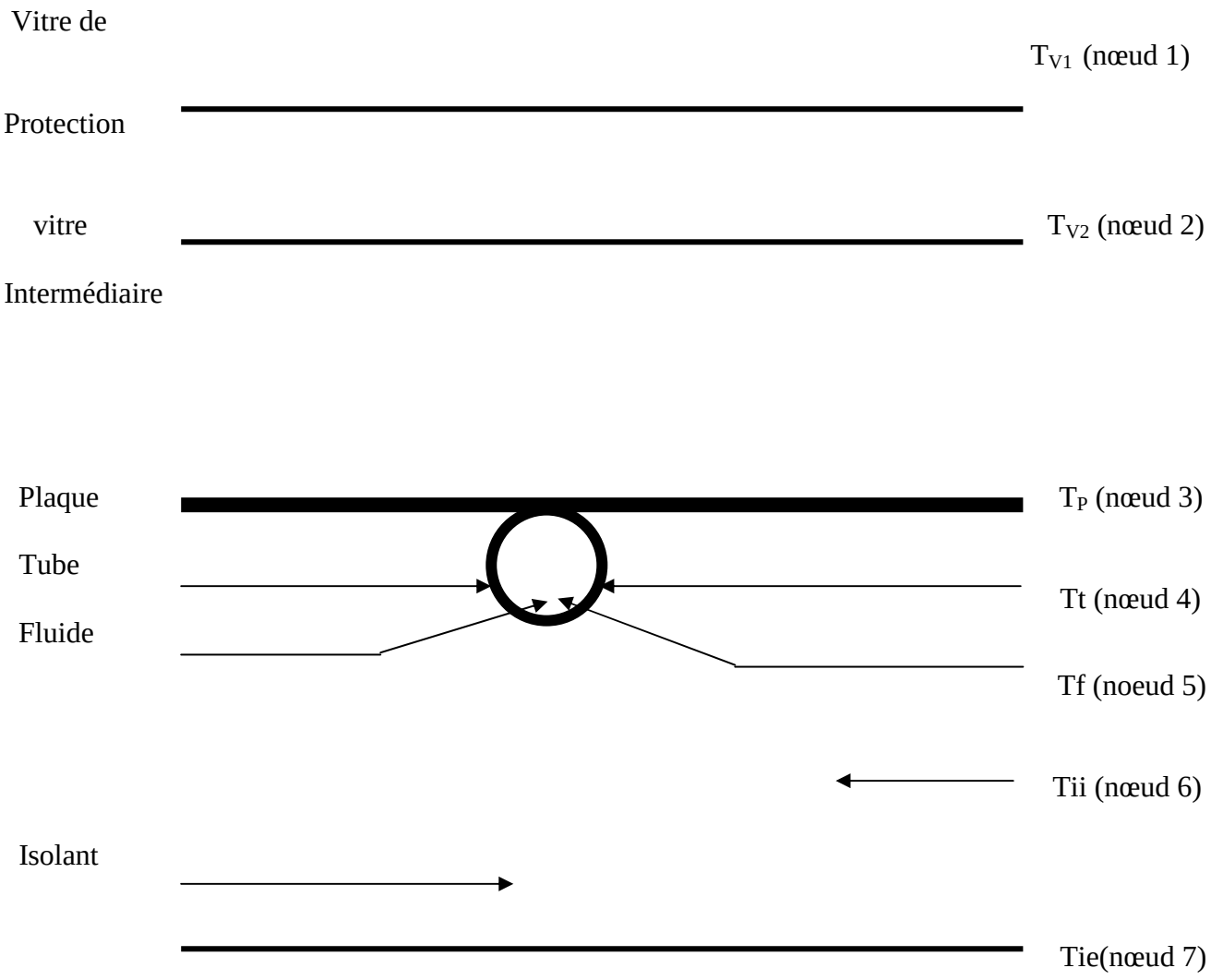



**Figure ( IV-1): Schéma différents nœud considérés dans la maille d'un capteur à double vitrage**

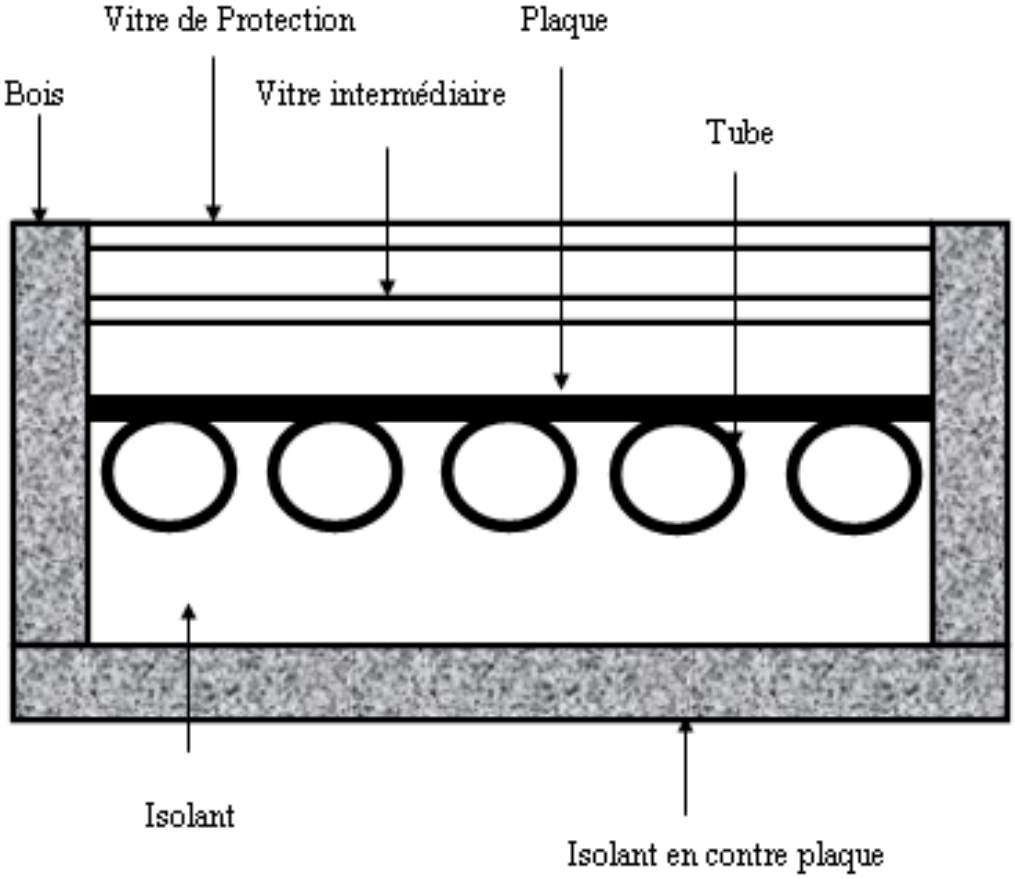
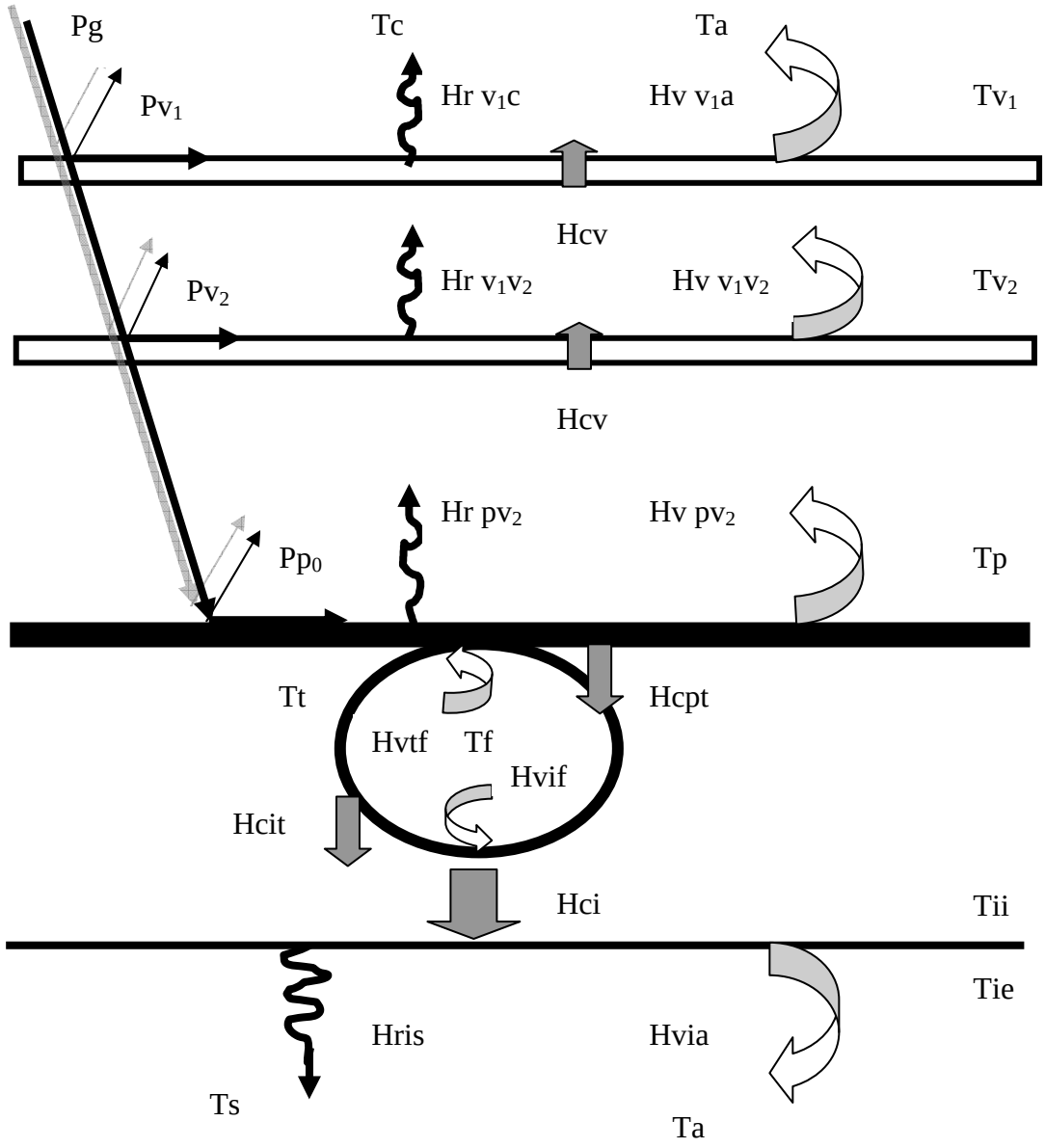
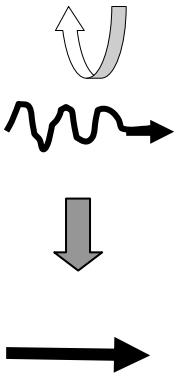



**Figure ( IV-2) : Coupe verticale d'un capteur à double vitrage**




**Légende :**



Transfert de chaleur par convection

Transfert de chaleur par rayonnement

Transfert de chaleur par conduction

Puissance absorbée par les vitres et l'absorbeur

**Figure ( IV-3) : Schéma des différent échanges thermique au niveau d'une maille d'un capteur à double vitrage**

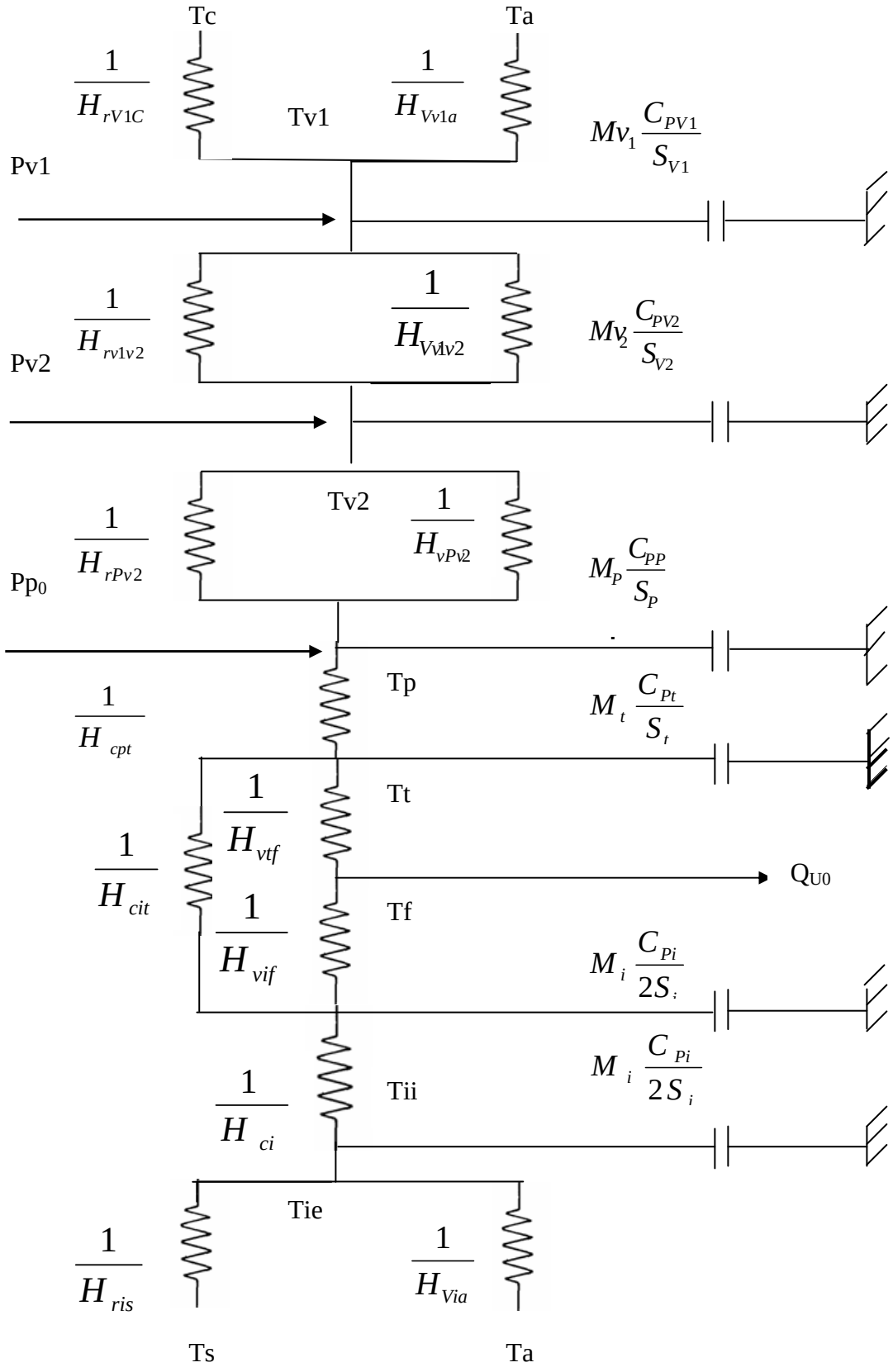



**Figure ( IV-4):Schéma électrique équivalant d'un capteur à double vitrage**

## IV-6 Mise en équation des système :

Selon le schéma électrique montré dans la **figure (IV-4)** ,en appliquant la loi d'Ohm au nœud de la maille,nous allons avoir les équations suivantes :

**Nœud 1** ( la vitre de protection ) :

$$\frac{M_{v1}C_{pv1}}{S_{v1}}\left(\frac{dT_{v1}}{dt}\right)=\left(P_{v1}+H_{rv1c}\left(T_c-T_{v1}\right)+H_{Vv1a}\left(T_a-T_{v1}\right)+\left(H_{Vv1v2}+H_{rv1v2}\right)\left(T_{v2}-T_{v1}\right)\right)$$

**Nœud 2** ( la vitre intermédiaire ):

$$\frac{M_{v2}C_{Pv2}}{S_{v2}}\left(\frac{dT_{v2}}{dt}\right)=\left(P_{v2}+\left(H_{Vv1v2}+H_{rv1v2}\right)\left(T_{v1}-T_{v2}\right)+\left(H_{VPv2}+H_{rPv2}\right)\left(T_P-T_{v2}\right)\right)$$

**Nœud 3** ( l'absorbeur ):

$$\frac{M_P C_{P_P}}{S_P}\left(\frac{dT_P}{dt}\right)=\left(P_P+\left(H_{VPv2}+H_{rPv2}\right)\left(T_{v2}-T_P\right)+\frac{S_{Pt}}{S_P}H_{CPt}\left(T_t-T_P\right)\right)$$

**Nœud 4** ( le tube ):

$$\frac{M_t C_{Pt}}{S_t}\left(\frac{dT_t}{dt}\right)=\left(\frac{S_{Pt}}{S_P}H_{CPt}\left(T_P-T_t\right)+\frac{S_f}{S_t}H_{Vtf}\left(T_f-T_t\right)+\frac{S_i}{S_t}H_{Cit}\left(Tii-T_t\right)\right)$$

**Nœud 5** ( le fluide caloporteur ):

$$\frac{qC_{pf}}{S_f}\left(T_f-T^*_f\right)=\left(\frac{S_f}{S_t}H_{Vtf}\left(T_t-T_f\right)+\frac{S_{if}}{S_i}H_{Vif}\left(T_{ii}-T_f\right)\right)$$

**Nœud 6** ( l'isolant de la face intérieure ):

$$\frac{M_i C_{pi}}{2S_i}\left(\frac{dT_{ii}}{dt}\right)=\left(\frac{S_{if}}{S_i}H_{vif}\left(T_f-T_{ii}\right)+\frac{S_i}{S_t}H_{cit}\left(T_t-T_{ii}\right)+H_{Ci}\left(T_{ie}-T_{ii}\right)\right)$$

**Nœud 7** ( l'isolant de la face extérieure ):

$$\frac{M_i C_{Pi}}{2 S_i}\left(\frac{dT_{ie}}{dt}\right) = \left(H_{ci}\left(T_{ii} - T_{ie}\right) + H_{ris}\left(T_S - T_{ie}\right) + H_{Via}\left(T_a - T_{ie}\right)\right)$$

**$S_V = S_P = S_i$**

Où:

$S_{Pt}$ : surface de la jonction tube- plaque ( $m^2$ ) .

$S_f$ : surface de contact tube- fluide ($m^2$).

$S_t$ : surface du tube ( $m^2$).

$S_{if}$ : surface fictive d'écoulement d'eau sur l'isolant ($m^2$ ).

$S_{Pt} = N ( \pi / 4 ) D_e L$

$S_f = N\ 3.14\ D_i\ L$

$S_t = N\ 3.14\ D_e L$

$S_{if} = N\ D_i\ L$

$T^*_f$ : Température du fluide de la tranche précédente.

## IV-7 Discrétisations des équations :

On discrétise et ordonne par rapport aux température les équations précédentes comme suit :

**Nœud 1 :**

$$\frac{M_{v1} C_{Pv1}}{S_{v1} \times \Delta t}\left(T^t{}_{v1}(j) - T_{v1}{}^{t-\Delta t}(j)\right) = P_{v1} + H_{rv1c}\left(T_C - T^t{}_{v1}(j)\right) + H_{Vv1a}\left(T_a - T_{v1}{}^t(j)\right) + \left(H_{Vv1v2} + H_{rv1v2}\right)\left(T_{v2}{}^t(j) - T^t{}_{v1}(j)\right)$$

**Nœud 2 :**

$$\frac{M_{v2} C_{Pv2}}{S_{v2} \times \Delta t}\left(T^t{}_{v2}(j) - T^{t-\Delta t}{}_{v2}(j)\right) = P_{v2} + \left(H_{Vv1v2} + H_{rv1v2}\right)\left(T^t{}_{v1}(j) - T^t{}_{v2}(j)\right) + \left(H_{VPv2} + H_{rpv2}\right)\left(T^t{}_p(j) - T^t{}_{v2}(j)\right)$$

**Nœud 3 :**

$$\frac{M_p C_{P_P}}{S_P \times \Delta t}\left(T_p^{\,t}(j) - T^{t-\Delta t}{}_p(j)\right) = P_P + \left(H_{VPv2} + H_{rpv2}\right)\left(T^t{}_{v2}(j) - T^t{}_p(j)\right) + \frac{S_{Pt}}{S_P} H_{CPt}\left(T^t{}_t(j) - T^t{}_p(j)\right)$$

**Nœud 4 :**

$$\frac{M_t C_{P_t}}{S_t \times \Delta t}\left(T^t{}_t(j) - T_t^{\,t-\Delta t}(j)\right) = \frac{S_{Pt}}{S_P} H_{CPt}\left(T^t{}_P(j) - T^t{}_t(j)\right) + \frac{S_f}{S_t} H_{Vtf}\left(T^t{}_f(j) - T^t{}_t(j)\right) + \frac{S_i}{S_t} H_{Cit}\left(T^t{}_i(j) - T^t{}_t(j)\right)$$

**Nœud 5 :**

$$\frac{qC_{Pf}}{S_f \times \Delta t}\left(T^t{}_f(j) - T^t{}_f(j-1)\right) = \frac{S_f}{S_t} H_{Vtf}\left(T^t{}_t(j) - T^t{}_f(j)\right) + \frac{S_{if}}{S_i} H_{Vif}\left(T^t{}_{ii}(j) - T^t{}_f(j)\right)$$

**Nœud 6 :**

$$\frac{M_i C_{Pi}}{2S_i \Delta t}\left(T^t{}_{ii}(j) - T_{ii}^{\,t-\Delta t}(j)\right) = \frac{S_{if}}{S_i} H_{Vif}\left(T^t{}_f(j) - T^t{}_{ii}(j)\right) + \frac{S_i}{S_t} H_{Cit}\left(T^t{}_t(j) - T^t{}_{ii}(j)\right) + H_{Ci}\left(T^t{}_{ie}(j) - T^t{}_{ii}(j)\right)$$

**Nœud 7:**

$$\frac{M_i C_{Pi}}{2S_i \Delta t}\left(T^t{}_{ie}(j) - T_{ie}^{\,t-\Delta t}(j)\right) = H_{Ci}\left(T^t{}_{ii}(j) - T^t{}_{ie}(j)\right) + H_{ris}\left(T_S - T^t{}_{ie}(j)\right) + H_{Via}\left(T_a - T^t{}_{ie}(j)\right)$$

Après développement, il en résulte ce qui suit :

**<u>Nœud 1</u> :**

$$\left[\frac{M_{v1}C_{p_{v1}}}{S_{V1}\Delta t}+H_{rv1c}+H_{Vv1a}+H_{Vv1v2}+H_{rv1v2}\right].T_{v1}^{\ t}(j)-\left(H_{Vv1v2}+H_{rv1v2}\right).T_{v2}^{\ t}(j)=$$

$$\frac{M_{v1}C_{pv1}}{S_{v1}\Delta t}T_{v1}^{\ t-\Delta t}(j)+H_{rv1c}T_c+H_{Vv1a}T_a+P_{v1}$$

**<u>Nœud 2</u> :**

$$\left[\frac{M_{v2}C_{p_{v2}}}{S_{V2}\Delta t}+H_{Vv1v2}+H_{rv1v2}+H_{Vpv2}+H_{rpv2}\right].T_{v2}^{\ t}(j)-\left(H_{Vv1v2}+H_{rv1v2}\right).T_{v1}^{\ t}(j)-$$

$$\left(H_{Vpv2}+H_{rpv2}\right).T_p^{\ t}(j)=\frac{M_{v2}C_{pv2}}{S_{v2}\Delta t}T_{v2}^{\ t-\Delta t}(j)+P_{v1}$$

**<u>Nœud 3</u> :**

$$\left[\frac{M_pC_{p_p}}{S_p\Delta t}+H_{Vpv2}+H_{rpv2}+\frac{S_{pt}}{S_p}H_{cpt}\right].T_p^{\ t}(j)-\left(H_{Vpv2}+H_{rpv2}\right).T_{v2}^{\ t}(j)-$$

$$\frac{S_{pt}}{S_p}H_{cpt}T_t^{\ t}(j)=\frac{M_pC_{pp}}{S_p\Delta t}T_p^{\ t-\Delta t}(j)+P_p$$

**<u>Nœud 4</u> :**

$$\left[\frac{M_tC_{p_t}}{S_t\Delta t}+\frac{S_{pt}}{S_p}H_{cpt}+\frac{S_f}{S_t}H_{Vtf}+\frac{S_i}{S_t}H_{cit}\right].T_t^{\ t}(j)-\frac{S_{pt}}{S_p}H_{cpt}.T_p^{\ t}(j)-$$

$$\frac{S_f}{S_t}H_{Vtf}T_f^{\ t}(j)-\frac{S_i}{S_t}H_{cit}T_i^{\ t}(j)=\frac{M_tC_{pt}}{S_t\Delta t}T_t^{\ t-\Delta t}(j)$$

**<u>Nœud 5</u> :**

$$\left[\frac{qC_{pf}}{S_f\Delta t}+\frac{S_f}{S_t}H_{Vtf}+\frac{S_{if}}{S_i}H_{vif}\right].T_f^{\,t}(j)-\frac{S_f}{S_t}H_{Vtf}.T_t^{\,t}(j)-\frac{S_{if}}{S_i}H_{Vif}T_{ii}^{\,t}(j)=$$

$$\frac{qC_{pf}}{S_f}T_f^{\,t-\Delta t}(j-1)$$

**<u>Nœud 6</u> :**

$$\left[\frac{M_iC_{pi}}{2S_i\Delta t}+\frac{S_{if}}{S_i}H_{vif}+\frac{S_i}{S_t}H_{cit}+H_{ci}\right].T_{ii}^{\,t}(j)-\frac{S_{if}}{S_i}H_{Vif}T_f^{\,t}(j)-\frac{S_i}{S_t}H_{cit}T_t^{\,t}(j)$$

$$-H_{ci}T_{ie}^{\,t}(j)=\frac{M_iC_{pi}}{2S_i\Delta t}T_{ii}^{\,t-\Delta t}(j)$$

**<u>Nœud 7</u> :**

$$\left[\frac{M_iC_{pi}}{2S_i\Delta t}+H_{ci}+H_{ris}+H_{Via}\right].T_{ie}^{\,t}(j)-H_{ci}T_{ii}^{\,t}(j)=\frac{M_iC_{pi}}{2S_i\Delta t}T_{ie}^{\,t-\Delta t}(j)+H_{ris}T_S+$$

$$H_{Via}T_a$$

C'est un système de sept équation à sept inconnues . Donc nous déduisons la matrice A( 7,7 ) et le vecteur B(7).

Mat A(7,7) x Mat T(7,7) = Mat B(7,7)

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} & a_{77} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{v1}^{t}(j) \\ T_{v2}^{t}(j) \\ T_{P}^{t}(j) \\ T_{t}^{t}(j) \\ T_{f}^{t}(j) \\ T_{ii}^{t}(j) \\ T_{ie}^{t}(j) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \end{pmatrix}$$

Tel que :

$$a_{11} = \frac{M_{v1} C_{Pv1}}{S_{v1} \Delta t} + H_{rv1C} + H_{Vv1a} + H_{Vv1v2} + H_{rv1v2}$$

$$a_{12} = -\left(H_{Vv1v2} + H_{rv1v2}\right)$$

$$a_{13} = 0, a_{14} = 0, a_{15} = 0, a_{16} = 0, a_{17} = 0$$

$$a_{21} = a_{12}$$

$$a_{22} = \frac{M_{v2} C_{Pv2}}{S_{v2} \Delta t} + H_{Vv1v2} + H_{rv1v2} + H_{Vpv2} + H_{rPv2}$$

$$a_{23} = -\left(H_{Vpv2} + H_{rPv2}\right)$$

$$a_{24} = 0, a_{25} = 0, a_{26} = 0, a_{27} = 0, a_{31} = 0$$

$$a_{32} = a_{23}$$

$$a_{33} = \frac{M_p C_{P_P}}{S_P \Delta t} + H_{VPv2} + H_{rPv2} + \frac{S_{Pt}}{S_P} H_{CPt}$$

$$a_{34} = -\frac{S_{Pt}}{S_P} H_{cpt}$$

$$a_{34} = 0, a_{35} = 0, a_{36} = 0, a_{37} = 0, a_{41} = 0, a_{42} = 0$$

$$a_{43} = a_{34}$$

$$a_{44} = \frac{M_t C_{pt}}{S_t \Delta t} + \frac{S_{pt}}{S_P} H_{CPt} + \frac{S_f}{S_t} H_{Vtf} + \frac{S_i}{S_t} H_{cit}$$

$$a_{45} = -\frac{S_f}{S_t} H_{Vtf}$$

$$a_{46} = -\frac{S_i}{S_t} H_{Cit}$$

$$a_{47} = 0, a_{51} = 0, a_{52} = 0, a_{53} = 0$$

$$a_{54} = a_{45}$$

$$a_{55} = \frac{qC_{Pf}}{S_f} + \frac{S_f}{S_t} H_{Vtf} + \frac{S_{if}}{S_i} H_{Vif}$$

$$a_{56} = -\frac{S_{if}}{S_i} H_{Vif}$$

$$a_{57} = 0, a_{61} = 0, a_{62} = 0, a_{63} = 0$$

$$a_{64} = a_{46}$$

$$a_{65} = a_{56}$$

$$a_{66} = \frac{M_i C_{Pi}}{2 S_i \Delta t} + \frac{S_{if}}{S_i} H_{Vif} + H_{ci} + \frac{S_i}{S_t} H_{cit}$$

$$a_{67} = -H_{ci}$$

$$a_{71} = 0, a_{72} = 0, a_{73} = 0, a_{74} = 0, a_{75} = 0$$

$$a_{76} = a_{67}$$

$$a_{77} = \frac{M_i C_{Pi}}{2 S_i \Delta t} + H_{Ci} + H_{ris} + H_{Via}$$

$$b_1 = \frac{M_{v1} C_{Pv1}}{S_{v1} \Delta t} T^0{}_{v1} + H_{rv1C} T_C + H_{Vv1a} T_a + P_{v1}$$

$$b_2 = \frac{M_{v2} C_{Pv2}}{S_{v2} \Delta t} T^0{}_{v2} + P_{v2}$$

$$b_3 = \frac{M_p C_{P_P}}{S_P \Delta t} T^0{}_P + P_{P0}$$

$$b_4 = \frac{M_t C_{Pt}}{S_t \Delta t} T^0{}_t$$

$$b_5 = q \frac{C_{Pf}}{S_f} T_f (j-1)$$

$$b_6 = \frac{M_i C_{Pi}}{2 S_i \Delta t} T^0{}_{ii}$$

$$b_7 = \frac{M_i C_{Pi}}{2 S_i \Delta t} T^0{}_{ie} + H_{ris} T_S + H_{Via} T_a$$

Les inconnues sont :

$T_{v1}$ , $T_{v2}$ , $T_P$ , $T_t$ , $T_f$ , $T_{ii}$ et $T_{ie}$ qui sont respectivement les températures de :

- la vitre de protection.
- la vitre intermédiaire.
- la plaque.
- le tube.
- le fluide.
- la face interne de l'isolant et la face externe de l'isolant.

## IV-8 Résolution du système d'équation

La résolution du système est effectuée par la méthode itérative de Gauss- Seidel ( voir Annexe ) nous supposons connues, les températures des différents nœuds à l'état initial, et avec l'algorithme de calcul ( voir organigramme ), nous évaluons les différents coefficient de transfert thermique,Ainsi pour chaque pas de temps et pour chaque maille, nous obtenons un système d'équations, dont sa résolution permet de calculer nos inconnues.

### IV-8-1 Principe de simulation

Après avoir établi notre modèle mathématique, en fixant dans les équations les paramètres définissant les conditions de fonctionnement du système, qui est en général au sens mathématique, du forme incomplète. Il comporte plus d'inconnus que d'équations, pour cette raison et lors de la simulation , ce sont les conditions de fonctionnement qui fixent la valeur des paramètres en surnombre,telle que; les conditions météorologiques,et les caractéristique du système (dimensions, propriétés de matériaux ),donc, la simulation étudie en général le comportement du modèle dans les conditions données .

## IV-8-2 Programme Principal de Calcul

Le programme principal consiste en :

* On calcule le coefficient d'échange thermique par conduction entre :

- la plaque et le tube h c p t ( III – 39 ).
- le tube et l'isolant h c i t (III – 39 ) .

* On calcule le coefficient d'échange thermique par convection entre :

- le vitre de protection et l'ambiance h v $v_1$ a (III – 48 ) .

* On a choisi un pas de temps d'une heures .

A chaque heures de la journée on calcule :

* la température ambiante et la température du ciel ( voir annexe C , III - 41) .
* le rayonnement solaire globale :
  - l'angle horaire ( I – 4 ).
  - hauteur angulaire du soleil ( I – 2 ).
  - angle d'incidence ( III – 3 ).
  - le flux direct ( III – 1 ).
  - le flux diffus ( III – 11 ).
  - le flux solaire reçu par la surfaces du capteur (III – 12 ) .
* la puissances absorbée par la vitre et l'absorbeur :
  - l'angle réfraction ( rayonnement direct et diffus ) (III – 14 ).
  - le pouvoir réflecteur du verre ( rayonnement direct et diffus ) (III – 13 ).
  - les coefficient d'absorption de transmission et de réflexion du au rayonnement direct et diffus ( III – 19 – 20 – 21 – 22 ).
  - puissances absorbée par la vitre de protection ( III – 28 ).
  - puissances absorbée par la vitre intermédiaire ( III – 29 ).
  - puissances absorbée par le corps noir ( III – 35 – voir annexe B ).
* initiation des température .

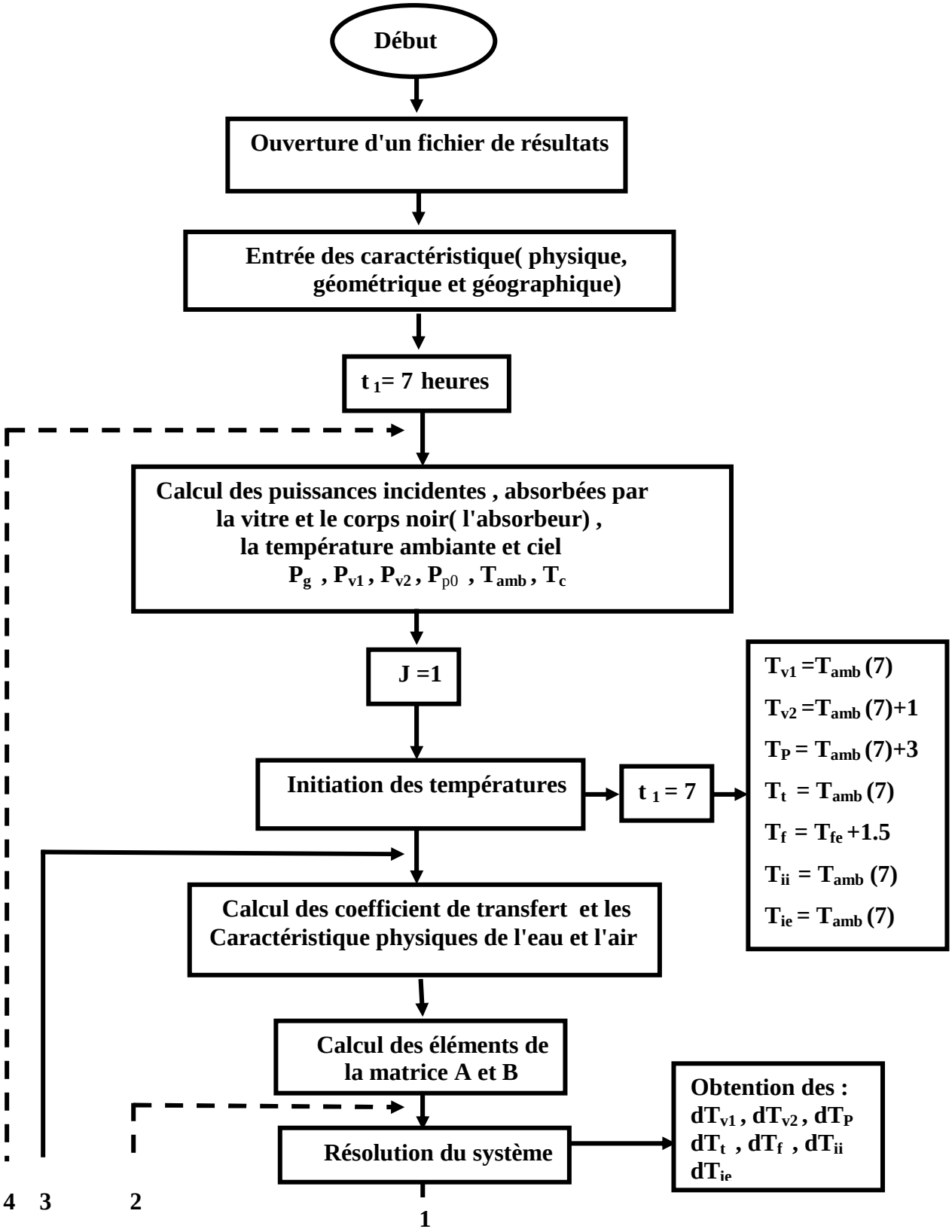
A chaque heures et pour chaque tranche on calcule :

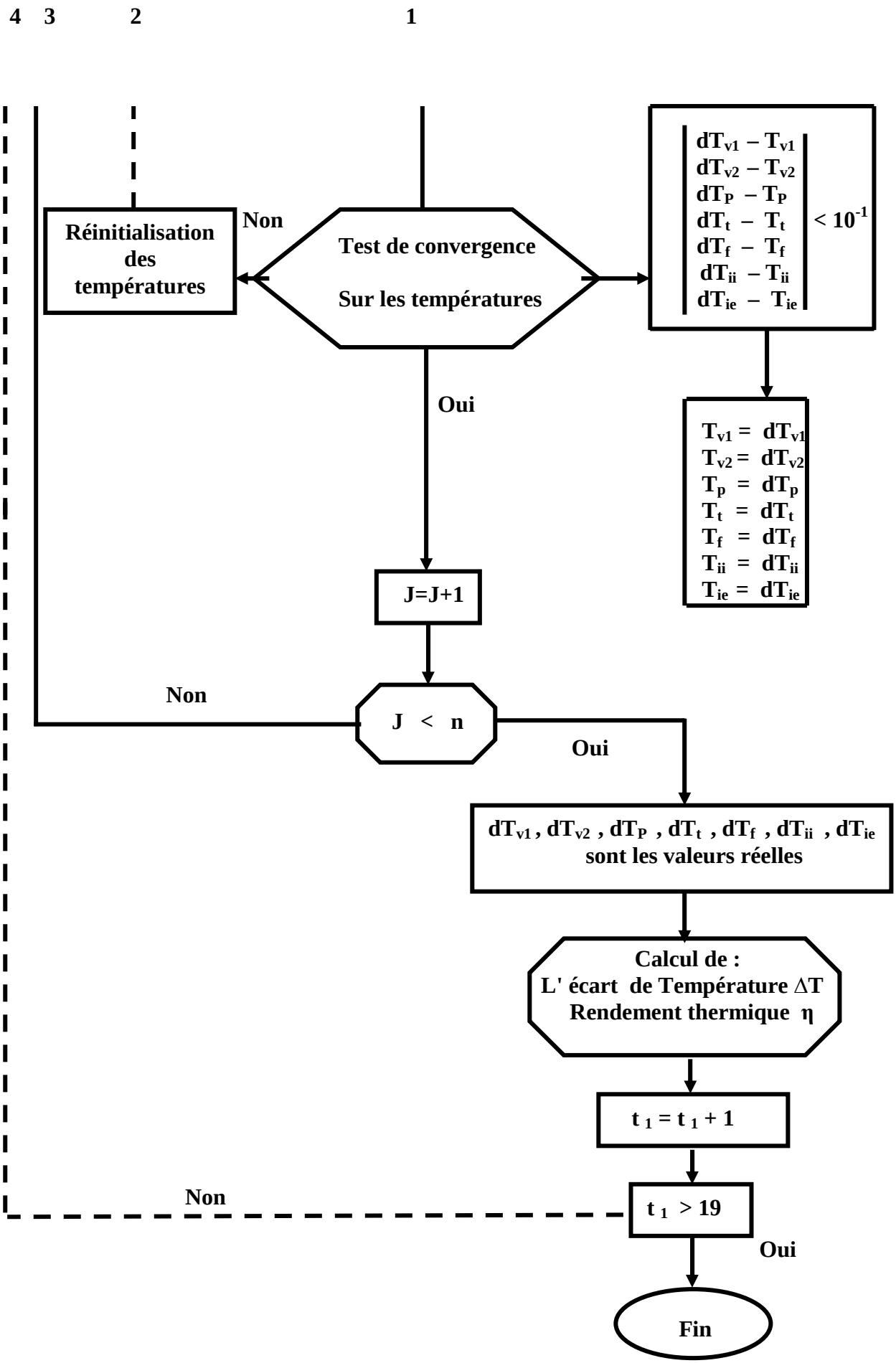
* Le coefficient d'échange thermique par convection entre :
  - la vitre de protection et la vitre intermédiaire h v $v_1$ $v_2$ ( les caractéristique thermophysique de l'air ) (voir annexe F 2).
  - la vitre intermédiaire et la plaque h v p $v_2$ ( les caractéristique thermophysique de l'air ).
  - le fluide et la tube h v f t ( les caractéristique de l'eau ) (voir annexe F1).

* le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre :
  - la vitre de protection et la vitre intermédiaire h r $v_1$ $v_2$ ( III – 45 ).
  - la vitre de protection et le ciel h r $v_1$ c ( III – 42 ).
  - la vitre intermédiaire et la plaque h r p $v_2$ ( III – 46).
  - l'isolant et le sol h r i s ( III – 43 ).
* les élément de matrice A et B .
* l'exécution de l'algorithme de Gauss-Seidel .
  - obtention des différentes température
  - calcul de l'écart de température " ΔT " entre l'absorbeur et la vitre intermédiaire ( dans le calcul de simulation on considère une valeur moyenne arithmétique de la température )
* les coefficient global des pertes . ( III – 83 – 78 – 77 – 75 ).
* le rendement de l'ailette ( III – 72 – 73 )
* l 'efficacité " f c " du transfert ( III – 71 ).
* l 'efficacité globale " $Fr_0$ " de l'échanges thermique du capture ( III – 69 ).
* la puissance utile récupérée par le fluides ( III – 68 ).
* le rendement optique ( III – 86 ).
* le rendement thermique ( III – 85 ).

Tout cela est représenté dans l'organigramme qui suit. Le programme principal a été développé en langage FORTRAN , version 5.0, developer studio, pour le calcul numérique du capteur solaire à double vitrage.

## IV-9 Organigramme développé pour le calcul numérique des paramètres inconnue




4 3 2 1
Réinitialisation des températures
Non
Test de convergence
Sur les températures
dTv1 – Tv1
dTv2 – Tv2
dTP – TP
dTt – Tt
dTf – Tf
dTii – Tii
dTie – Tie
< 10-1
Oui
Tv1 = dTv1
Tv2 = dTv2
Tp = dTp
Tt = dTt
Tf = dTf
Tii = dTii
Tie = dTie
J=J+1
Non
J < n
Oui
dTv1 , dTv2 , dTP , dTt , dTf , dTii , dTie
sont les valeurs réelles
Calcul de :
L' écart de Température ΔT
Rendement thermique η
t 1 = t 1 + 1
Non
t 1 > 19
Oui
Fin

## V- Interprétation et discussion de résultats :

Dans cette étude, nous avons utilisé un programme de simulation numérique développé en langage FORTRAN,en prenant comme exemple une région d'étude considérée " El Oued ", ainsi des résultats, à travers les différents tests, ont été obtenus à partir des données météorologique propres à cette région **[ 24 ,27 ]** :

Altitude = 63 m

Latitude = $33^0\ 30'$

Longitude = $06^0\ 47'$

Albédo = 0.35

Les différents résultats sont représentés graphiquement, où les paramètre météorologique et la conception ont été pris correspond à la journée du 15 juillet ( jour de calcul pour la comparaison).

Listes des Symboles :

- Angle d'inclinaison ( $\beta$ ).
- Epaisseur de la vitre ( ev ).
- Epaisseur de l'absorbeur ( ep ) .
- Espace entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire ( $epv_1v_2$ ).
- Espace entre la vitre intermédiaire et l'absorbeur ( $epv_2$) .
- Coefficient d'extinction du verre ( k ) .
- La vitesse de vent ( $V_W$ ).
- L'émissivité de la vitre ( $\varepsilon_v$ ) .
- L'émissivité de l'absorbeur ( $\varepsilon_P$ ) .
- Température d'entrée de fluide caloporteur ( eau ) ( Tfe ).

**Remarque** :

- En utilisant le logiciel " Origine 6.0 ", nous avons tracé les courbes, d'où nous avons introduit les valeurs obtenues par la simulation, et à partir de ces résultats et en utilisant la méthode des moindres carrées, qui nous avons obtenu une régression polynomiale avec une bonne précision P ( faible erreurs ) et un bon coefficient de détermination $R^2$ (vois les différentes figures) .

- Pour toutes les courbes, nous avons utilisé pour le calcul, les caractéristiques physiques du cuivre avec une couche sélective .

# Conclusion et Recommandation

Dans ce travail, nous avons abordé une étude de l'impact de l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre intermédiaire pour atteindre les conditions de fonctionnement du capteur solaire à double vitrage ( à eau ) .

A cet effet, nous avons mis au point un modèles numérique permettant de simuler le fonctionnement du capteur, où un programme du calcul en langage " VISUEL FORTRAN " a été utilisé. Ce modèles numérique nous a permis d'étudier les différents variations du rendement thermique instantané en fonction de certains facteurs tels que le temps , l'inclinaison du capteur, l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre intermédiaire,……etc. et de certains facteurs géographiques et météorologique propres à la région de" El Oued " durant la période d'été ( le 15 juillet qui est choisi comme le jour de calcul ) .

les cordonnés de cette région sont **[ 24 , 27 ]** :

Altitude : 63 m

Latitude : $33^0$ $30^{'}$

Longitude : $06^0$ 47

Albédo : 0.35

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- un minimum d'espace de 10mm entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire à été choisi, ceci nous permet de diminuer les pertes au maximum .
- Plus en augment l'espace entre la vitre intermédiaire et l'absorbeur plus l'écart de température diminue,alors on choisi un minimum d'espace 30mm, qui nous permet de diminuer les pertes au maximum.
- L'espace entre la vitre intermédiaire et l'absorbeur joue un rôle dans l'échauffement des corps noirs.

Cet espace contient des couches d'air stables qui se comportent comme un isolant aux pertes de chaleur .

- une augmentation du nombre de vitre à pour conséquence une diminution du coefficient de transmission et une augmentation du coefficient de réflexion, on notre aussi que cette augmentation à un autre effet négatif secondaire sur le rendement à travers l'augmentation de l' inertie thermique du capteur.
- La diminution de la vitesse de vent augmente le rendement thermique instantané .
- Plus on redresse le capteur vers l'horizontal plus favorise son fonctionnement en été.

- L'augmentation du coefficient d'extinction" k " conduit à une diminution du rendement thermique instantané.
- Le cuivre, ayan une épaisseur optimal 1mm est le matériau choisi comme absorbeur, ceci pour donne un meilleur rendement .
- A un écart de température élevé, il y a une augmentation des pertes de chaleur et une diminution de rendement thermique .
- une valeur maximum de rendement thermique instantané est obtenue devant la période où l'écart de température est presque constant étant au minimum ( les pertes de chaleur sont au minimum ).

Finalement, à travers les résultats obtenus, nous recommandons :

- des études expérimentales sur l'impact de l'écart de température entre la vitre intermédiaire et l'absorbeur pour valider nos résultats issus de la simulation .
- une étude détaillée sur la qualité du verre comme matériau, afin d'améliorés le rendement du capteur à travers la diminution du coefficient d'extinction au minimum pour obtenir une faible valeur de réflexion et une forte valeur de transmission du verre.

On peut donc diminuer le facteur de réflexion en utilisant les solutions suivantes :

* On applique des revêtement anti-réflexions sous forme de couches minces multiples sur la surface de la vitre ( cellules anti-pertes….).

* La deuxième solution consiste en une micro attaque chimique ( traitement chimique ) de la surface vitrée.

- un autre élément,qui augmente considérablement le rendement thermique du capteur, est la couche sélective de l’absorbeur. Elle augmente la captation de l’énergie solaire comparée à une couche noire non sélective. la couche sélective à base de chrome noir développée par énergie solaire absorbe de façon optimum l’énergie solaire tout en limitant considérablement les pertes par rayonnement .

**[1] Anne Labouet et Michel villoz ,** Energie solaire photovoltaïque ,Dunod , Paris (france) 2003

**[2] Pierre Henri Communay ,** Héliothermique, le gisement solaire méthodes et calculs, France 2002.

**[3] Yves Jannot,** Thermique solaire octobre 2003.

**[4] A.A.Sfeir et G Guarracio,** Ingénierie des système solaire, application à l'habitat, technique et documentation

**[5] Michel Dagunet,** les séchoirs solaires, théorique et pratique, UNESCO, Paris ( France ) 1985

**[6] D.K Edwards,** Capteur solaire, SCM, Paris ( Frances), 1979

**[7] Rachid Bennacer,** Thèse de doctorat , Université de sergy-Pontoise ( Ecole doctoral sciences et Ingénieur ) 28 Août 2003.

**[8] N.Kadem et F . K Benabdelaziz,** Etude du rendement optique du capteur d'un chauffe eau solaire, Sire 5 , Bechar, novembre 2000.

**[9] Medjdoub Amine khodja ,** Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire , thèse de magister en génie climatique, U de Constantine 2004.

**[10] Benamrane Karima ,** Utilisation des capteurs solaire sous vides pour le fonctionnement du système de climatisation, thèse de magister en physique énergétique ,U de Ouargla 17/ 06 / 2004.

**[11] Djaghel Rachida,** Modélisation thermique d'une serre agricole,thèse de magister en physique énergétique ,U de Ouargla 28/ 09/ 2004.

**[12] Salah Laouar,** Etude comparative de deux types de capteurs solaires plans à eau , thèse de magister en énergétique ,U de Constantine 1994.

**[13] Nadjem Rabiha,** Rendement d'un capteur solaire à simple vitrage et à double vitrage " étude et comparaison " thèse de magister en génie climatique, U. de Constantine 2004.

**[14] Ghellab Amel ,** Choix et optimisation des paramètres de fonctionnement d'un capteur solaire utilise Pour la climatisation,thèse de magister en génie climatique,U.de Constantine 2002.

**[15] B.P.Axell, -** Technical note: A simple equation for the effect of multiple reflections on the solar radiation absorbed by a collector with a double glazed cover plate ,Ren .Eng .vol .13 No 3, pp .389 - 391, 1998.

**[16] A.HACHEMI ,**Thermal heat performance enhancement by interaction between the radiation and convection in solar air heaters, Ren . Eng . vol 12 . No.4.pp.419-433.1997.

**[17] Siaka Toure ,** Caracteristic temperatures in a natural convection solar air heater, Ren . Eng 22 BP 582, Abidjan 22, 2001.

**[18] H,Bouia-D.Covalet,** Etude des performances d'un mur trombe équipe d'un vitrage actif , Conférence IBPSA France , Toulouse, 8-9 octobre 2004.

**[19] R. Bernard -G. Menguy, M. Schwartz,** Le rayonnement solaire conversion thermique et application Technique et documentation 2ième edition-1980.

**[20] Bernard Eyglunent ,** Manuel de thermique, théorique et pratique , Paris ( France ) 1997

**[21] Smakdji Nafila,** Impact de l'écart de température ( eau-capteur ) sur l'efficacité globale d'un distillateur solaire .thèse de magister en génie climatique, U. de Constantine 2002.

**[22] M . Benosman et A . Zerga** " Optimisation économique et énergétique d'une enceinte thermique à double vitrage en vue d'une amélioration des performances d'un capteur plan ENERSOLE 01- Adrar –Algérie .

**[23] Yuriy Dobransky, F . Jolanta and E . Desela ,** The numerical condition of a thermal condition of solar collector, heat transfer and renewable sources of energy, University of Warmi and Masury.

**[24] L' office National de Météorologique,** Les données climatique de El Oued de l'année de 1997 jusqu'à L'année 2006.

**[25] J,F Saccadura ,** Initiation aux transfert thermique , technique et documentation , Paris (France)1982.

**[26] H Tabord,** Selective surfaces, solar energy conversion, a.e Dixon , progamon press 1974.

**[27] M .Capderou** " Atlas solaire de l'algérie" Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme, Alger 1987, OPU 1985.

**[28] Fethi Khelfaoui,** Méthodes et Simulation Numérique,Université de Ouargla 1999 – 2000

# Référence bibliographique

**[29] N . Akhtar , S.C.Mullick ,** Computation of glass-cover temperatures and top heat loss Coefficient of flat-plate solar collectors with double glazing , Department of Mechanical Engineering, College of Technology, G. B. Pant University of Agriculture & Technology, Pantnagar 263 145, India " Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, New Delhi 110 016, India " . 13 July 2006 .

* **Discussion la variation de l'écart de température en fonction de temps**

**N . Akhtar et S.C.Mullick** confirmaient que la température du vitre intermédiaire du capteur à double vitrage augmente avec la température de l'absorbeur . cela est du essentiellement aux pertes des chaleur par convection et rayonnement .

**[30] Guohui . Gan** , Thermal transmittance of multiple glazing : computational fluid dynamics Prediction , institute of building technology, School of the built environment , University of Nottingham , Nottingham NG72RD , UK . 28 January 2001 .

** **Discussion de l'impact de l'espace entre les deux vitres**

**Gan** confirmait que la résistances thermique augmente avec l'espace entre les deux vitres jusqu'à la valeur de 25mm . lorsque cet espace dépasse 25 mm , le coefficient de transfert de chaleur par convection augments plus qu'augmentent les pertes globale par effet de la différence en température .

**G . Gan** adoptait une valeur optimale de 25 mm de façon à pouvoir garder l'échange du chaleur .

## A-1 -Le spectre énergétique du rayonnement :

L'énergie solaire utilisable en héliothermique est contenu dans le rayonnement électromagnétique du soleil qui correspond sensiblement à celui d'un corps noir à 5777 K, 98 % de l'énergie est rayonnée entre 0.25 μm et 4μm ;

- ✓ 8 % est rayonnée dans l'ultraviolet ( $\lambda < 0.4$ μm ) .
- ✓ 41 % est rayonnée dans le visible ( 0.4μm < $\lambda$ < 0.7 μm ) .
- ✓ 51 % est rayonnée dans l'infrarouge ( $\lambda > 0.7$ μm ).

Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol est composé de [21] :

* Rayonnement direct : qui est reçu du soleil sans changement de la direction .

* Rayonnement diffus : qui est reçu du soleil après que sa direction est changée dù à la réflexion et à l'éparpillement par l'atmosphère, c'est à dir le rayonnement provient de tout la voûte céleste et n'a pas d'orientation privilégiée.

## A-2- La masse d'air optique :

Lorsque" h > 20m ",on peut négliger la courbure de l'atmosphère et la masse d'air optique " m " dépond de la hauteur " h " du soleil et de l'altitude[ 21 ].

On a :

$$m = \frac{p}{1000 \times Sin\left(h\right)}$$

Où :

P : représente la pression barométrique [ en mbar ].

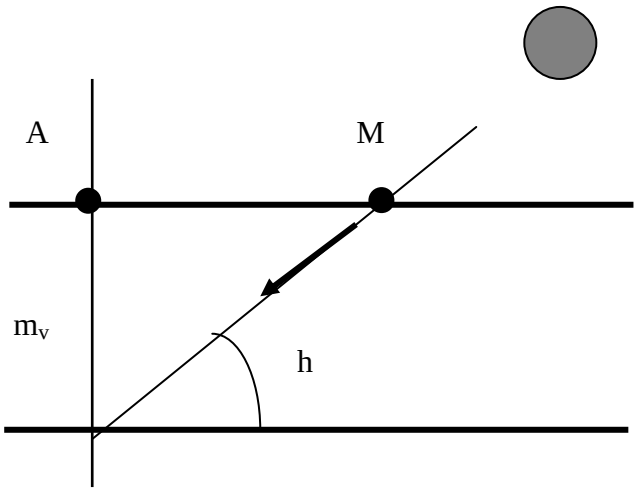


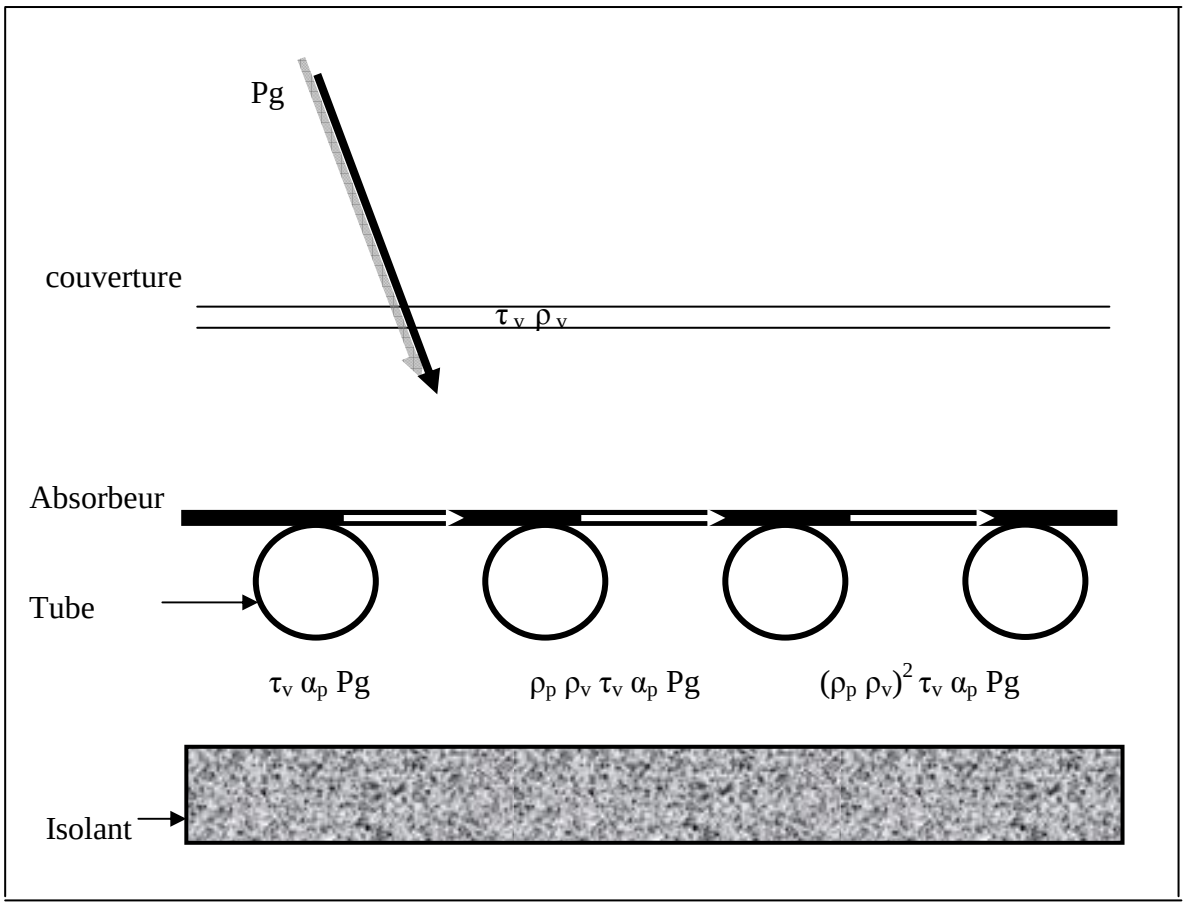

**Figure (A-2): Représentation schématique de la masse d'air optique**

## B - La puissance absorbée par les corps noir :

En faisant schéma descriptif les réflexions se produisant entre la vitre et l'absorbeur (figure B), on constate que la puissance absorbée par l'absorbeur est donnée en se basant sur l'approche mathématique suivante [ 13,15 ]:

Si $|x| < 1$ on a :

$$\sum_{j=1}^{n} 1 + x + x^2 + x^3 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots x^n \approx \frac{1}{1-x}$$




**figure( B ) : les réflexions dans un capteur à simple vitrage**

Alors:

$$P_P = P_g \ \tau_v \alpha_p \left( 1 + (\rho_v \rho_p) + (\rho_v \rho_p)^2 + \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots + (\rho_v \rho_p)^n \right)$$

$$P_p = \frac{P_g \tau_v \alpha_v}{1 - \rho_v \rho_p}$$

L'absorbeur est opaque donc :

$$P_p = \frac{P_g \tau_v \alpha_v}{1 - (1 - \alpha_p)\rho_v} \qquad (w / m^2)$$

La puissances transmise à travers le vitrage est égale à ( $P_{dir}$ . $\tau_{dir}$ + $P_{dif}$ . $\tau_{dif}$ ) . si $\alpha_p$ est le coefficient d'absorption du corps noir, ce dernier capte la fraction $\alpha_p$ de cette puissance transmise et réfléchit vers le vitrage la fraction (1- $\alpha_p$ ).Si $r_{dif}$ est la fraction réfléctibilité du vitrage, celui-ci réfléchi vers l'absorbeur la fraction ( 1- $\alpha_p$ ) . $r_{dif}$ , le corps noir absorbe donc à nouveau la fraction $\alpha_p$ ( 1- $\alpha_p$ ) . $r_{dif}$ et réfléchit vers le vitrage la fraction ( 1- $\alpha_p$ )$^2$ . $r_{dif}$ et ainsi de suite En faisant la sommation des quantités absorbées , nous obtenons la puissances $P_{p0}$ :

$$P_{p0} = \frac{(P_{dir} \times \tau_{dir} + P_{dif} \times \tau_{dif}).\alpha_p}{1 - (1 - \alpha_p) \times r_{dif}} \qquad (w / m^2)$$

## C – Calcul de la Température ambiante :

La détermination de la température ambiante se fait à l'aide d'une fonction sinusoïdale, ou' nous avons choisi d'utiliser les données de l'atlas solaire Algérien et notons aussi que la simulation n'est pas n'est pas la effectuée sur 24 heurs, on se limite à l'intervalle dans lequel le soleil arrive sur du capteur [ 9,12 et 14 ].

$$T_{amb} = \left[ \frac{T_{aMax} - T_{aMin}}{2} \right] \cdot Sin \left[ \frac{(t-8) \cdot \pi}{12} \right] + \left[ \frac{T_{aMax} + T_{aMin}}{2} \right]$$

$T_{a\,Max}$ : étant la température maximale journalière moyenne du mois considère ( $^0$C ).

$T_{a\,Min}$ : : étant la température minimale journalière moyenne du mois considère ( $^0$C ) .

t : est le temps local

## D-1- Le vent [24] :

l'existence de haute et basse pression, est l'origine du vent. Ce dernier est caractérisé par direction et par sa vitesse de la composante horizontal .les plus forts sont supérieure à 20 m / s soufflent du Nord-Est et Sud. Le plus fréquent au printemps avec une direction Nord-Est / Sud-est [ 3 ].

Les valeurs mensuelle moyennes des vitesse du vent, pour la région de El Oued calculées durant Dix années (1997/2006) représentées sur le tableau D.1 :

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vw (m/s) | 2.33 | 2.61 | 3.32 | 4.19 | 4.52 | 3.99 | 3.7 | 3.27 | 3.13 | 2.3 | 2.31 | 2.53 |

**Tableau( D-1-) : les valeurs mensuelles moyennes des vitesses du vent pour El oued**

## D-2-La Température [24] :

| Mois | $T_{moy\ max}$ ($^0$c) | $T_{moy\ min}$ ($^0$c) | $T_{moy}$ ($^0$c) |
|---|---|---|---|
| J | 16.62 | 4.92 | 10.77 |
| F | 19.31 | 6.47 | 12.82 |
| M | 24.4 | 10.76 | 17.58 |
| A | 28.52 | 14.73 | 21.62 |
| M | 33.68 | 19.64 | 26.66 |
| J | 38.66 | 24.01 | 31.33 |
| J | 41.71 | 26.96 | 34.33 |
| A | 40.71 | 26.66 | 33.68 |
| S | 35.17 | 22.67 | 28.92 |
| O | 30.42 | 17.91 | 24.16 |
| N | 22.45 | 10.87 | 16.66 |
| D | 17.39 | 6.44 | 11.91 |

**Tableau( D-2-) : Les Température de El Oued ( 1997 - 2006)**

$$T_{moy} = \frac{(T_{moy}\ \max + T_{moy}\ \min)}{2}$$

## E - Les caractéristiques physique appliquées au capteur ( S = 1 $m^2$ )

**1- la vitre**

$\rho_v$ = 2530 $kg.m^{-3}$

$C_{pv}$ = 836 $J.kg^{-1}.K^{-1}$

$\lambda_v$ =1.15 $W.m^{-1}.K^{-1}$

$\varepsilon_v$ =0.88

**2-l'isolant** (laine de verre)

$\rho_i$ = 24 $kg.m^{-3}$

$C_{pi}$ = 919 $J.kg^{-1}.K^{-1}$

$\lambda_i$=0.045 $W.m^{-1}.K^{-1}$

$\varepsilon_i$ =0.1

$ep_i$ = 3 cm

**3-Tubes:**

Diamètre extérieure ($D_e$) = 20 mm

Diamètre intérieure ($D_i$ ) = 18 mm

Distance entre les tube = 100 mm

Longueur du tube = 90 cm

Nombre de tubes = 10

**4-Boitier :**

Epaisseur = 2 cm

**5-Soudure:**

Epaisseur moyenne de la soudure =1.5 mm

Conductivité thermique de la soudure = 5 $W.m^{-1}.K^{-1}$

largeur de la soudure = 0.15 mm

Conductivité thermique du plan = 100 W / m.$^0$C .

## F -1- <u>les caractéristique physique de l'eau</u> [ 9 , 13 ] :

**1-Conductivité thermique (W / m.$^0$C)**

$\lambda(T_f) = 0.5692 + 0.1858.10^{-2}.\ T_f - 0.7499.10^{-5}\ T_f$

**2-Masse volumique ( kg / m$^3$ )**

$\rho(T_f) = 999.879395+0.04694.\ T_f - 0.66725.10^{-2}.\ T_f^2 + 0.208229.10^{-4}.\ T_f^3$

**3-Viscosité dynamique ( kg / m.s )**

$\mu(T_f) = 5.449 - 0.1067.\ T_f + 0.0007325.\ T_f^2$

**4-Viscosité cinématique ( m$^2$/ s)**

$\upsilon(T_f) = \mu / \rho$

**5-Capacité calorifique (J / kg .C)**

$C_P(T_f) = 4216.66406 - 3.1657.\ T_f + 0.0886749.\ T_f^2 - 0.10106375.10^{-2}.\ T_f^3 + 0.44490952.10^{-5}.\ T_f^4$

**6-Nombre de Prondl**

$Pr(T_f) = 12.9969168 - 0.460649.\ T_f + 0.00886749.\ T_f^2 - 0.10106375.10^{-5}.\ T_f^4 - 0.377076859.10^{-8}.\ T_f^5$

$T_f$ : Température du fluide en ( $^0$C ).

## F -2- <u>les caractéristiques thermophysique de l'air</u> [ 3 ] :

Corrélations entre 0 et 100 $^0$C :

**1-Conductivité thermique ( W/ m.$^0$C )**

$\lambda = 7.57.10^{-5}.T + 0.0242$

**2-Viscosité dynamique ( kg / m.s)**

$\mu = 10^{-5}.( 0.0046.T + 1.7176 )$

**3-Viscosité cinématique ( m$^2$/ s )**

$\upsilon = 10^{-5}.(0.0146 . T +1.834 )$

**4-Nombre de Prondl**

$Pr = -2.54.10^{-4}.T + 0.7147$

**5- coefficient de dilatation thermique ( k$^{-1}$ )**

$B = 1 / T$

**6 -Masse volumique (kg /m$^3$)**

$\rho = 353 / ( T + 273 )$

**7-Capacité calorifique (J/ kg .C )**

$C_p = 1008$

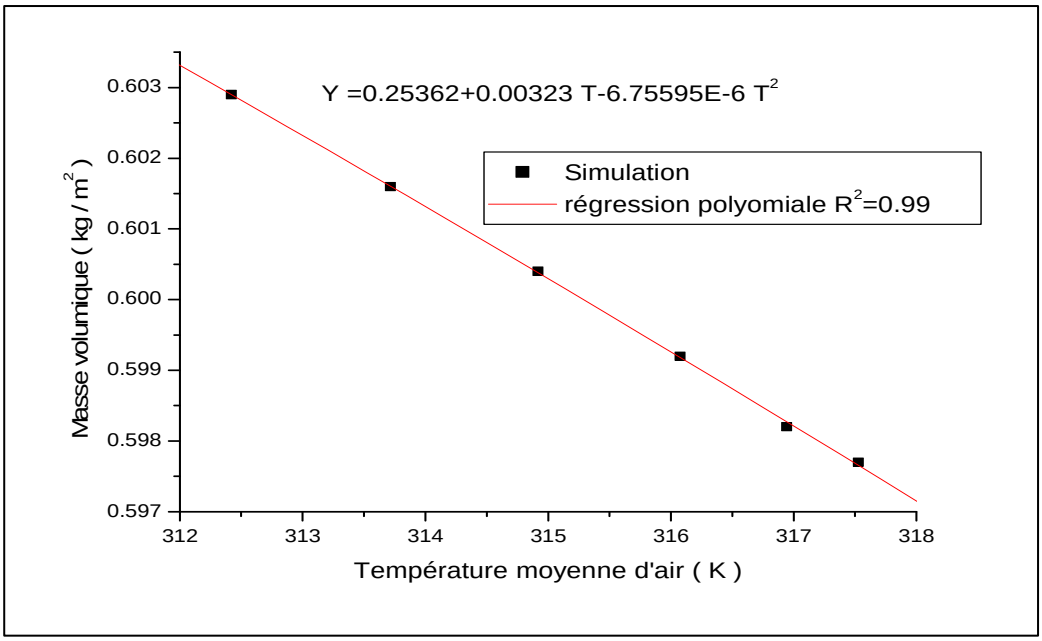



**Figure F-2 :** Impact de température ( T ) sur la masse volumique

**Tableau –G 1-propriétés de quelques matériaux utilisées dans le calcul [25] :**

| | Conductivité Thermique ($W.m^{-1}.k^{-1}$) | Coefficient d'absorption | Coefficient d'émissivité | Chaleur Massique ($J.k^{-1}.m^{-1}$) | Masse volumique ($kg.m^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Cuivre** | **389** | **0.75** | **0.04** | **38** | **8940** |
| **Aluminium** | **200** | **0.54** | **0.04** | **86** | **2700** |
| **Acier** | **46** | **0.7** | **0.1** | **49** | **7850** |

**Tableau –G 2--propriétés de quelques couches sélectives [26] :**

| Couches sélectives | Matériaux | Absorptivité | Emissivité |
|---|---|---|---|
| **Noir de Nickel** | Cuivre | **0.96** | **0.12** |
| **Noir de chrome Sur Nickel** | Cuivre,Acier, Aluminium | **0.95** | **0.07** |
| **Noir de Cuivre** | Cuivre,Nickel Aluminium | **0.88** | **0.15** |
| **Aluminium Oxyde de molébdène** | N'importe | **0.93** | **0.35** |
| **Oxyde de Fer** | Acier | **0.85** | **0.08** |

**Tableau –G 3- valeur A , B et C [ 12 ] :**

| Inclinaison B | A | B | C |
|---|---|---|---|
| $30^0$ | 0.117 | 0.33 | 0.25 |
| $45^0$ | 0.117 | 0.30 | 0.26 |
| $60^0$ | 0.262 | 0.27 | 0.27 |
| $75^0$ | 0.263 | 0.27 | 0.25 |
| $90^0$ | 0.29 | 0.25 | 0.25 |
| $105^0$ | 0.39 | 0.225 | 0.27 |
| $120^0$ | 0.538 | 0.18 | 0.25 |

## H – la transmission et la réflexion d'un système de vitrages multiples [ 13 ] :

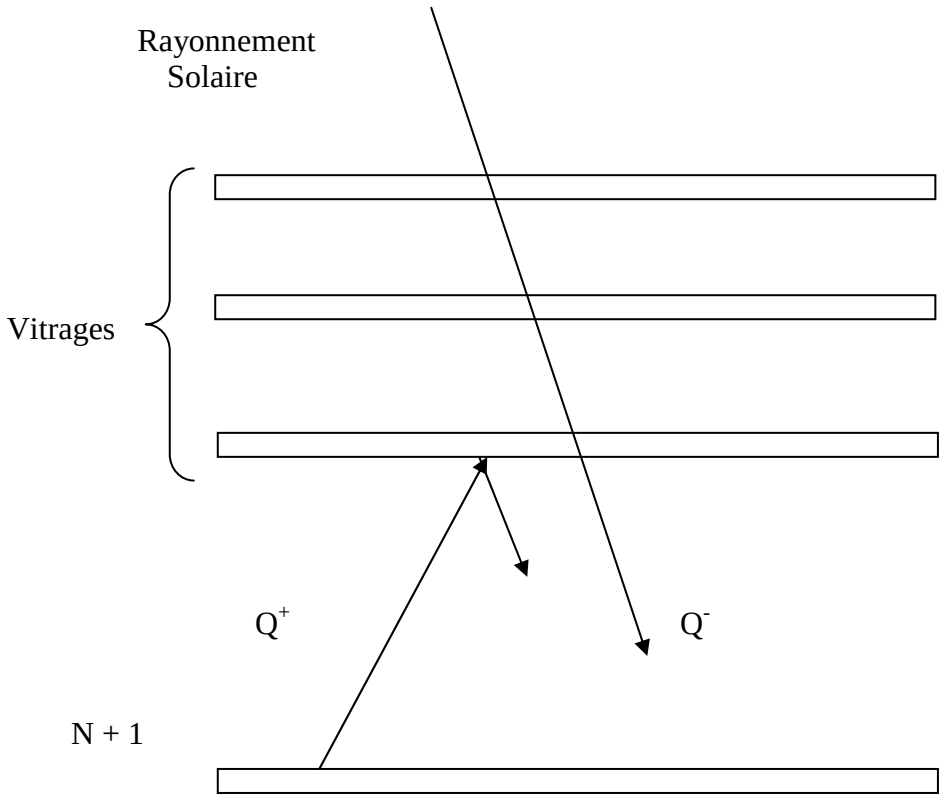



**Figure H : addition d'un vitrage supplémentaire**

L'ensemble de N vitres a une réflecteurs totale $\rho_N$ et une transmitance totale $\tau_N$ . soit un flux solaire unités incident sur l'ensemble de vitres, alors le flux émergeant $Q^-$ à la sortie est :

$$Q^- = \tau_N + Q^+ \rho_N$$

Ou' le flux réfléchi $Q^+$ est simplement

$$Q^+ = \rho Q^-$$

Ce qui donne

$$Q^- = \frac{\tau_N}{1-\rho\,\rho_N} \qquad Q^+ = \frac{\rho\tau_N}{1-\rho\rho_N}$$

Le flux transmis à travers la vitre additionnelle est $\tau Q^-$, et ce flux, puisque le flux incident est égale à l'unité, est la nouvelle transmitance du système $\tau_{N+1}$

$$\tau_{N+1} = \frac{\tau\tau_N}{1-\rho\rho_N}$$

La nouvelle réflectance du système $\rho_{N+1}$ est égale a l'ancienne $\rho_N$ plus le flux réfléchit vers le haut $Q^+ \tau_N$

$$\rho_{N+1} = \rho_N + \frac{\rho\tau^2{}_N}{1-\rho\rho_N}$$

Notant que si N tend vers l'infini et $\tau_N$ tend vers le zéro, le fait d'ajouter un vitrage supplémentaire Laisse $\rho_{N+1}$ égale à $\rho_N$

**Tableau H :** le réflexion et la transmission d'un système de vitrage

| Nombre de Vitrage | Verre commercial | | Verre hypothétique | |
|---|---|---|---|---|
| | Réflexion du Système | transmission du Système | Réflexion du Système | transmission du Système |
| 0 | 0.0000 | 1.000 | 0.0000 | 1.0000 |
| 1 | 0.0735 | 0.879 | 0.0400 | 0.950 |
| 2 | 0.1306 | 0.777 | 0.0716 | 0.904 |
| 3 | 0.1754 | 0.689 | 0.1089 | 0.861 |
| 4 | 0.2101 | 0.614 | 0.1388 | 0.822 |
| 5 | 0.2389 | 0.548 | 0.1659 | 0.785 |
| 6 | 0.2614 | 0.490 | 0.1907 | 0.751 |

# I- Résolution des système des équations linéaires par les méthodes itératives

## I-1 Introduction :

Les méthodes itératives sont généralement préférées pour les grands système linéaires (A.X= B) à matrice "A" creuse parce qu'elles ne modifient pas la matrice "A", et que dans un grand nombre d'applications "A" est creuse et présente une structure particulière ( tri diagonal, penta diagonale), ce qui lui permet de ne pas être mémorisée explicitement et d'assurer pratiquement la convergence [21] .

Pour résoudre les équation ainsi discrétisées pour obtenir leurs solutions approchées, plusieurs méthodes itérative appropriées à ce problème existent, mais notre choix est basé sur la méthodes de Gauss Seidel parce qu'elle est rapide en convergence, et présente une économie de mémoire d'autant plus important qu'il est souvent inutile de mémoriser explicitement la matrice " A"

## I-2 Méthode de Gauss Seidel

**Principe:** on résoudre le système linéaire suivant :

$$A \times T = B$$

Ou :

A: est une matrice carrée d'ordre n x n.

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

T: est le vecteur des inconnus d'ordre n .

Ecrivons "A" sous la forme suivante :

$$A = M - N$$

Ou:

$$M = D - L$$

$$N = U$$

Avec :

D : est la matrice diagonal .

L : est la matrice inférieure.

U : est la matrice supérieure .

Donc la matrice " A " s'écrit comme suit :

$$A = ( D - L ) - U$$

A partir d'un vecteur initial $T^0$ , ont peut écrire :

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

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

$$(D-L) \times T^1 = U \times T^0 + b$$

$$D \times T^1 = L \times T^1 + U \times T^0 + b$$

Ou :

$$T^1 = D^{-1} \times L \times T^1 + D^{-1} \times U \times T^0 + D^{-1} \times b$$

$$T^{K+1} = D^{-1} \times L \times T^{K+1} + D^{-1} \times U \times T^K + D^{-1} \times b$$

En développant cette récurrence vectorielle en obtient :

$$T^{(K+1)}{}_1 = ( b_1 - a_{12} \times T^{(K)}{}_2 - a_{13} \times T^{(K)}{}_3 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots - a_{1n} \times T^{(K)}{}_n) / a_{11}$$

$$T^{(K+1)}{}_2 = ( b_2 - a_{21} \times T^{(K)}{}_1 - a_{23} \times T^{(K)}{}_3 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots - a_{2n} \times T^{(K)}{}_n) / a_{22}$$

$$T^{(K+1)}{}_n = ( b_n - a_{n1} \times T^{(K)}{}_1 - a_{n2} \times T^{(K)}{}_3 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots - a_{nn} \times T^{(K)}{}_n) / a_{nn}$$

**I -3 Condition de convergence**

Pour , K = 1, jusqu'à , $K_{max}$ , ce système d'équation converge si :

$$\left| T^{(K+1)} - T^{(K)} \right| < \varepsilon$$

Ou bien :

$$\frac{\left| T^{(K+1)} - T^{(K)} \right|}{T^{(K+1)}} < \varepsilon$$

## j – Programme de calcul

```
c***********************************************************************
c    ce programme permet de calcul tout les paramètre inconnus pour
c    calcule le rendement thermique de capteur solaire à double vitrage
c***********************************************************************
      real Pdifh,Pdif,Pdir,Pv1,Pv2,Pp0,teta1,rdir,rdif,ctdir,ctdif
     &,abdir,abdif,ci,Pg,refdir,lam,vid1,vid2,Nus,j,lamair,lamair0
     &,epv1v2,nu,nu0,m,n,f,w,qu0,no,nth,k,epv2,be
c***********************************************************************
          dimension Tv1(100,50),Tv2(100,50),Tp(100,50),Tt(100,50),Tf(100,50)
     &,Tii(100,50),Tie(100,50),dTv1(100,50),dTv2(100,50),dTp(100,50)
     &,dTt(100,50),dTf(100,50),dTii(100,50),dTie(100,50)
     &,dt0(100,50),at0(100,50),dila0(100,50),vidair0(100,50)
     &,vicair0(100,50),pr0(100,50),gr0(100,50),ra0(100,50),nu0(100,50)
     &,ddt(100,50),ddt0(100,50),at(100,50),dila(100,50),vidair(100,50)
     &,vicair(100,50),dTpv2(100,50)
     &,pr(100,50),roair(100,50),lamair(100,50),gr(100,50),ra(100,50)
     &,nu(100,50),hvv1v2(100,50),hrv1v2(100,50),Qu0(100,50),no(100,50)
     &,nth(100,50),hvpv2(100,50),hrv1c(100,50),hrpv2(100,50)
     &,hris(100,50),lam(100,50),ro(100,50),vid1(100,50),vid2(100,50)
     &,cp(100,50),Pr1(100,50),Re(100,50),Gz(100,50),Nus(100,50)
     &,hvft(100,50),x(100,50),y(100,50),z(100,50),w(100,50),fc(100,50)
     &,x1(100,50),Fr0(100,50),roair0(100,50),lamair0(100,50)
     &,Tamb0(100),Tamb(100),rint(100,50),rext(100,50),rc(100,50)
     &,Uav(100,50),Ug0(100,50),m(100,50),n(100,50),f(100,50),omega(100)
     &,ci(100),ctdir(100),ctdif(100),Pdifh(100),Pdirh(100),Pdifs(100)
     &,Pdifc(100),Pdif(100),Pdir(100),Pgh(100),Pg(100),teta1(100)
     &,teta2(100),rdir(100),rdif(100),tradir(100),tradif(100),abdif(100)
     &,abdir(100),Pv1(100),Pv2(100),Tc(100),tab1(100),tab2(100)
     &,Pp0(100),sh(100),refdir(100),refdif(100),G(100),U(100)
c***********************************************************************
      open(unit=2,file='Med-Ali.dat')
c***********************************************************************
          write(*,*)'donner la valeur de epv1v2'
          read(*,*)epv1v2
          write(*,*)'donner la valeur epv2'
          read(*,*)epv2
          write(*,*)'donner la valeur de k'
          read(*,*)k
          write(*,*)'donner la valeur de ev'
          read(*,*)ev
          write(*,*)'donner la valeur de cth_p'
          read(*,*)cth_p
          write(*,*)'donner la valeur de rop'
          read(*,*)rop
          write(*,*)'donner la valeur de cpp'
          read(*,*)cpp
          write(*,*)'donner la valeur de esip'
          read(*,*)esip
```

```
c*********************************************************************
c   epv1v2 ! espace entre la vitre intermédiaire et la vitre de protection
c   epv2     ! espace entre l'absorbeur et la vitre intermédiaire
c   k          ! coefficient d'extinction du verre(1/m)
c   ev         ! épaisseur de le vitre (m)
c   cth_p   ! conductivité thermique de la l'absorbeur (w/m.k)
c   rop.     ! masse volumique de l'absorbeur(kg/m3)
c   cpp      ! chaleur massique de l'absorbeur(j/k.m)
c   esip     ! émissivité de la l'absorbeur
c*********************************************************************
          be=30.*3.14/180.   ! angle d'inclinaison du capteur (rad)
          ep=0.001              ! épaisseur de la l'absorbeur(m)
          esiv=0.88              ! émissivité de le vitre
          Tfe=309.                ! température d'entre de fluide(K)
          q=0.08                 ! débit massique(kg/s)
          Vw=3.7                 ! vitesse de vent(m/s)
c*********************************************************************
          do  t=6,21
c     Tamb    ! la température ambiante
c         Tamb0(t)=[((Tamax-Tamin)/2)*sin((t-8)*3.14/12)+(Tamax+Tamin)/2]
c      Tamax=41.71
c      Tamin=26.96
          Tamb0(t)=7.375*sin(0.261*t-2.093)+34.33                !(c0)
          Tamb(t)=Tamb0(t)+273.                              !(k)
          Tc(t)=0.0552*(Tamb(t))**1.5
c         write(2,*)'t=',t
c         write(2,*)'Tamb(t)=',Tamb(t)-273
c         write(2,*)'Tc(t)=',Tc(t)-273
          enddo
*********************************************************************
c coefficient d'échange de chaleur par conduction  entre la plaque et
c le tube hcpt
c*********************************************************************
       hcpt=cth_p/0.003
c      write(2,*)'hcpt=',hcpt
c*********************************************************************
c coefficient d'échange de chaleur par conduction  entre le tube et
c l'isolant hcit
c*********************************************************************
       hcit=20867.66
c      write(2,*)'hcit=',hcit
*********************************************************************
c coefficient d'échange de chaleur par convection entre le vitre
c de protection et l'ambiance hvv1a (en fonction de vitesse de vent)
c*********************************************************************
       hvv1a=3.86*Vw+5.67
c      write(2,*)'hvv1a=',hvv1a
c*********************************************************************
```

```
      do 200 t1=7,19
c*************************************************************************
c*************************************************************************
c   calcule le rayonnement solaire globale
c*************************************************************************
c*************************************************************************
c   omega ! l'angle horaire
          omega(t1)=((15.*t1)-191.1)*(3.14/180.)
c*************************************************************************
c   h   ! Hauteur anglaire du soleil
c         sh(t1)=sin(fi)*sin(delta)+cos(fi)*cos(delta)*cos(omega(t1))
          sh(t1)=0.236+0.706*cos(omega(t1))
c*************************************************************************
c   i     ! angle d'incidence
c         ci(t1)=cos(fi-beta)*cos(delta)*cos(omega(t1))+sin(fi-beta)*sin(delta)
          ci(t1)=0.93*cos(0.64-be)*cos(omega(t1))+0.37*sin(0.64-be)  !rad
c*************************************************************************
c   calcul du rayonnement direct et diffus
c*************************************************************************
          ctdir(t1)=0.88*exp(-0.26/sh(t1))
          ctdif(t1)=0.2710-0.2939*ctdir(t1)
          Pdifh(t1)=1312.45*sh(t1)*ctdif(t1)
          Pdirh(t1)=1312.45*ctdir(t1)
          Pdifs(t1)=0.35*((1.-cos(be))/2.)*(Pdifh(t1)*sh(t1)+Pdifh(t1))
          Pdifc(t1)=Pdifh(t1)*((1.+cos(be))/2.)
          Pdif(t1)=Pdifs(t1)+Pdifc(t1)
          Pdir(t1)=Pdirh(t1)*ci(t1)
          Pgh(t1)=Pdifh(t1)+Pdirh(t1)
c*************************************************************************
c     Pg  ! le flux solaire reçu par la surface du capteur
          Pg(t1)=Pdif(t1)+Pdir(t1)
          write(2,*)'t1=',t1
          write(2,*)'Pg(t1)=',Pg(t1)
c*************************************************************************
c*************************************************************************
c       calcul des puissance absorbée par la vitre et l'absorbeur
c*************************************************************************
c*************************************************************************
         teta1(t1)=asin((1/1.5)*sin(acos(ci(t1))))
         G(t1)=((sin(teta1(t1)-acos(ci(t1))))*(sin(teta1(t1)-acos(ci(t1))))
     &)/((sin(teta1(t1)+acos(ci(t1))))*(sin(teta1(t1)+acos(ci(t1)))))
         U(t1)=((tan(teta1(t1)-acos(ci(t1))))*(tan(teta1(t1)-acos(ci(t1))))
    &)/((tan(teta1(t1)+acos(ci(t1))))*(tan(teta1(t1)+acos(ci(t1)))))
         rdir(t1)=0.5*(G(t1)+U(t1))
         tab1(t1)=exp(-k*ev/(cos(teta1(t1))))
         tradir(t1)=((1-rdir(t1))/(1+rdir(t1)))*tab1(t1)
         refdir(t1)=rdir(t1)*(1+(tab1(t1)*tradir(t1)))
         abdir(t1)=1-refdir(t1)-tradir(t1)
c*************************************************************************
```

```
      teta2(t1)=asin((1/1.5)*sin(1.047))
      rdif(t1)=0.5*((sin(teta2(t1)-1.047)/sin(teta2(t1)+1.047))**2+
     &(tan(teta2(t1)-1.047)/tan(teta2(t1)+1.047))**2)
      tab2(t1)=exp(-k*ev/(cos(teta2(t1))))
      tradif(t1)=((1-rdif(t1))/(1+rdif(t1)))*tab2(t1)
      refdif(t1)=rdif(t1)*(1+(tab2(t1)*tradif(t1)))
      abdif(t1)=1-refdif(t1)-tradif(t1)
c***********************************************************************
c  Puissance absorbée par la vitre de protection
        Pv1(t1)=Pdir(t1)*abdir(t1)+Pdif(t1)*abdif(t1)
        write(2,*)'Pv1(t1)=',Pv1(t1)
c***********************************************************************
c  Puissance absorbée par la vitre  intermédiaire
        Pv2(t1)=tradir(t1)*Pdir(t1)*abdir(t1)+tradif(t1)*Pdif(t1)*
    &abdif(t1)
        write(2,*)'Pv2(t1)=',Pv2(t1)
c***********************************************************************
c  Puissance absorbée par le corps noir
        Pp0(t1)=0.96*((Pdir(t1)*tradir(t1))+(Pdif(t1)*tradif(t1)))/
    &(1-(0.04*rdif(t1)))
        write(2,*)'Pp0(t1)=',Pp0(t1)
c***********************************************************************
c  Initiation des températures
c***********************************************************************
        j=0
        do 100 j=j+1
        if(j.eq.1)then
        Tf(t1+1,j)=Tfe+1.5
        Tf(t1,j)=Tfe+1.5
        endif
        if(t1.eq.7)then
        Tv1(t1,j+1)=Tamb(7)
        Tv2(t1,j+1)=Tamb(7)+1.
        Tp(t1,j+1)=Tamb(7)+3.
        Tt(t1,j+1)=Tamb(7)
        Tf(t1,j+1)=Tfe+1.5
        Tii(t1,j+1)=Tamb(7)
        Tie(t1,j+1)=Tamb(7)
        endif
c***********************************************************************
c coefficient d'échange de chaleur par convection entre le vitre
c de protection et la vitre intermédiaire  hvv1v2
c***********************************************************************
        write(2,*)'Tv1(t1,j+1)=',Tv1(t1,j+1)
        write(2,*)'Tv2(t1,j+1)=',Tv2(t1,j+1)
        ddt(t1,j+1)=abs((Tv2(t1,j+1)-273.)-(Tv1(t1,j+1)-273.))
c       write(2,*)'ddt(t1,j+1)=',ddt(t1,j+1)

        at(t1,j+1)=(Tv2(t1,j+1)-273)+(Tv1(t1,j+1)-273.)/2.
c       write(2,*)'at(t1,j+1)=',at(t1,j+1)
```

```
          dila(t1,j+1)=2./((Tv2(t1,j+1)-273)+(Tv1(t1,j+1)-273))
c         write(2,*)'dila(t1,j+1)=',dila(t1,j+1)
c*************************************************************************
c     les caractéristique thermophysique de l'air
c*************************************************************************
c masse volumique (kg.m-3)
      roair(t1+1,j+1)=353./(at(t1,j+1)+273)
c    write(2,*)'roair(t1+1,j+1)=',roair(t1+1,j+1)

c conductivite thermique(w/m.c)
      lamair(t1+1,j+1)=7.57*1e-05*at(t1,j+1)+0.0242
c     write(2,*)'lamair(t1+1,j+1)=',lamair(t1+1,j+1)

c viscosite dynamique (pa.s)
      vidair(t1+1,j+1)=1e-05*(0.0046*at(t1,j+1)+1.7176)
c    write(2,*)'vidair(t1+1,j+1)=',vidair(t1+1,j+1)

c viscosite cinematique (m2/s)
      vicair(t1+1,j+1)=vidair(t1+1,j+1)/roair(t1+1,j+1)
c    write(2,*)'vicair(t1+1,j+1)=',vicair(t1+1,j+1)

c nombre de prandtl
      pr(t1+1,j+1)=-2.54*1e-04*at(t1,j+1)+0.7147
c    write(2,*)'pr(t1+1,j+1)=',pr(t1+1,j+1)

c nombre de graschoff
      gr(t1+1,j+1)=9.81*dila(t1,j+1)*ddt(t1,j+1)*(epv1v2)**3/
     &(vicair(t1+1,j+1)**2)
c     write(2,*)'gr(t1+1,j+1)=',gr(t1+1,j+1)

c nombre de reyleigh
      ra(t1+1,j+1)=pr(t1+1,j+1)*gr(t1+1,j+1)
c    write(2,*)'ra(t1+1,j+1)=',ra(t1+1,j+1)

c nombre de nusselt
      f1=1./epv1v2
        nu(t1+1,j+1)=0.117*ra(t1+1,j+1)**0.33/(f1**0.25)
c      write(2,*)'nu(t1+1,j+1)=',nu(t1+1,j+1)
*************************************************************************
      hvv1v2(t1+1,j+1)=nu(t1+1,j+1)*lamair(t1+1,j+1)/epv1v2
c     write(2,*)'hvv1v2(t1+1,j+1)=',hvv1v2(t1+1,j+1)
c*************************************************************************
c coefficient d'échange de chaleur par convection entre le vitre
c intermédiaire et la plaque  hvpv2
c*************************************************************************
      write(2,*)'Tp(t1,j+1)=',Tp(t1,j+1)
c     write(2,*)'Tv2(t1,j+1)=',Tv2(t1,j+1)

      ddt0(t1,j+1)=abs((Tp(t1,j+1)-273.)-(Tv2(t1,j+1)-273.))
c     write(2,*)'ddt0(t1,j+1)=',ddt0(t1,j+1)
```

```
      at0(t1,j+1)=(Tp(t1,j+1)-273.)+(Tv2(t1,j+1)-273.)/2
c     write(2,*)'at0(t1,j+1)=',at0(t1,j+1)

      dila0(t1,j+1)=2/((Tp(t1,j+1)-273.)+(Tv2(t1,j+1)-273.))
c     write(2,*)'dila0(t1,j+1)=',dila0(t1,j+1)
c***********************************************************************
c     les caractéristique thermophysique de l'air
c***********************************************************************
c masse volumique0 ( kg.m-3)
      roair0(t1+1,j+1)=353/(at0(t1,j+1)+273)
c     write(2,*)'roair0(t1+1,j+1)=',roair0(t1+1,j+1)

c conductivite thermique0(w/m.c)
      lamair0(t1+1,j+1)=7.57*1e-05*at0(t1,j+1)+0.0242
c     write(2,*)'lamair0(t1+1,j+1)=',lamair0(t1+1,j+1)

c viscosite dynamique0(pa.s)
      vidair0(t1+1,j+1)=1e-05*(0.0046*at0(t1,j+1)+1.7176)
c    write(2,*)'vidair0(t1+1,j+1)=',vidair0(t1+1,j+1)

c viscosite cinematique0(m2/s)
      vicair0(t1+1,j+1)=vidair0(t1+1,j+1)/roair0(t1+1,j+1)
c    write(2,*)'vicair0(t1+1,j+1)=',vicair0(t1+1,j+1)

c nombre de prandtl0
      pr0(t1+1,j+1)=-2.54*1e-04*at0(t1,j+1)+0.7147
c     write(2,*)'pr0(t1+1,j+1)=',pr0(t1+1,j+1)

c nombre de graschoff 0
      gr0(t1+1,j+1)=9.81*dila0(t1,j+1)*ddt0(t1,j+1)*(epv2)**3/
     &(vicair0(t1+1,j+1)**2)
c     write(2,*)'gr0(t1+1,j+1)=',gr0(t1+1,j+1)

c nombre de reyleigh 0
      ra0(t1+1,j+1)=pr0(t1+1,j+1)*gr0(t1+1,j+1)
c     write(2,*)'ra0(t1+1,j+1)=',ra0(t1+1,j+1)

c nombre de nusselt 0
      f0=1/epv2
       nu0(t1+1,j+1)=0.117*ra0(t1+1,j+1)**0.33/f0**0.25
c      write(2,*)'nu0(t1+1,j+1)=',nu0(t1+1,j+1)
c***********************************************************************
      hvpv2(t1+1,j+1)=nu0(t1+1,j+1)*lamair0(t1+1,j+1)/epv2
c     write(2,*)'hvpv2(t1+1,j+1)=',hvpv2(t1+1,j+1)
***********************************************************************
```

```
************************************************************************
c coefficient d'échange de chaleur par convection entre le fluide et la
c tube hvft
c***********************************************************************
c  les caractéristique de l'eau
c***********************************************************************
      Tt(t1+1,j)=Tamb(t1+1)
      Tf(t1+1,j)=Tfe+1.5
      Tt(t1+1,j)=Tt(t1+1,j)-273.
      Tf(t1+1,j)=Tf(t1+1,j)-273.
      write(2,*)'Tf(t1+1,j)=',Tf(t1+1,j)
      write(2,*)'Tt(t1+1,j)=',Tt(t1+1,j)
c***********************************************************************
c conductivite thermique (w/m.k)
      lam(t1+1,j+1)=0.5692+0.1858*1e-02*Tf(t1+1,j)-0.7499*1e-05*
     &Tf(t1+1,j)
c masse volumique ( kg.m-3)
      ro(t1+1,j+1)=999.879395+0.04694*Tf(t1+1,j)-0.66725*1e-02*
     &Tf(t1+1,j)**2+0.208229*1e-04*Tf(t1+1,j)**3
c viscosite dynamique
     vid1(t1+1,j+1)=5.449-0.1067*Tf(t1+1,j)+7.325*1e-04*Tf(t1+1,j)**2
     vid1(t1+1,j+1)=vid1(t1+1,j+1)/3600.
      vid2(t1+1,j+1)=5.449-0.1067*Tt(t1+1,j)+7.325*1e-04*Tt(t1+1,j)**2
     vid2(t1+1,j+1)=vid2(t1+1,j+1)/3600.
c capacite calorifique (j/kg.c0)
      cp(t1+1,j+1)=4216.66406-3.1657*Tf(t1+1,j)+0.0886749*Tf(t1+1,j)**2-
     &0.10106375*1e-02*Tf(t1+1,j)**3+0.444909529*1e-05*Tf(t1+1,j)**4
c nombre de reynolds
      Re(t1+1,j+1)=4.*q/(vid1(t1+1,j+1)*0.03768)
c nombre de prandt
          Pr1(t1+1,j+1)=(vid1(t1+1,j+1)*cp(t1+1,j+1))/lam(t1+1,j+1)
c nombre de graetz
          Gz(t1+1,j+1)=Re(t1+1,j+1)*Pr1(t1+1,j+1)*(0.012/0.90)

          if(Re(t1+1,j+1).gt.2100)goto 20
          if(Gz(t1+1,j+1).gt.100)goto 30
          Nus(t1+1,j+1)=3.66+((0.085*Gz(t1+1,j+1)*((vid1(t1+1,j+1)/
     &vid2(t1+1,j+1))**0.14))/(1+(0.047*(Gz(t1+1,j+1)**0.66))))

          goto 25

30    Nus(t1+1,j+1)=1.86*Gz(t1+1,j+1)**0.33*(vid1(t1+1,j+1)/
     &vid2(t1+1,j+1))**0.14+0.87*(1+0.015*Gz(t1+1,j+1)**0.33)

          goto 25

20        if(Re(t1+1,j+1).gt.10000)goto 50

          Nus(t1+1,j+1)=0.116*(Re(t1+1,j+1)**0.66-125)*Pr1(t1+1,j+1)**0.33*
     &(1+(0.012/0.90)**0.66)*(vid1(t1+1,j+1)/vid2(t1+1,j+1))**0.14
```

```
      goto 25

50    Nus(t1+1,j+1)=0.023*Re(t1+1,j+1)**0.8*Pr1(t1+1,j+1)**0.33*
     &(vid1(t1+1,j+1)/vid2(t1+1,j+1))**0.14

25    hvft(t1+1,j+1)=Nus(t1+1,j+1)*lam(t1+1,j+1)/0.012

          Tt(t1,j+1)=Tt(t1,j+1)+273.
          Tf(t1+1,j)=Tf(t1+1,j)+273.
c*************************************************************************
c coefficient d'échange de chaleur par rayonnement entre les deux verres hrv1v2
c*************************************************************************
      hrv1v2(t1+1,j+1)=5.67*1e-08*(Tv1(t1,j+1)**2+Tv2(t1,j+1)**2)*
     &(Tv1(t1,j+1)+Tv2(t1,j+1))/((1-esiv)/esiv+1+(1-esiv)/esiv)
c*************************************************************************
c coefficient d'échange de chaleur par rayonnement entre la vitre de
c protection et le ciel hrv1c
c*************************************************************************
          hrv1c(t1+1,j+1)=4.9896*1e-08*(Tv1(t1,j+1)**2.+Tc(t1)**2.)*
     &(Tv1(t1,j+1)+Tc(t1))
c*************************************************************************
c coefficient d'échange de chaleur par rayonnement entre la plaque et la
c vitre  intermédiaire hrpv2
c*************************************************************************
      hrpv2(t1+1,j+1)=5.67*1e-08*(Tp(t1,j+1)**2+Tv2(t1,j+1)**2)*
     &(Tp(t1,j+1)+Tv2(t1,j+1))/((1-esiv)/esiv+1+(1-esip)/esip)
c*************************************************************************
c coefficient d'échange de chaleur par rayonnement entre l'isolant et le
c sol hris
c*************************************************************************
      hris(t1+1,j+1)=0.567*1e-08*(Tie(t1,j+1)**2+Tamb(t1)**2)*
     &(Tie(t1,j+1)+Tamb(t1))
c*************************************************************************
c     lecture des elements de la matrice
c*************************************************************************
          dt=3600.
          a11=hvv1a+hvv1v2(t1+1,j+1)+hrv1c(t1+1,j+1)+
     &hrv1v2(t1+1,j+1)+(212400.*ev)/dt
          a12=-(hrv1v2(t1+1,j+1)+hvv1v2(t1+1,j+1))
          a13=0.
          a14=0.
          a15=0.
          a16=0.
          a17=0.
          b1=(Pv1(t1))+hrv1c(t1+1,j+1)*Tc(t1)+hvv1a*Tamb(t1)+212400.*
     &ev*tv1(t1,j+1)/dt
          a21=a12
          a22=hvpv2(t1+1,j+1)+hrpv2(t1+1,j+1)+hvv1v2(t1+1,j+1)+
     &hrv1v2(t1+1,j+1)+212400.*ev/dt
```

```
      a23=-(hrpv2(t1+1,j+1)+hvpv2(t1+1,j+1))
      a24=0.
      a25=0.
      a26=0.
      a27=0.
      b2=Pv2(t1)+212400.*ev*Tv2(t1,j+1)/dt
      a31=0.
      a32=a23
      a33=hvpv2(t1+1,j+1)+hrpv2(t1+1,j+1)+0.149*hcpt+
  &rop*cpp*ep/dt
      a34=-0.149*hcpt
      a35=0.
      a36=0.
      a37=0.
      b3=Pp0(t1)+(rop*cpp*ep*Tp(t1,j+1))/dt
      a41=0.
      a42=0.
      a43=a34
      a44=0.9*hvft(t1+1,j+1)+0.149*hcpt+1.76*hcit+(322.169/dt)
      a45=-0.9*hvft(t1+1,j+1)
      a46=-1.76*hcit
      b4=(322.169/dt)*Tt(t1,j+1)
      a47=0.
      a51=0.
      a52=0.
      a53=0.
      a54=a45
      a55=0.162*hvft(t1+1,j+1)+0.9*hvft(t1+1,j+1)+
  &(q*cp(t1+1,j+1)/0.50868)
      a56=-0.162*hvft(t1+1,j+1)
      a57=0.
      b5=(q*cp(t1+1,j+1)/0.50868)*Tf(t1+1,j)
      a61=0.
      a62=0.
      a63=0.
      a64=a46
      a65=a56
      a66=1.76*hcit+0.162*hvft(t1+1,j+1)+1.5+(330.48/dt)
      a67=-1.5
      b6=(330.48/dt)*tii(t1,j+1)
      a71=0.
      a72=0.
      a73=0.
      a74=0.
      a75=0.
      a76=a67
      a77=hvv1a+hris(t1+1,j+1)+1.5+(330.48/dt)
      b7=hvv1a*Tamb(t1)+hris(t1+1,j+1)*Tamb(t1)+(330.48*Tie(t1,j+1)/dt)
c*********************************************************************
```

```
c Résolution du système par le sous programme "gauss-siedel"
c*********************************************************************
      Tv1(t1+1,j+1)=315.
      Tv2(t1+1,j+1)=317
      Tp(t1+1,j+1)=330.
      Tt(t1+1,j+1)=322.
      Tf(t1+1,j+1)=320.
      Tii(t1+1,j+1)=317.
      Tie(t1+1,j+1)=310.

      dTv1(t1+1,j+1)=(b1-a12*Tv2(t1+1,j+1)-a13*Tp(t1+1,j+1)-a14*
     &Tt(t1+1,j+1)-a15*Tf(t1+1,j+1)-a16*Tii(t1+1,j+1)-a17*
     &Tie(t1+1,j+1))/a11
      write(2,*)'dTv1(t1+1,j+1)=',dTv1(t1+1,j+1)

      dTv2(t1+1,j+1)=(b2-a21*dTv1(t1+1,j+1)-a23*Tp(t1+1,j+1)-a24*
     &Tt(t1+1,j+1)-a25*Tf(t1+1,j+1)-a26*Tii(t1+1,j+1)-a27*
     &Tie(t1+1,j+1))/a22

      write(2,*)'dTv2(t1+1,j+1)=',dTv2(t1+1,j+1)

      dTp(t1+1,j+1)=(b3-a31*dTv1(t1+1,j+1)-a32*dTv2(t1+1,j+1)-a34*
     &Tt(t1+1,j+1)-a35*Tf(t1+1,j+1)-a36*Tii(t1+1,j+1)-a37*
     &Tie(t1+1,j+1))/a33

      write(2,*)'dTp(t1+1,j+1)=',dTp(t1+1,j+1)

      dTt(t1+1,j+1)=(b4-a41*dTv1(t1+1,j+1)-a42*dTv2(t1+1,j+1)-a43*
     &dTp(t1+1,j+1)-a45*Tf(t1+1,j+1)-a46*Tii(t1+1,j+1)-a47*
     &Tie(t1+1,j+1))/a44

      write(2,*)'dTt(t1+1,j+1)=',dTt(t1+1,j+1)

      dTf(t1+1,j+1)=(b5-a51*dTv1(t1+1,j+1)-a52*dTv2(t1+1,j+1)-a53*
     &dTp(t1+1,j+1)-a54*dTt(t1+1,j+1)-a56*Tii(t1+1,j+1)-a57*
     &Tie(t1+1,j+1))/a55
      write(2,*)'dTf(t1+1,j+1)=',dTf(t1+1,j+1)

      dTii(t1+1,j+1)=(b6-a61*dTv1(t1+1,j+1)-a62*dTv2(t1+1,j+1)-a63*
     &dTp(t1+1,j+1)-a64*dTt(t1+1,j+1)-a65*dTf(t1+1,j+1)-a67*
     &Tie(t1+1,j+1))/a66
      write(2,*)'dTii(t1+1,j+1)=',dTii(t1+1,j+1)

      dTie(t1+1,j+1)=(b7-a71*dTv1(t1+1,j+1)-a72*dTv2(t1+1,j+1)-a73*
     &dTp(t1+1,j+1)-a74*dTt(t1+1,j+1)-a75*dTf(t1+1,j+1)-a76*
     &dTii(t1+1,j+1))/a77
      write(2,*)'dTie(t1+1,j+1)=',dTie(t1+1,j+1)
```

```
          if((abs(dTv1(t1+1,j+1)-Tv1(t1+1,j+1)).le.1e-1).and.
     &(abs(dTv2(t1+1,j+1)-Tv2(t1+1,j+1)).le.1e-1).and.
     &(abs(dTp(t1+1,j+1)-Tp(t1+1,j+1)).le.1e-1).and.
     &(abs(dTt(t1+1,j+1)-Tt(t1+1,j+1)).le.1e-1).and.
     &(abs(dTf(t1+1,j+1)-Tf(t1+1,j+1)).le.1e-1).and.
     &(abs(dTii(t1+1,j+1)-Tii(t1+1,j+1)).le.1e-1).and.
     &(abs(dTie(t1+1,j+1)-Tie(t1+1,j+1)).le.1e-1))then

          Tv1(t1+1,j+1)=dTv1(t1+1,j+1)
          Tv2(t1+1,j+1)=dTv2(t1+1,j+1)
          Tp(t1+1,j+1)=dTp(t1+1,j+1)
          Tt(t1+1,j+1)=dTt(t1+1,j+1)
          Tf(t1+1,j+1)=dTf(t1+1,j+1)
          Tii(t1+1,j+1)=dTii(t1+1,j+1)
          Tie(t1+1,j+1)=dTie(t1+1,j+1)

          write(2,*)t1
          write(2,*)'Tamb(t)=',Tamb(t)
          write(2,*)'dTv1(t1+1,j+1)=',dTv1(t1+1,j+1)-273
          write(2,*)'dTv2(t1+1,j+1)=',dTv2(t1+1,j+1)-273
          write(2,*)'dTp(t1+1,j+1)=',dTp(t1+1,j+1)-273
          write(2,*)'dTt(t1+1,j+1)=',dTt(t1+1,j+1)-273
          write(2,*)'dTf(t1+1,j+1)=',dTf(t1+1,j+1)-273
c         write(2,*)'dTii(t1+1,j+1)=',dTii(t1+1,j+1)-273
c         write(2,*)'dTie(t1+1,j+1)=',dTie(t1+1,j+1)-273
          write(2,*)'dTpv2(t1+1,j+1)=',dTpv2(t1+1,j+1)-273
          endif
c*************************************************************************
c calcul les coefficient global des pertes ( Ug0= Uarr + Ulat + Uav )
c*************************************************************************
     rint(t1+1,j+1)=(hvpv2(t1+1,j+1)+hrpv2(t1+1,j+1))**(-1)
c      write(2,*)'rint(t1+1,j+1)=',rint(t1+1,j+1)
     rext(t1+1,j+1)=(hvv1a+hrv1c(t1+1,j+1))**(-1)
c      write(2,*)'rext(t1+1,j+1)=',rext(t1+1,j+1)
     rc(t1+1,j+1)=(hvv1v2(t1+1,j+1)+hrv1v2(t1+1,j+1))**(-1)
c      write(2,*)'rc(t1+1,j+1)=',rc(t1+1,j+1)
     Uav(t1+1,j+1)=(rint(t1+1,j+1)+rext(t1+1,j+1)+rc(t1+1,j+1))**(-1)
     write(2,*)'Uav(t1+1,j+1)=',Uav(t1+1,j+1)
    Ug0(t1+1,j+1)=0.51868+Uav(t1+1,j+1)
    write(2,*)'Ug0(t1+1,j+1)=',Ug0(t1+1,j+1)
c*************************************************************************
c le rendement de l'ailette "f"
c*************************************************************************
    m(t1+1,j+1)=(Ug0(t1+1,j+1)/(100*ep))**(1./2.)
c      write(2,*)'m(t1+1,j+1)=',m(t1+1,j+1)
     n(t1+1,j+1)=m(t1+1,j+1)*0.04
c      write(2,*)'n(t1+1,j+1)=',n(t1+1,j+1)
    f(t1+1,j+1)=tanh(n(t1+1,j+1))/n(t1+1,j+1)
c      write(2,*)'f(t1+1,j+1)=',f(t1+1,j+1)
```

```
c*************************************************************************
c l'efficacité "fc" du transfert
c*************************************************************************
      x(t1+1,j+1)=(Ug0(t1+1,j+1)*(0.02+0.08*f(t1+1,j+1)))**(-1)
c      write(2,*)'x(t1+1,j+1)=',x(t1+1,j+1)
      y(t1+1,j+1)=(0.018*3.14*hvft(t1+1,j+1))**(-1)
c      write(2,*)'y(t1+1,j+1)=',y(t1+1,j+1)
      z(t1+1,j+1)=(x(t1+1,j+1)+y(t1+1,j+1)+0.04)*0.1
c      write(2,*)'z(t1+1,j+1)=',z(t1+1,j+1)
      w(t1+1,j+1)=Ug0(t1+1,j+1)**(-1)
c      write(2,*)'w(t1+1,j+1)=',w(t1+1,j+1)
      fc(t1+1,j+1)=(w(t1+1,j+1)/z(t1+1,j+1))
c      write(2,*)'fc(t1+1,j+1)=',fc(t1+1,j+1)
c*************************************************************************
c l'efficacité globale "Fr0" de l'échanges thermique du capture
c*************************************************************************
      x1(t1+1,j+1)=1-exp((-fc(t1+1,j+1)*Ug0(t1+1,j+1))/(q*cp(t1+1,j+1)))
c      write(2,*)'x1(t1+1,j+1)=',x1(t1+1,j+1)
      Fr0(t1+1,j+1)=(q*cp(t1+1,j+1)/Ug0(t1+1,j+1))*x1(t1+1,j+1)
c      write(2,*)'Fr0(t1+1,j+1)=',Fr0(t1+1,j+1)
c*************************************************************************
c la puissance utile récupérée par le fluides
c*************************************************************************
      Qu0(t1+1,j+1)=Fr0(t1+1,j+1)*(Pp0(t1)-Ug0(t1+1,j+1)*(Tfe-Tamb(t1)))
      write(2,*)'Qu0(t1+1,j+1)=',Qu0(t1+1,j+1)
c*************************************************************************
c le rendement optique
c*************************************************************************
      no(t1+1,j+1)=Pp0(t1)/Pg(t1)
          write(2,*)'no(t1+1,j+1)=',no(t1+1,j+1)
c*************************************************************************
c le rendement thermique
c*************************************************************************
c      nth(t1+1,j+1)=Qu0(t1+1,j+1)/Pg(t1)
       nth(t1+1,j+1)=Fr0(t1+1,j+1)*(no(t1+1,j+1)-Ug0(t1+1,j+1)*
     &(Tfe-Tamb(t1))/Pg(t1))
     write(2,*)'nth(t1+1,j+1)=',nth(t1+1,j+1)
100   continue
200   continue
       stop
       end
```