



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES**



**Mémoire**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Option : CONVERSION THERMIQUE**

**Thème :**

**Modélisation des Pertes Thermiques  
d'un Capteur Solaire Plan**

**Par :**

Melle SMAILI Karima

Soutenu le 19/06/2016 devant le jury compose de :

Kasbadji Nachida	Directrice de Recherche à l'UDES	Présidente
Kaci Karim	MAA	Examineur
Mihoub Sofiane	MAA	Examineur
Merzouk Mustapha	Professeur à Université de Blida1	Promoteur

Dédicace

*La lumière de ma vie et l'espoir de mon existence, source d'affection de courage et d'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce jour ....*

*A ma chère mère*

*A mes sœurs et mes frères*

*A mon Promoteur*

*A mes très chers amis*

## REMERCIEMENTS

*Avant tout, je remercie DIEU de m'avoir donné le courage et la patience, pour accomplir ce travail.*

*Le travail exposé dans ce mémoire a été effectué au sien du département des énergies renouvelables de l'université Saad DAHLEB de BLIDA 1, dirigé par le professeur : Merzouk Mustapha.*

*Nos remerciements les plus gratifiants sont adressés à notre promoteur Pr Merzouk, pour sa disponibilité tout le temps tout le long de réalisation de ce projet.*

*Je tiens à remercier sincèrement tous les enseignants du département des énergies renouvelables SURTOUT Dr. Doumaz, Dr.Kasbadji, Pr. Hamid, Pr. Semmar, Dr. Mazouz, Dr. Kaci*

*Un grand merci aussi à tous mes amis surtout : Sadam, Zahra, Mohamed, Oussama,*

*Je remercie vivement, mes collègues de la promotion de l'Université de Blida : Abdallah, Brahim, Ahmed, Sarah, Hadjer, Sadia, Hafsa, Fatima, Amine. Que je n'oublierai jamais les beaux souvenirs avec eux.*

*Je veux remercie encore un autre fois le promoteur Pr.M. Merzouk.*

*Afin de ne pas oublier quelqu'un on ne remercie toute personne qui a contribué de près ou loin à la réalisation de ce projet.*

## REMERCIEMENTS

*Le présent travail a été réalisé à l'université de BLIDA 1, département de énergie renouvelable dans le cadre de la préparation d'un master en ER, option conversion thermique, sous la direction de Merzouk Mustapha qu'il soit vivement remercié pour l'aide et les conseils qu'il ma apporté.*

*Je remercie Dr. Kasbadji Nachida, d'avoir bien voulu présider le jury d'examineur*

*Tout comme remercié vivement M. Kaci Karim et M. Mihoub Sofiane d'avoir accepté d'examiner le présent travail.*

## Résumé :

Cette étude porte sur la modélisation des pertes thermiques d'un capteur solaire plan. Le modèle de Klein et al étant complexe, l'objectif de ce présent travail est de développer un modèle mathématique qui permet de calculer les pertes avant. En utilisant un modèle polynomial, nous avons modélisé les principaux paramètres influencent les pertes avant du capteur (température d'entrée, température ambiante, émissivité de la plaque absorbante, émissivité de vitrage, la vitesse du vent et l'épaisseur de la lame d'air). Le modèle obtenu s'écarte de moins de 3% de la simulation classique.

## Abstract:

This study concerns the medialization of heat losses from a flat plat collector. The model of Klein and al is compacted, the objective of this work is to develop a mathematical model which allows us to simulate the hearlosses. Using a polynomial model we have modulated the main parameters which influence the heat losses in the front of the flat plat collector (in temperature, ambient temperature, emissivity of the absorber, emissivity of the glass, the speed of the wind and the thickness of the blade of air). The gotten model differs less than 3% of the classical simulation.

## ملخص

تتركز هذه الدراسة على نموذج من فقدان الحرارة في اللاقط الشمسي. نموذج كلاين و عديد من الباحثين معقد، و الهدف من هذا العمل هو تطوير نموذج رياضي كثير الحدود يقوم بحساب هذه الخسائر. و نحن على غرار العوامل الرئيسية التي تؤثر على خسائر من قبل اللاقط الشمسي (درجة الحرارة مدخل، و درجة الحرارة المحيط، الابتعاثية من لوحة الامتصاص والزجاج، سرعة الرياح و سمك الهواء الموجود بين لوحة الامتصاص و الزجاج). النموذج الناتج على الأقل 3 بالمائة من المحاكاة التقليدية

## Introduction

L'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelables est au premier rang des l'énergie solaire. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt qu'on lui a porté à l'époque étaient sa gratuité, sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre. [1].

On s'est aperçu que l'énergie solaire, contrairement à une idée répandue, n'est pas tout à fait gratuite : son utilisation nécessite un investissement de départ souvent plus lourd que pour les énergies conventionnelles et nombre d'installations solaires sont aujourd'hui à l'arrêt faute d'avoir un budget destiné à la maintenance des équipements.

Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire est lié non seulement à ses avantages économiques mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement : pas de rejets polluants (fumées contenant du  $CO_2$  et des  $NO_x$  par les centrales thermiques), pas de danger radio actif et de déchets encombrants (centrales nucléaires), possibilité de limitation de l'emploi des CFC (production de froid solaire par adsorption).

L'objet de ce travail, est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on expose une étude bibliographique sur quelques travaux disponibles dans la littérature qui traitent le côté thermique et quelques définitions et concepts sur les capteurs solaires plans.

Dans le second chapitre, nous procéderons à l'étude théorique et à la modélisation des paramètres qui influencent les pertes thermiques du capteur et en particulier les pertes vers l'avant. Nous terminerons par le rendement du capteur et l'organigramme de calcul de tous les paramètres.

Le dernier chapitre est consacré à l'interprétation des résultats et discussion. Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

**Introduction**

L'énergie solaire est gratuite et non polluante et présente partout. Son principe consiste à convertir l'éclairement solaire en chaleur par l'intermédiaire de capteur solaire thermique. La chaleur récupérée est utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire (chauffe-eau solaire) pour le chauffage (plancher solaire direct,.....).

**I. Le gisement solaire :****I.1- Caractéristiques du soleil :**

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km, soit 100 fois plus grand que celui de la terre. Sa masse est par contre de l'ordre de  $2 \cdot 10^{27}$  tonnes.

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564.106 tonnes l'isotope d' $H_2$  en hélium. La différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ( $E=mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de  $36 \cdot 10^{22}$  KW. La terre étant à une distance de  $150 \cdot 10^6$  Km du soleil, elle reçoit une énergie de  $1.8 \cdot 10^{17}$  W.

Les 98% du rayonnement solaire sont émis dans des longueurs d'onde inférieure à  $4\mu m$ . Et comme première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777 K, [2].

**I.2- Constante solaire :**

La valeur du flux de rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaire placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, soit à environ 80km d'altitude, varie au cours de l'année avec la distance Terre – Soleil. Sa valeur moyenne est appelée la constante solaire et fixée par l'OMM à  $1367 \text{ W/ m}^2$ , [2].

**I.3- Rayonnement solaire:**

Le rayonnement solaire arrivant au sol se compose de, [2] :

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

**Rayonnement diffus** : c'est une partie du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

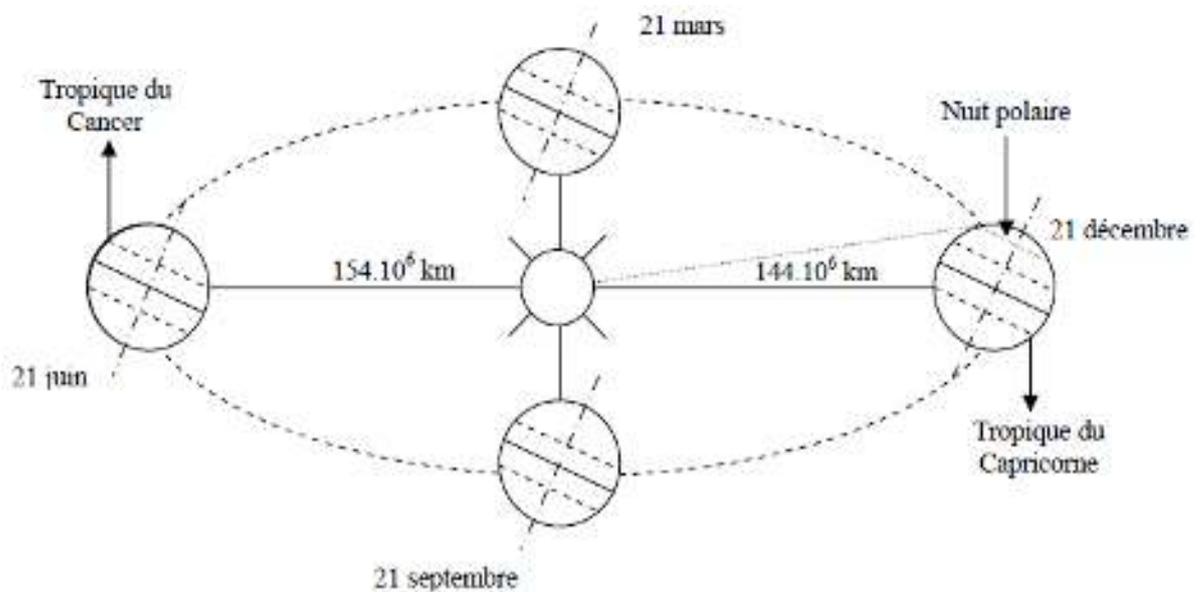
**Rayonnement global** : c'est la somme des rayonnements direct et diffus.

**Albédo** : Ce pouvoir de réflexion et dépend la nature du sol.

#### **I.4- Repérage de la position du soleil :**

La terre tourne au tour de soleil et au tour d'elle-même en même temps. Pour arriver à repérer la position du soleil plusieurs paramètres doivent être calculés.

La rotation de la terre autour du soleil et l'inclinaison de l'axe de la terre sont représentées en figure 1.1, [3]



**Figure 1.1-** Trajectoire de la terre autour du soleil, [1]

#### **I.5-Coordonnées équatoriales :**

##### **I.5-1- La déclinaison ( $\delta$ ) :**

On appelle déclinaison  $\delta$  ( $^\circ$ ) l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre  $-23.45^\circ$  et  $+23.45^\circ$ .

Elle est nulle aux équinoxes, maximale au solstice d'été et minimale au solstice d'hiver. La valeur de la déclinaison peut être calculée par relation, [3]:

$$\delta = 23.45 \sin \left( \frac{360}{365} (N_j + 284) \right) \quad (1.1)$$

Où :

$\delta$  : La déclinaison mesurée en degrés

$N_j$ : Le numéro du jour dans l'année

### **I.5.2-Temps solaire vrai TSV**

Le temps solaire vrai en un point du globe est donné par

$$\text{TSV} = T_l + E_t + 4(L_{ref} - L_{lieu}) + D \quad (1.2)$$

Avec :

$T_l$  : Temps légal

$D$  : décalage horaire (en Algérie  $D = +1$  toute l'année)

$L_{ref}$  : Longitude du méridien de référence (Greenwich pour l'Algérie)

$L_{lieu}$  : Longitude du lieu comptée positivement à l'ouest et négativement à l'est

$E_t$  : Equation du temps donnée par [3] :

$$E_t = 9.87 \sin 2\beta - 7.53 \cos \beta - 1.5 \sin \beta \quad (\text{min}) \quad (1.3)$$

Avec :

$$\beta = 360(n-81)/365$$

### **I.5.3-L'angle horaire $\omega$ :**

C'est l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien), il définit le vrai temps solaire, [2].

$$\omega = 15 (12 - \text{TSV}) \quad (1.4)$$

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

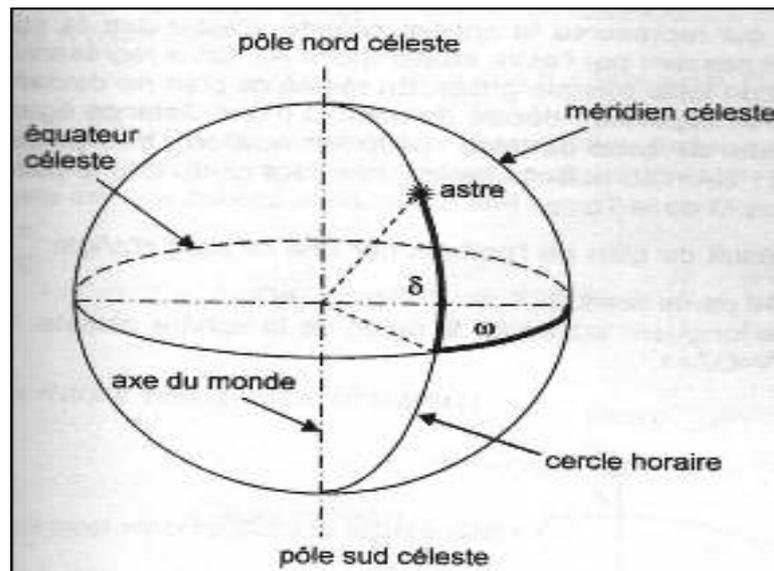


Figure 1.2- Repérage du soleil en coordonnées équatoriales, [4]

## **II.1-Coordonnées horizontales :**

### **II.1. 1- La hauteur du soleil (h) :**

La hauteur du soleil est l'angle que fait le rayon solaire avec sa projection sur un plan horizontal, elle est donnée par, [3] :

$$\sin h = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (1.5)$$

### **II.1.2-Longitude (L) :**

La longitude est l'angle déterminé par le méridien du lieu et le méridien de Greenwich [2].

### **II.1.3-Latitude ( $\varphi$ ) :**

La latitude permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur, (le sommet de l'angle étant le centre de la terre). On parle de latitude de Nord et de latitude de Sud, [2].

**II.1.4- L'azimut du soleil (a) :**

C'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud, cet angle est compte positivement le matin (pour l'hémisphère Nord), [2].

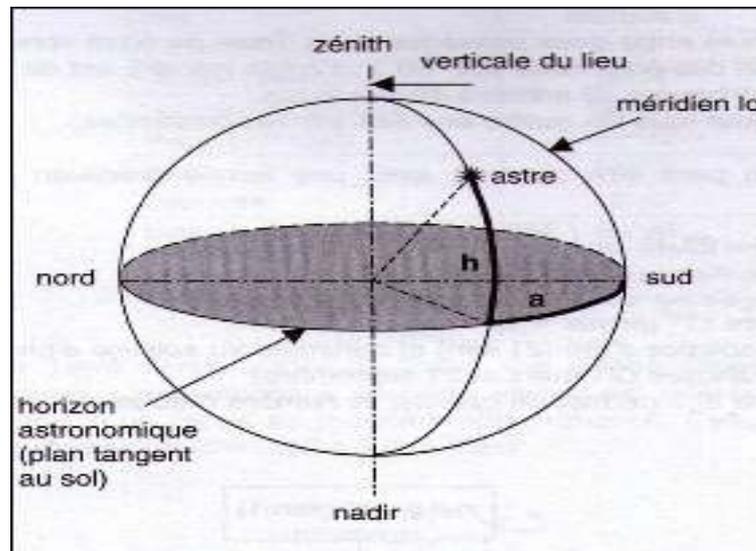


Figure 1.3- Repérage du soleil en coordonnées horizontales, [4]

**II.1.5- Angle horaire aux lever et coucher du soleil :**

L'angle horaire au lever (ou coucher) du soleil correspond à  $h = 0$ , [2] soit pour :

$$\cos w_s = - \tan \varphi \tan \delta \quad (1.6)$$

La durée du jour, en heures, est donc donnée par :

$$D_J = (2/15) \arccos(- \tan \varphi \tan \delta) \quad (\text{heures}) \quad (1.7)$$

**III- Capteur solaire :****III.1-Principe de fonctionnement**

Le capteur plan est un système thermique dont la fonction consiste à, [5] :

- Capter l'énergie solaire
- La convertir en énergie thermique
- La transmettre à un fluide caloporteur
- Le fluide transporte cette énergie vers l'utilisation ou un système de stockage

Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet de serre (Le verre étant opaque à l'IR). Toute fois on peut obtenir le même effet avec une surface sélective.

Le capteur étant muni d'une couverture, ce dernier doit satisfaire aux caractéristiques suivantes :

- Etre transparent à la radiation solaire (petites longueurs d'ondes)
- Opaque à l'infrarouge réémis par l'absorbeur.

Ainsi la radiation émise par l'absorbeur se trouve piégée à l'intérieur du capteur et revient vers l'absorbeur après multiples réflexions.

Les températures que peut atteindre le fluide caloporteur d'un capteur plan sont généralement modérées et inférieures à 100 °C.

Les fluides généralement utilisés sont l'eau ou l'air.

Les avantages du capteur plan résident dans le fait que :

- Il ne nécessite pas de système de poursuite
- Sa construction est relativement simple
- Il capte la composante directe et diffuse de la radiation solaire
- Le cout est relativement modéré
- Le montage d'une installation à base de capteurs plans ne demande pas de qualification particulière
- Il est généralement constitué de matériaux ordinaires, sauf pour les capteurs à hautes performances

### **III.2- Effet de serre dans les capteurs solaires**

La plus grande partie de l'énergie émise par le soleil est sous forme d'éclairement ; dont les longueurs d'onde correspondant à la lumière visible. Le verre ou les plastiques utilisés dans les capteurs plans vitrés sont transparents dans cette tranche de longueurs d'onde ils laissent donc passer une grande partie de l'énergie.

Par contre ils sont opaques l'IR et retiennent une grande partie de l'infrarouge que l'absorbeur émet lors de son échauffement. La chaleur dégagée par ce dernier reste emprisonnée dans l'enceinte du capteur. C'est le phénomène d'effet de serre, [6].

### **III.3- Les différents types de capteurs solaires thermiques**

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considéré, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre.

On distingue généralement les capteurs à air et les capteurs à eau.

#### **III.3.1- Les capteurs à air**

Les capteurs à air permettent, par l'apport d'air réchauffé, d'augmenter la température de l'air ambiant interne de quelques °C, [7].

Le capteur à air est constitué principalement d'un caisson isolé recouvert d'une vitre. L'air froid s'engouffrant dans la partie basse du capteur est réchauffé dans son parcours dans le capteur pour ensuite aller directement dans la pièce à chauffer.

#### **III.3.2- Les capteurs à eau**

Ils fonctionnent en réalité à l'aide d'un fluide caloporteur. Ils se répartissent en trois familles :

##### **III.3.2-1- Les capteurs non – vitrés :**

Utilisée essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines.

### III.3.2-2- Les capteurs plans vitrés :

Le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un antigel, passe dans un radiateur plaqué en dessous d'une feuille absorbante, le tout placé derrière une vitre, dans un caisson isolé par un isolant [7].

### III.3.2-3- Les capteurs à tubes sous vide :

Le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un seul tube sous vide. Le principe est le même que pour les capteurs plans vitrés, l'isolation étant simplement assurée par l'absence de molécules d'air (vide), [7].

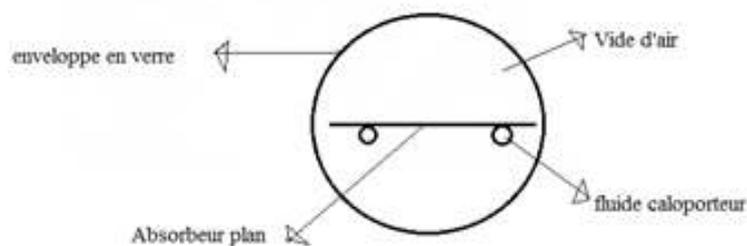


Figure 1.4 - Une schématisation d'un capteur sous vide

### III.4- Capteur solaire plan vitré:

Un capteur solaire thermique est constitué des éléments suivant :

- Un vitrage qui transmet l'éclairement solaire dans le capteur et empêche la chaleur de ressortir du capteur (c'est le phénomène de l'effet de serre).
- Un revêtement sélectif appliqué sur l'absorbeur qui va absorber l'éclairement solaire et le convertir en chaleur.
- Des tubes en cuivre en contact avec l'absorbeur dans lesquels circule un fluide caloporteur qui s'y réchauffe.
- Une isolation en partie inférieure pour éviter les pertes thermiques à l'arrière du capteur.

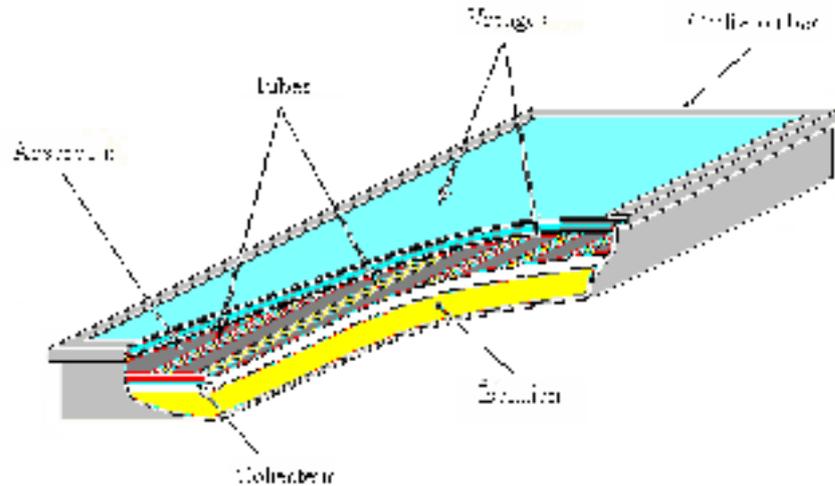


Figure 1.5 – Une schématisation d'un capteur solaire plan, [4]

### III.4.1- L'absorbant

La plaque absorbante du capteur plan constitue l'élément capteur de l'énergie solaire, qui va convertir le rayonnement en chaleur et la transmettre au fluide caloporteur.

Il est généralement en acier ou en cuivre, de faible épaisseur. De plus la plaque absorbante doit avoir une grande absorbance pour les rayons solaires. Mais elle doit également avoir une faible réflexion du d'éclairement thermique (reflectance faible pour l'infrarouge lointain).

Il existe deux moyens d'optimiser le rendement thermique :

- Par l'utilisation d'une peinture noire (carbone noir) qui est caractérisé par une haute absorbance (95%), d'une emittance élevée, peu couteux, facile à mettre en œuvre et durable
- Revêtement sélectif (chrome noir) caractérisé par une bonne absorbance et une faible emittance (~10%), il est couteux et nécessite des techniques avancées, il se détériore avec le temps et la température.

La couverture joue un rôle important dans le capteur par :

- La transmission de l'éclairage solaire avec une faible absorbance et réflectance et ce pour l'éclairage solaire dont la longueur d'onde est inférieure à  $3\mu\text{m}$ .
- La minimisation des pertes de chaleur (conduction, convection, et d'éclairage) en utilisant des matériaux opaques à l'infrarouge et l'utilisation de plusieurs couvertures.
- La couverture est en verre à faible concentration de fer ou en plastique (téflon-polycarbonate...).

### **III.4.2- Le coffre :**

C'est un boîtier pour maintenir les différents composants en place et permettre l'installation du capteur.

### **III.4.3- L'isolant :**

Afin de limiter les pertes par conduction vers le bas du capteur, on isole celui-ci avec des matériaux appropriés (fibre de verre...), caractérisés par un faible coefficient de conductivité thermique.

## **III.5-Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires [8] :**

### **a-Paramètres externes :**

- la position du soleil et de la durée de l'ensoleillement
- La température ambiante.
- La vitesse du vent sur le capteur

### **b- Paramètre internes :**

- Paramètres de position : l'inclinaison et l'orientation.
- Dimensions du capteur : épaisseur, longueur, largeur et la surface réceptrice.
- La section de passage de fluide caloporteur.

**c- Paramètres de fonctionnement :**

- Le débit de fluide caloporteur.
- Les températures des différentes parties du capteur.

**III.6- Etude Bibliographique**

L'étude des paramètres qui influent sur les pertes thermiques solaires plans a fait l'objet de plusieurs recherches. Nous exposons quelques travaux disponibles dans la littérature qui traitent le côté thermique.

Les premières travaux scientifiques portant sur la théorie du capteur plan ont été établis par **Hottel et Wortz [9] en 1942**. Depuis, d'autres études ont été faites sur différentes configurations de capteurs plans, notamment celle de **Bliss [10] en 1959**, qui a déterminé le rapport des résistances thermiques représentant les échanges thermiques entre le fluide caloporteur, l'absorbeur et l'environnement et ceci pour un fluide circulant entre deux plaques parallèles, puis pour le cas où le fluide circule dans des tubes soudés à des ailettes et constituant ainsi la plaque absorbante et en fin le cas où ces mêmes tubes sont soudés au-dessus de la plaque absorbante. Depuis, les études sur différentes configurations de la plaque absorbante n'ont pas cessé, **Abdel-Khalil [11] en 1976** a étudié un capteur solaire plan dont le tube en serpentin est soudé au-dessus de la plaque absorbante. D'autres chercheurs se sont intéressés à l'étude de petites parties bien distinctes du capteur. Les travaux de **Whillier [12] en 1959** en sont un exemple. Ils se sont basés sur la détermination de la fixation la plus appropriée entre le tube et la plaque absorbante. D'autres travaux concernant les pertes thermiques du capteur plan vers l'extérieur ont abouti à l'élaboration de relations empiriques ; comme celle du coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur plan : formule de **Klein [13]**, qui elle-même fut améliorée par d'autres auteurs (**Agarwal et al [14]**, **Francey et al [15]** ...). On peut citer aussi la formule empirique de **Sparrow [16]** pour la détermination du coefficient de pertes thermiques convectives due à l'effet du vent. Cette dernière est valable pour des nombres de Reynolds bien définis, ce qui limite le champ des investigations. Par contre la relation proposée par **Keller [17]** est utilisée dans un domaine beaucoup plus vaste des propriétés thermo-physiques. Pour l'amélioration des

résultats de la performance instantanée des capteurs solaires plans, de nouvelles techniques sont apparues, par exemple la réalisation d'un vide modéré dans la lame d'air située entre le couvert et l'absorbeur (**Eaton et al [18]**), le dépôt d'une fine couche de peinture sélective sur la plaque absorbante afin de diminuer les pertes radiatives et l'application d'une structure en nids d'abeilles afin d'éliminer les pertes thermiques par convection entre le couvert et la plaque absorbante (**Hollands et al [19]**). Les tendances actuelles dans la recherche sont la réalisation de capteurs solaires plans haute performance et d'autres à faible coût pour les besoins domestiques, **Kasbadji Nachida [5]**.

Dans ce cadre, l'étude proposée porte sur la détermination des performances instantanées théoriques et expérimentales de trois capteurs solaires plans qui sont :

- Capteur plan entièrement en plastique P-P.
- Capteur plan en plastique à couvert vitré P-V.
- Capteur plan à fibres de verre P-C-F.

**T. Letz et M. Lallemand [20]**, ont analysé le comportement thermique d'un capteur solaire plan à air fonctionnant en régime dynamique. Un modèle basé sur une résolution des équations des bilans thermiques par une méthode nodale a été établi. Sa validation est réalisée à partir d'essais effectués en ensoleillement naturel et en ensoleillement artificiel. L'écart absolu entre les rendements théorique et expérimental est inférieur à 3%. La sensibilité du rendement à différents paramètres, a été étudiée ; et en particulier la sélectivité de l'absorbeur, l'importance des fuites d'air, et des conditions de fonctionnement du capteur.

Dans le but de minimiser les pertes de chaleur à travers le couvert vers l'ambiant, **A.A Mohamed [21]** a proposé de forcer l'air circulant sous la couverture de verre (préchauffage d'air) avant le passage par l'absorbeur, et d'utiliser un absorbeur poreux pour augmenter le transfert thermique à l'air et d'ajouter une deuxième couverture. Dans ce travail, **A.A.Mohamed** présente une analyse du capteur et évalue son rendement, comme, il a fait une comparaison avec un capteur solaire conventionnel avec des couvertures simple et double. Cette analyse a indiqué que l'efficacité du capteur conseillé est élevée comparée aux capteurs conventionnels et qu'elle peut excéder 75%.

**A.Benkhelifa [22]**, développe un modèle mathématique permettant de calculer les pertes thermiques. Les équations de ce modèle ont été résolues par une méthode itérative, dont les résultats de ce modèle étaient en bon accord avec ceux issus des relations empiriques rencontrées dans la littérature. Ce travail, on a confirmé que le coefficient des pertes thermiques augmente avec l'augmentation de l'émissivité de l'absorbeur et sa température et le coefficient d'échange convectif avec l'air ambiant, mais, il diminue avec l'accroissement de la distance entre l'absorbeur et la vitre. Selon ce dernier, le coefficient des pertes thermiques augmente avec l'augmentation de l'émissivité de l'absorbeur, sa température, et le coefficient d'échange convectif avec l'air ambiante, alors qu'il diminue avec l'accroissement de la distance entre l'absorbeur et la vitre.

Dans ce travail, **Donation Njomo [23]** a souligné avec une étude numérique, qu'un capteur avec double couverture de matière différente (Ici la couverture extérieure est en plexiglace et celle intérieure est en verre) à des performances meilleures qu'un capteur à deux vitres de même matière. Ils trouvent que la température de sortie du fluide caloporteur, ainsi que le rendement thermique journalier du capteur, diminuent lorsque le débit d'air augmente. Par contre la température de sortie du fluide caloporteur ne croit pas de manière significative avec l'augmentation de la température d'entrée, car les pertes thermiques du capteur augmentent rapidement quand la température de l'air à l'entrée augmente, et le rendement thermique journalier du capteur décroît linéairement avec l'augmentation de la température d'entrée du fluide jusqu'à s'annuler. Ils observent aussi, que la température de sortie du fluide caloporteur, ainsi que le rendement thermique journalier du capteur, décroît continuellement quand on augmente la hauteur du canal d'écoulement du fluide.

**K.Sopian et al [24]** ont présenté une étude expérimentale du rendement thermique d'un capteur solaire à double passes sans et avec milieu poreux dans le deuxième canal. Ils ont étudié l'effet du changement de la profondeur supérieure et inférieure de canal avec et sans milieu poreux sur rendement thermique, en plus des effets du débit d'air, du rayonnement et de l'élévation de la température. Dans ce travail, ils ont constaté que la présence du milieu poreux augmente le transfert thermique d'où l'augmentation de la température de sortie et par conséquent le rendement thermique des systèmes, et que le capteur solaire à double passes a des performances thermiques plus élevées que celles à passes simple, le rendement thermique d'un capteur solaire à double passes avec un

milieu poreux est environ 60-70%, c'est-à-dire 20-70% plus haut que le capteur sans milieu poreux.

Les travaux de **H. Abdi et al [25]**, concerne a l'étude de deux types de capteurs plans avec des formes différents de la plaque d'absorption du rayonnement solaire.il s'agit principalement d'étudier l'effet de la forme géométrique des passages de fluide sur l'efficacité des capteurs dans le cas d'un contact direct eau – plaque d'absorption. Pour améliorer le rendement d'un capteur solaire plan, ils ont cherché à favoriser l'échange de la chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur. Un modèle mathématique a été élaboré et validé expérimentalement. La comparaison des résultats théoriques et expérimentaux montre, que le rendement journalier du capteur avec une plaque d'absorption de forme convexe est meilleur que celui avec une plaque de la forme concave.

Dans le but de favoriser le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide de travail dans un capteur à air, **A.Amed Zaid et al [25]** ont introduit des chicane dans la vanne dynamique du capteur, lesquelles vont augmenter la section de passage de l'air, d'où l'augmentation du nombre de Reynolds et la création de la turbulence. Les auteurs ont utilisé des chicanes Delta centrées Longitudinalement (DCL), Ogivales centrées Longitudinalement (OCL) et transversales- Longitudinalement (TL), placées sur l'isolant, sous l'absorbeur ou par la combinaison entre les deux types. Les résultats expérimentaux ont montré que les chicanes (TL) présentent un bon rendement par rapport aux chicanes (DCL), (OCL).

**A. Zerrouki et al [27]** ont établie une modélisation mathématique d'un capteur solaire à air de conception conventionnelle à deux passes (circulation d'air de part et d'autre de l'absorbeur).et ont étudié le cas où le capteur est dans un état tel que les conditions de BLISS sont respectées. Ils ont fait un bilan respectivement sur la couverture transparente, l'absorbeur puis isolation thermique arrière. Ils ont résolu le système d'équations obtenus, pour fournir les expressions mathématique exactes des paramètres  $U_L$ ,  $F_r$  et  $F'$  qui sont représentés graphiquement.

Le coefficient d'échange thermique de l'absorbeur pour les capteurs solaires à air est plus faible que celui des capteurs à l'eau, **F.Mokhtari et Al [28]** ont fait une étude expérimentale dans le but d'améliorer le contact plaque chauffante – air.

Les auteurs ont étudié trois configurations différentes du capteur solaire à air :

Configuration 1 : l'air à chauffer passe sous l'absorbeur.

Configuration 2 : la plaque absorbante est placée sur la diagonale du capteur entre la couverture et l'isolant, l'entrée de l'air se trouve au dessus de l'absorbeur tandis que la sortie est située sous l'absorbeur. Elle est munie d'un orifice de section rectangulaire pour permettre l'évacuation de l'air chaud.

Configuration 3 : le passage de l'air se trouve entre la vitre et la plaque absorbante au dessus de celle – ci.

D'après les résultats expérimentaux trouvés, le transfert thermique est important quand il y'a contact direct entre la plaque et l'air couplé à une double circulation de l'air, C'est donc la deuxième configuration qui a donné les meilleurs résultats.

**L.C.Demartini [29]** et al ont fait une analyse numérique et expérimentale de l'écoulement de l'air à l'intérieur d'un canal de section rectangulaire, contenant deux déflecteurs rectangulaires.

Cette étude montre que les plus grandes variations dans la pression et champs de vitesse se produisent dans les régions près des déflecteurs.

**A.ABENE et al [30]**, ont procédé à l'introduction de chicane (obstacles) disposées en rangées dans les conduits de capteur solaire améliore nettement les transferts thermiques.

L'étude expérimentale menée consiste en la simulation de cette énergie solaire. Le but recherché est d'améliorer le couple température- rendement du capteur solaire plan à air et d'appliquer ce dernier pour l'amélioration du temps de séchage de la figue.

Dans le but de minimiser les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, **Feyza Benyelles et Al [31]** ont proposé de placer un isolant « aérogel de silice » au dessus de l'absorbeur. Les auteurs ont choisi l'aérogel de silice pour ses propriétés.

C'est un matériau solide à basse densité variant de 80 à 270  $\text{kg/m}^3$ , transparent, poreux (porosité de l'ordre de 20mm), la transmittance solaire normale est de 90%. Sa conductivité thermique est de l'ordre de 0.02W/m.K.

Plusieurs capteurs dans les mêmes conditions expérimentales ont été comparés :

- Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif.
- Capteur simple vitrage à absorbeur sélectif.
- Capteur double vitrage à absorbeur non sélectif.
- Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif muni d'un isolant à aérogel de silice.

Les auteurs ont trouvé que la température de la vitre d'un capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif peut atteindre 50°C, alors qu'elle n'atteint que 20°C pour l'absorbeur muni d'un isolant aérogel de silice. En outre, le coefficient de pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, dans ce cas est minime. Ils ont déduit que l'aérogel de silice est un super isolant transparent de la face avant du capteur, et contribue ainsi à l'amélioration du rendement du capteur solaire.

Pour améliorer les performances des capteurs solaires à air, **K. Aoues et Al [32]** ont introduit dans la veine d'air mobile des chicanes qui jouent un rôle à double aspect, favorisant le transfert thermique au fluide caloporteur :

- Elles permettent de rendre turbulent l'écoulement à proximité de la plaque chaude.
- Elles prolongent le parcours du fluide caloporteur.

La veine d'air dynamique du capteur est de 25 mm de hauteur, comprise entre la plaque absorbante et une plaque en acier galvanisé placée sur l'isolant. Cette veine est équipée de rangées d'obstacles métalliques minces soudées perpendiculairement à l'écoulement de l'air sur la plaque inférieure. Ces obstacles présentent une différence dans la forme résidant dans la partie inclinée d'angle respectivement égale à 60° et 120°, ces chicanes sont placées d'une distance respectivement à  $d=10$  cm et  $d=5$  cm suivant deux configurations A et B qui se différencient par le nombre de rangées respectivement égales à 152 et 256 chicanes.

Par ailleurs, **K.Aoues et Al [33]** ont entrepris un travail théorique pour améliorer le coefficient de transfert convectif entre l'air et l'absorbeur, en plaçant des chicanes cylindriques perpendiculairement à l'écoulement dans la veine d'air dynamique entre l'absorbeur et l'isolant.

Les auteurs ont étudié les trois cas suivants :

- Le capteur plan à air dépourvu de chicanes.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en quinconces.

Les auteurs ont trouvé que le meilleur rendement est obtenu avec des chicanes cylindriques arrangées en quinconce, et le plus bas pour le capteur lisse.

**A.Labed et Al [34]** ont mené une étude expérimentale et théorique afin d'améliorer les performances du capteur solaire plan à air en introduisant un nouveau modèle de rugosité artificielle. Le système étudié est un capteur solaire plan à air à simple passe composé d'une seule vitre, d'une plaque absorbante en acier galvanisé peinte en noir mat, d'une plaque arrière en acier galvanisé placé sur l'isolant et d'une isolation arrière. Les rugosités artificielles sont de petits canaux, dont la base est de forme trapézoïdale d'une hauteur de 25mm, elles sont placées entre les deux plaques en acier galvanisé. Comparativement à un canal lisse, les résultats théoriques sont validés par les résultats expérimentaux. Dans ce **Prasad, S.B.et al [35]**, ont réalise une étude expérimentale qui se base sur la comparaison de l'efficacité de capteur un lit sous forme de treillis métallique avec un capteur conventionnel.les données expérimentales ont été utilisées pour développer des corrélations, dans le but de ces corrélations c'est de prévoir les résultats expérimentaux avec une exactitude raisonnable. Les corrélations expérimentales développées montrent un accord meilleur par rapport aux valeurs prévues par des corrélations développées dans le temps passé pour le même système. Ils ont constaté qu'un rendement de l'ordre de 76 à 89% peut être obtenu.

Dans le but d'étudier l'influence de quelques paramètre sur le coefficient de perte thermique vers l'avant du capteur.

**R.Kaoulal et al [36]** Ont mené une étude théorique sur un capteur solaire plan à air à simple passe entre l'absorbeur et la vitre, intégré en façade, fonctionnant en régime dynamique en convection naturelle et destinée au chauffage. Ils ont déterminé les profils de température, du vitrage, de l'absorbeur, et du fluide caloporteur (l'air) à la sortie du capteur, ainsi que le rendement thermique instantané en résolvant les équations de bilans thermiques par la méthode nodale.

Dans le but d'étudier l'influence de quelques paramètres sur le coefficient des pertes thermiques vers l'avant du capteur solaire plan. Par la méthode des plans

d'expériences établies par les mathématiciens, a été développé un modèle mathématique multinomiale qui permet de calculer ces pertes thermiques. Les équations de ce modèle ont été résolues par une méthode itérative par simulation **MATLAB**.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre on définit les concepts et les définitions sur le capteur solaire plan et après avoir pris connaissance des principaux travaux qui concernent la modélisation des pertes thermiques d'un capteur solaire plan. Nous avons représenté la problématique de notre travail.

## **Introduction**

Après avoir présenté dans le chapitre 1 les concepts et les définitions sur le capteur solaire plan et après avoir pris connaissance des principaux travaux qui concernent la modélisation des pertes thermiques d'un capteur solaire plan. Nous abordons dans l'estimation du rendement optique et des pertes globales et en particulier les pertes avant. Pertes représentant l'objet du présent travail.

## **I- Rendement Optique**

### **I.1- Calcul du rendement optique:**

L'estimation du rendement optique passe par l'évaluation des paramètres suivants, [36] :

- L'éclairement reçu par un plan incliné d'un angle  $\beta$ .
- L'éclairement absorbé, par la plaque absorbante du capteur.
- Produits transmittivité absorptivités, effectifs (direct, diffus ciel, et diffus sol).
- L'angle horaire.
- L'angle d'incidence ( $\theta$ ).

### **I.2-Transmittivité d'un vitrage plan**

#### **I.2.1- Rayonnement Direct**

Pour l'estimation de la transmittivité totale du vitrage, nous utiliserons les résultats des travaux de Fresnel (Duffie et al, 1980). Travaux basés sur l'hypothèse qu'un rayon de lumière non polarisée peut être considéré comme la résultante de ses composantes Parallèle et perpendiculaire. Ainsi, la fraction d'éclairement réfléchi par une surface quelconque sera donnée par, [36] :

$$r = I_r / I = (r_{//} + r_{\perp}) / 2 \quad (1.7)$$

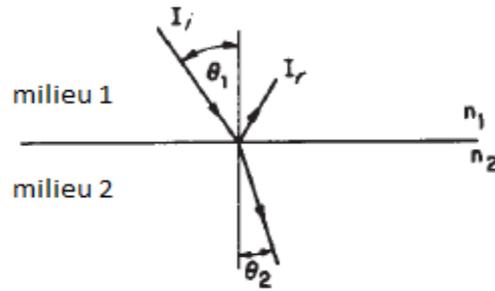


Figure 2.1 - Réfraction d'un rayon solaire dans un vitrage.

Avec :

$$r_{//} = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1.8)$$

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}$$

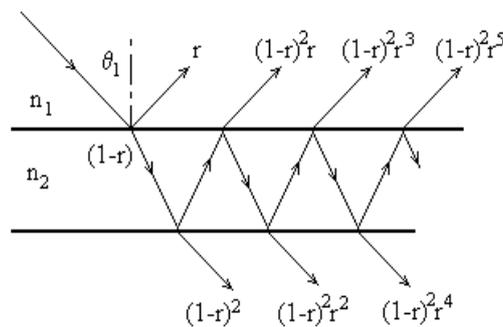


Figure 2.2- Multi réflexions –transmissions dans un milieu non absorbant

Et la loi de Snell :

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (1.9)$$

En traversant un milieu transparent, le rayon considéré subit une série de réflexions - absorptions - transmissions (voir figure 2.2). Les fractions totales transmises et réfléchies sont données, pour la composante //, par :

$$\begin{aligned}
 \tau_{//} &= (1-r_{//})^2 \tau_a + (1-r_{//})^2 \tau_a^3 r_{//}^2 + \dots \\
 \rho_{//} &= r_{//} + (1-r_{//})^2 \tau_a^2 r_{//} + (1-r_{//})^2 \tau_a^4 r_{//}^3 + \dots \\
 \alpha_{//} &= 1 - (\tau_{//} + \rho_{//})
 \end{aligned} \tag{1.10}$$

Avec :

$$\tau_a = e^{-kl} \quad (\text{Loi de Lambert-Bouguer}) \tag{1.11}$$

$k$  : coefficient d'extinction

$l$  : chemin optique

Ces séries peuvent se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned}
 \tau_{//} &= (1-r_{//})^2 / (1-r_{//}^2 \tau_a^2) \\
 \alpha_{//} &= (1-\tau_a)(1-r_{//}) / (1-r_{//} \tau_a) \\
 \rho_{//} &= r_{//} (1 + \tau_a \tau_{//})
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

La composante perpendiculaire est décrite par des expressions du même type. Les transmittivité, absorptivité et réflectivité du milieu considéré sont données par les demi-sommes des composantes parallèle et perpendiculaire, ainsi.

$$\tau = (\tau_{//} + \tau_{\perp}) / 2 \tag{1.13}$$

### **I.2.2- Transmittivité du rayonnement diffus :**

En faisant l'hypothèse que le rayonnement diffus est isotrope la transmittivité du diffus sera fonction de l'inclinaison du capteur.

Après intégration sur l'hémisphère, Beckman et al ont trouvé les résultats de la figure (2.3) qui donnent les angles d'incidences du rayonnement direct (angles équivalents) donnant le même résultat que le diffus, [36]

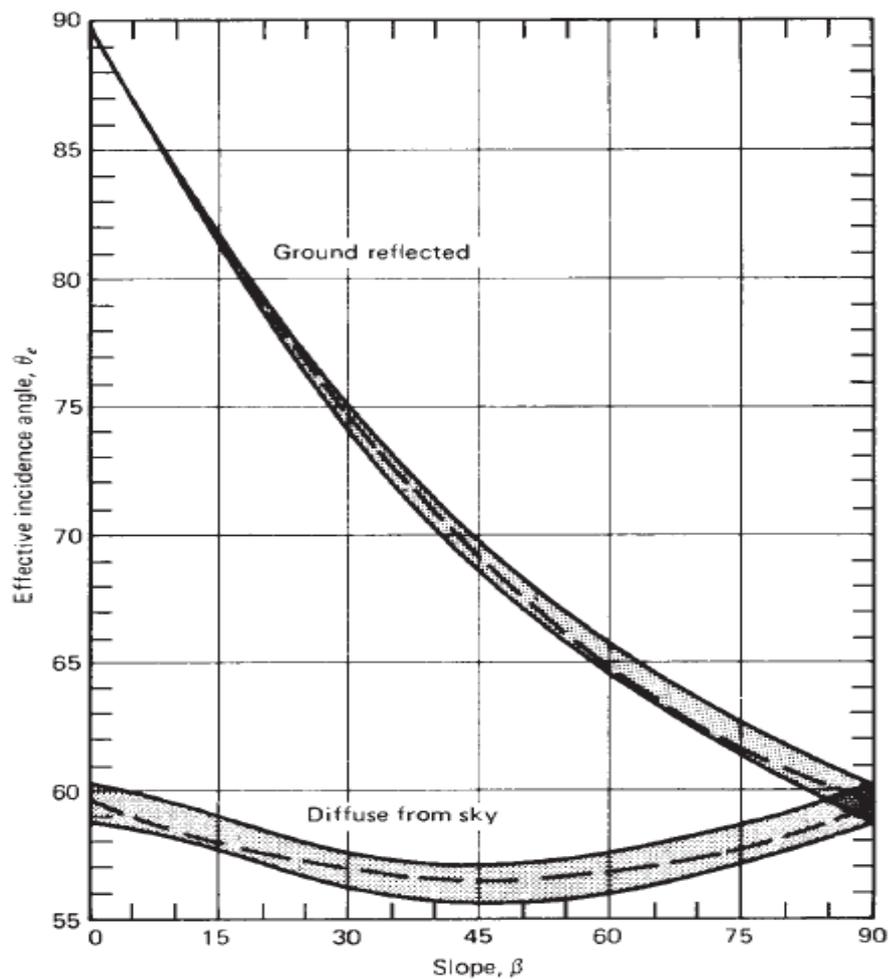
Après corrélation des résultats obtenus, les mêmes auteurs ont établi la relation suivantes, soit :

Pour le diffus sol, et :

$$\theta_{e,sol} = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \tag{1.13}$$

Pour le diffus ciel, et :

$$\theta_{e,ciel} = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \quad (1.13)$$



**Figure 2.3** - Variation de l'angle d'incidence de l'éclairement diffus ciel en fonction de l'inclinaison du capteur, [36]

### II.1- Produit ( $\tau \cdot \alpha$ ) effectif

L'éclairement transmis par le tube sera absorbé après multiples absorption et réflexions (voir **figure 2.4**). L'analyse du chemin optique d'un rayon incident

Montre que la sommation des quantités absorbées successivement est donnée par, [36] :

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{i=0}^{\infty} [(1 - \alpha)\rho_d]^i = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (1.14)$$

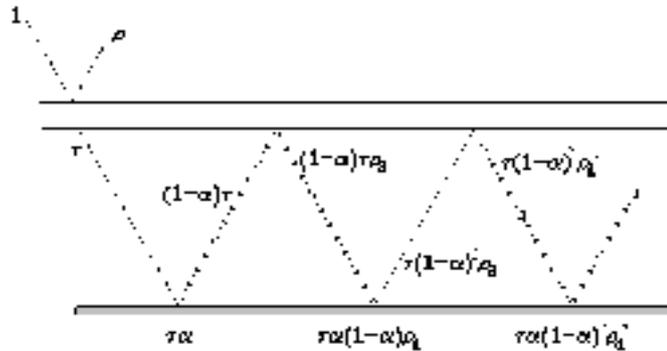


Figure 2.4 - Multi absorptions – réflexions entre l'absorbeur et le vitrage.

Ce calcul doit être effectué pour les 3 composantes du rayonnement incident sur le vitrage considéré.

## II.2- Eclairement reçu sur un plan incliné

### II.2.1- Angle d'incidence

Soit un capteur solaire incliné d'un angle  $\beta$  et orienté selon une direction faisant un angle  $\gamma$  avec la direction sud (figure ci- jointe). Si on désigne par  $\vec{s}$  le vecteur portant la direction des rayons solaires et par  $\vec{n}$  la normale au plan incliné, les coordonnées des 2 vecteurs sont données par, [36].

$$\vec{n} \begin{vmatrix} \sin \beta \cos \gamma \\ \sin \beta \sin \gamma \\ \cos \beta \end{vmatrix} \quad \vec{s} \begin{vmatrix} \cos h \cos a \\ \cos h \sin a \\ \sin h \end{vmatrix}$$

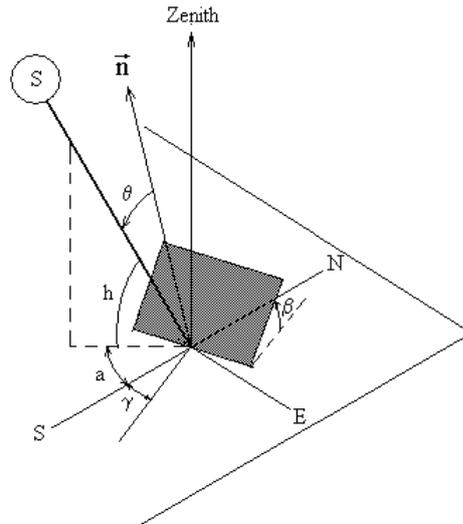


Figure 2.5- Plan incliné avec repérage des angles

L'angle d'incidence des rayons directs (angle formé par les 2 vecteurs) sera donné par :

$$\begin{aligned} \cos \theta = \vec{n} \cdot \vec{s} = \sin h \cos \beta + \sin \beta \cos \gamma \cos a \cos h \\ + \sin a \cos h \sin \beta \sin \gamma \end{aligned} \quad (1.15)$$

Ou encore :

$$\begin{aligned} \cos \theta = \sin \varphi \sin \delta \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma \\ + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (1.16)$$

Pour une orientation plein sud ( $\gamma = 0$ ), l'expression devient

$$\begin{aligned} \cos \theta = \sin \delta (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta) \\ + \cos \delta \cos \omega (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta) \\ = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos \omega \cos(\varphi - \beta) \end{aligned} \quad (1.17)$$

Ou

$$\cos \theta = \sin h \cos \beta + \sin \beta \cos a \cos h \quad (1.18)$$

### II.2.2- Coefficient de correction géométrique ( $R_b$ ) :

L'éclairement direct reçu sur un plan incliné est donné par, [36]

$$I_\beta = I_n \cos \theta / \sin h = R_b I_n$$

Avec  $R_b$  : coefficient géométrique donné par

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\sin h} \quad (1.19)$$

$h$  : la hauteur soleil.

### **II.2.3- Eclairage direct, diffus ciel, diffus sol:**

Selon les modèles proposés, par Brichanbaut : Capderou, [3] les composants de l'éclairage solaire peuvent être estimés pour l'Algérie

- $I_d=125\sin h^{0.4}$   $I_d$  : éclairage diffus
- $I_g=1080\sin h^{1.22}$   $I_g$  : éclairage global (1.20)
- $I_b=I_g-I_d$   $I_b$  : éclairage direct

### **II.2.4- Eclairage absorbé par la plaque absorbante ( $I_{abs}$ ) :**

La relation donnant l'éclairage  $I_{abs}$  est donnée par, [36] :

$$I_{abs} = R_b I_b (\tau\alpha)_{eff,b} + \frac{1+\cos\beta}{2} (\tau\alpha)_{eff,dc} I_d + \rho_s \frac{1-\cos\beta}{2} (\tau\alpha)_{eff,ds} I_g \quad (1.21)$$

$\rho_s$  : Albédo.

### **II.2.5- Eclairage reçu par un plan incliné ( $I_b$ ):**

La relation donnant l'éclairage incident sur le plan et donnée par, [36]

$$I_b = R_b I_b + \frac{1+\cos\beta}{2} I_d + \rho_s \frac{1-\cos\beta}{2} I_g \quad (1.22)$$

### **II.3- Rendement optique du capteur :**

Le rendement optique est donné par la relation, [36] :

$$\eta_o = \frac{I_{abs}}{I_b} \quad (1.23)$$

#### II.4- Bilan thermique sur un capteur solaire plan

Un capteur solaire plan est un système thermodynamique ouvert (voir la figure 2.7) entretenant des échanges thermiques avec l'environnement et traversé par un flux massique  $\dot{m}$ , [36].

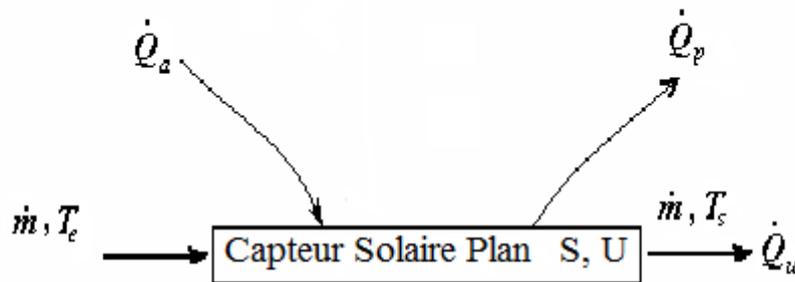


Figure 2.7 - Bilan d'énergie sur un capteur plan

En régime permanent, un bilan d'énergie sur un volume de contrôle représenté par les limites du capteur permet d'écrire :

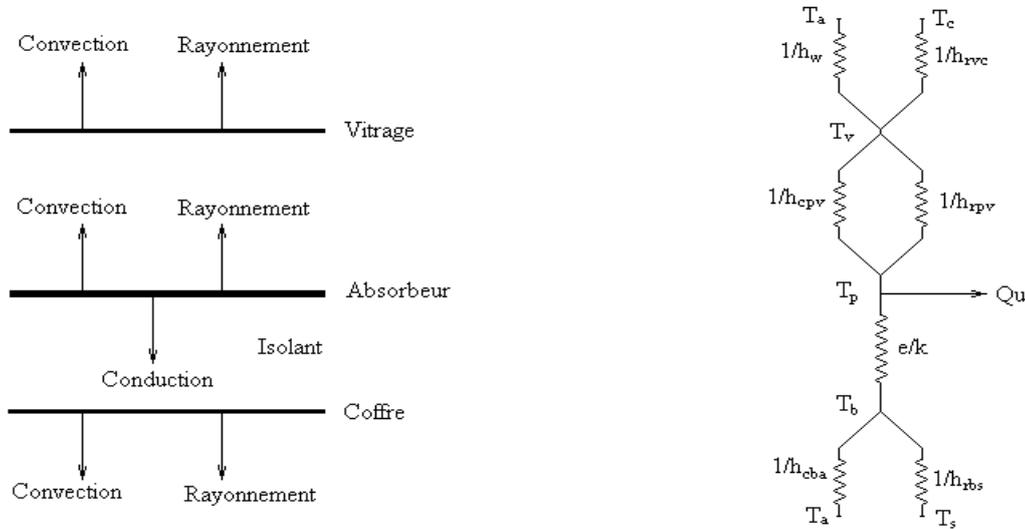
$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_a - \dot{Q}_p \quad (1.23)$$

Avec :

$Q_a$  : puissance solaire absorbé par la plaque absorbante [W]

$Q_p$  : Puissance thermique cédée à l'environnement [W]

$Q_u$  : Puissance thermique utile récupérée par le fluide caloporteur [W]



**Figure 2.7-** Echanges thermiques Capteur – ambiance

La figure 2.7- Représentent les différents échanges thermiques entre le capteur et son environnement ainsi que le schéma électrique équivalent.

Les pertes thermiques se subdivisent en :

- Pertes avant  $Q_{av}$
- Pertes arrière  $Q_{ar}$
- Pertes latérales  $Q_{lat}$

**II.4.1- pertes avant :**

En négligeant l'absorptivité du vitrage, un bilan d'énergie sur le ce dernier en régime permanent permet d'écrire, [36] :

$$\dot{Q}_{av} = \dot{Q}_{rpv} + \dot{Q}_{cpv} = \dot{Q}_{rvc} + \dot{Q}_w \quad (1.24)$$

Avec :

$\dot{Q}_{rvc}$  : Echanges radiatifs Vitrage – Ciel

$\dot{Q}_w$  : Echanges convectifs du couvert dû à l'effet du vent.

$\dot{Q}_{rpv}$  : Echanges radiatifs entre l'absorbeur et le vitrage.

$\dot{Q}_{cpv}$  : Echanges convectifs entre l'absorbeur et le vitrage

En désignant par  $A$  la surface du vitrage et en supposant que les températures vitre et plaques sont respectivement uniformes, les différentes quantités d'énergie, échangées par unité de temps, sont données par :

$$d\dot{Q}_w = h_w (T_v - T_a) dA \quad (1.25)$$

$$dQ_{rvc} = h_{rvc} (T_v - T_a) dA \quad (1.26)$$

$$dQ_{cpv} = h_{cpv} (T_p - T_v) dA \quad (1.27)$$

$$dQ_{rpv} = h_{rpv} (T_p - T_v) dA \quad (1.28)$$

Avec:

$$h_{rvc} = \varepsilon_v \sigma \frac{(T_v^4 - T_c^4)}{(T_v - T_a)} \quad (1.29)$$

Hypothèse : que le ciel est un corps Noir

Et

$$h_{rpv} = \frac{\sigma (T_p^2 + T_v^2)(T_p + T_v)}{\frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p} + \frac{1}{F_{pc}} + \frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v}} \quad (1.30)$$

Avec : l'hypothèse plans // infinies

$T_p$  : Température de la plaque [°C]

$T_a$  : Température ambiante [°C]

$T_v$  : Température de vitrage [°C]

$T_c$  : Température de ciel [°C]

$\varepsilon_p$  : Émissivité de la plaque

$\varepsilon_v$  : Émissivité de vitrage

$\sigma$  : constante de Stefan Boltzman ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{K}^4$ )

$$T_c = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (\text{Swemkle, [36]}) \quad (1.31)$$

$F_{pc}$  : Facteur de forme entre la plaque et la couverture

Le coefficient de transfert par convection due au vent peut être estimé par la relation de Wattmuf qui donne, [36]

$$h_w = 2.8 + 3V \quad (1.32)$$

$V$  étant la vitesse du vent

Le coefficient de transfert par convection entre l'absorbeur et le vitrage peut être estimé par la relation de Hollands, [36] qui donne :

$$N_U = \left[ 1 + \left[ 1 - \frac{1708}{R_a \cos \theta} \right]^+ \left[ 1 - \frac{1708(\sin 1.8\theta)^{1.6}}{R_a \cos \theta} \right] + \left[ \left[ \frac{R_a \cos \theta}{5830} \right]^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+ \right] \quad (1.33)$$

Avec :

$R_a$  : Nombre de Rayleigh

$\theta$  : Angle d'inclinaison par rapport à la verticale

Ou les termes en (+) sont utilisés seulement dans le cas où ils sont positifs.

Les pertes avant sont donc données par :

$$\begin{aligned} d\dot{Q}_{av} &= (h_{rvc} + h_w)(T_v - T_a) dA \\ &= (h_{cpv} + h_{rpv})(T_p - T_v) dA \end{aligned}$$

Éliminant  $T_v$  entre les 2 équations ; il vient

$$d\dot{Q}_{av} = U_{av} (T_p - T_a) dA \quad (1.34)$$

$U_{av}$  étant le coefficient de pertes global vers l'avant du capteur donné par :

$$U_{av} = \left[ \frac{1}{h_{rvc} + h_w} + \frac{1}{h_{cpv} + h_{rpv}} \right]^{-1} \quad (1.35)$$

Ce coefficient est fonction des différentes températures. Il ne peut donc être calculé que par un procédé itératif sur les différentes températures. Raison pour laquelle Klein (Klein, 1974) a proposé une relation explicite. Relation corrigée successivement par

Agarwal et Larson (Agarwal et Larson, 1981) puis Francey et Papaioannou (Francey et Papaioannou, 1985). La relation de Klein s'écrit :

$$U_{av} = \left[ \frac{N}{\frac{C}{T_p} \left( \frac{T_p - T_a}{N + f} \right)^e} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \frac{(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591Nh_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_p}{e_v} - N} \quad (1.36)$$

Avec:

$$C = 520(1 - 0.000051\beta^2)$$

$$e = 0.43 \left( 1 - \frac{T_p}{100} \right)$$

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.116h_w\varepsilon_p)(1 + 0.07866N)$$

N : nombre de vitrages

$$h_w = 5.8 + 3.8V \quad (\text{Relation de Macadams, [30]})$$

Selon les auteurs, cette relation est valable pour :

$$0.95 < \varepsilon_p < 1 \quad \text{et} \quad 0 < \beta < 70$$

#### **II.4.2- Pertes arrière et latérales**

Pour les pertes à l'arrière (dos du capteur) et les pertes latérales, on supposera, compte tenu de l'isolation, que la face externe du capteur (coffre ou bac) est à la température ambiante. Ce qui signifie que les échanges font par se conduction, à travers l'isolant, seule. Soit, en désignant par  $e$  et  $k_{is}$  l'épaisseur et la conductivité de l'isolant, respectivement, [30] :

$$\dot{Q}_{ar} = A \frac{k_{is}}{e} (T_p - T_a) = A U_{ar} (T_p - T_a) \quad (1.37)$$

De même on aura

$$\dot{Q}_{lat} = A_{lat} \frac{k_{is}}{e} (T_p - T_a) = A_{lat} U_{lat} (T_p - T_a) \quad (1.38)$$

Les pertes globales sont données par :

$$\begin{aligned}\dot{Q}_p &= \dot{Q}_{av} + \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{lat} = A \left[ U_{av} + U_{ar} + \frac{A_{lat}}{A} U_{lat} \right] (T_p - T_a) \\ &= A U_g (T_p - T_a)\end{aligned}\quad (1.39)$$

Avec :

$T_p$  : Température de la plaque [°C]

$T_v$  : Température de vitre [°C]

$T_a$  : Température ambiante [°C]

$T_c$  : Température de ciel [°C]

$U_g$  : Coefficient de pertes global

$h_w$  : Coefficient de transfert convectif du au vent [ $W/m^2K$ ]

$\varepsilon_p$  : Émissivité de la plaque absorbante

$\varepsilon_v$  : Émissivité de vitrage

### II.5.1 - Bilan énergétique sur un élément de l'absorbeur

Pour les capteurs plans à fluide liquide (généralement de l'eau), l'absorbeur utilisé est constitué d'une plaque intimement liée à un faisceau tubulaire parcouru par un fluide caloporteur, [36].

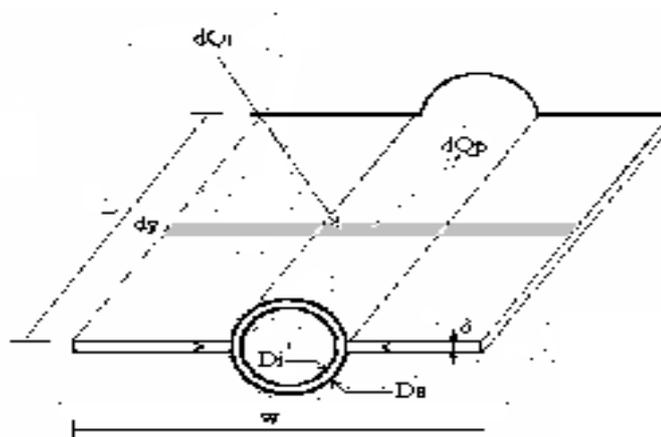


Figure 2.8- Bilan thermique sur un élément de surface

En négligeant la résistance de contact, le système peut être assimilé à un ensemble de tubes à ailettes, montés en parallèle et travaillant dans les mêmes conditions. En désignant par  $F$  l'efficacité de l'ailette, un bilan d'énergie sur un élément du système tube – ailette permet d'écrire, (voir figure 2.9) :

$$d\dot{Q}_u = d\dot{Q}_i - d\dot{Q}_p = [(\tau\alpha)_e I_g - U_g (T_p - T_a)](D_e + (w - D_e)F) dy \quad (1.40)$$

Le rendement de l'ailette étant donné par, [36] :

$$F = \frac{th\left(b\left(\frac{w - D_e}{2}\right)\right)}{b\left(\frac{w - D_e}{2}\right)} \quad \text{Avec :} \quad b^2 = \frac{U_g}{k \delta} \quad (1.41)$$

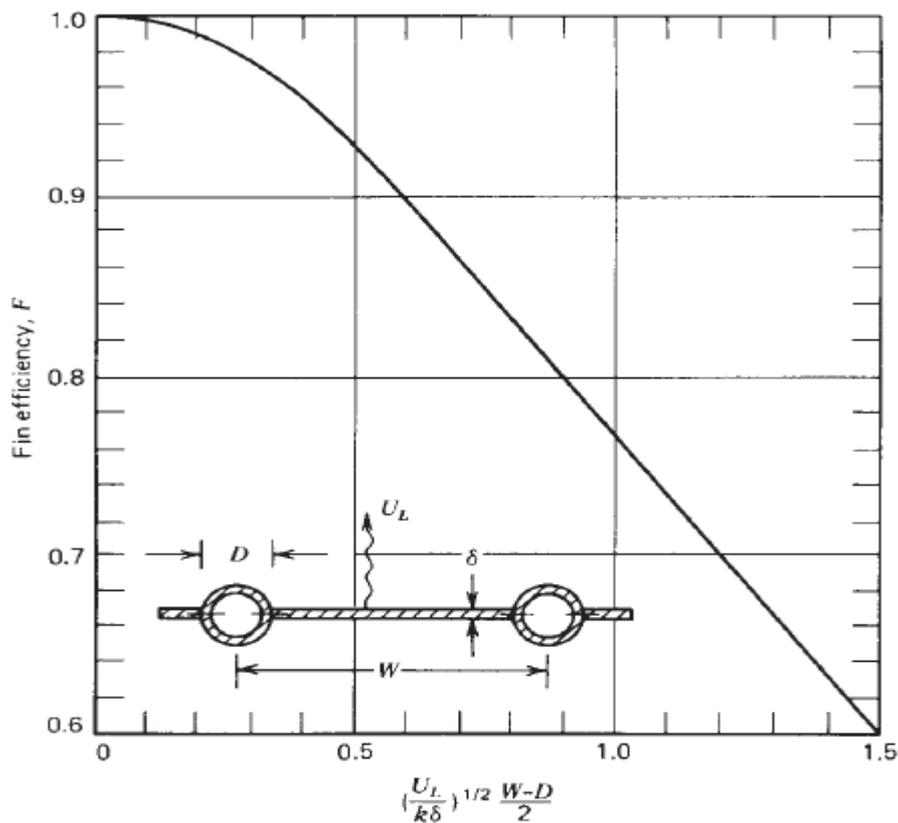
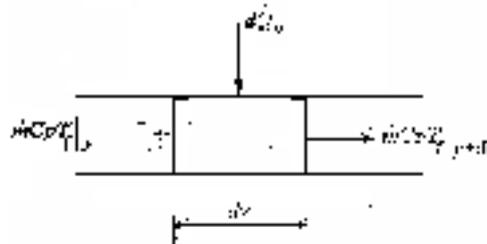


Figure 2.9- Efficacité de l'ailette, [36]

**II.5.2 -Bilan énergétique sur un élément de fluide**

La puissance thermique récupérée par la paroi externe du tube est ensuite transférée au fluide caloporteur, par conduction à travers la paroi du tube puis par convection vers le fluide caloporteur, à l'aide de l'équation suivante, [36] (voir figure 2. 11) :



**Figure 2.10-** Bilan thermique sur un élément de fluide

$$d\dot{Q}_u = \frac{T_p - T_f}{\frac{\delta}{\pi D_i k} + \frac{1}{\pi D_i h_f}} dy \quad (1.42)$$

En négligeant :

Les pertes par conduction à travers le tube.

Les pertes par conduction à travers la soudure.

Avec

$\delta$ : Epaisseur du tube

$T_f$ : Température moyenne du fluide

$h_f$ : coefficient de transfert de chaleur par convection fluide-paroi

D'après les relations (1.40) et (1.42) on peut écrire :

$$\frac{d\dot{Q}_u}{dy} \frac{1}{U_g (D_e + (w - D_e)F)} = (\tau\alpha)_e \frac{I_g}{U_g} - T_p + T_a \quad (1.43)$$

$$\frac{d\dot{Q}_u}{dy} \left[ \frac{\delta}{\pi D_i k} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right] = (T_p - T_f)$$

En éliminant la température  $T_p$  entre les 2 équations il vient :

$$d\dot{Q}_u \left[ \frac{1}{U_g (D_e + (w - D_e)F)} + \frac{\delta}{\pi D_i k} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right] = \left[ (\tau\alpha)_e \frac{I_g}{U_g} - (T_f - T_a) \right] dy$$

Ou encore :

$$d\dot{Q}_u = F' \left[ (\tau\alpha)_e I_g - U_g (T_f - T_a) \right] w dy \quad (1.44)$$

$$F' = \frac{1/U_g}{w \left[ \frac{1}{U_g (D_e + (w - D_e)F)} + \frac{\delta}{\pi D_i k} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right]} \quad (1.45)$$

Le coefficient  $F'$  est appelé efficacité de l'absorbeur. Il représente le rapport de la résistance thermique plaque - ambiance à la résistance thermique fluide – ambiance, [36]

$$F' : \text{Efficacité de l'absorbeur} = \frac{\text{Résistance plaque-Ambiance}}{\text{Résistance fluide-Ambiance}}$$

### II.5.2 - Facteur de conductance

Un bilan d'énergie sur un volume de contrôle, du fluide caloporteur, limité par le tube ayant une largeur  $dy$ , permet d'écrire, [36].

$$\dot{m}Cp \frac{dT_f}{dy} - n w F' \left[ (\tau\alpha)_e I_g - U_g (T_f - T_a) \right] = 0 \quad (1.46)$$

Avec :

$\dot{m}$  : Débit total du fluide caloporteur

$n$  : Nombre du tub

Ou encore :

$$\frac{\dot{m}Cp}{n w F' U_g} \frac{dT_f}{dy} + T_f - T_a - (\tau\alpha)_e \frac{I_g}{U_g} = 0 \quad (1.47)$$

En posant :

$$\theta = T_f - T_a - (\tau\alpha)_e \frac{I_g}{U_g}$$

L'équation devient :

$$\frac{\dot{m}Cp}{nwF'U_g} \frac{d\theta}{dy} + \theta = 0$$

Après intégration entre les extrémités du tube, il vient

$$\frac{T_s - T_a - (\tau\alpha)_e I_g / U_g}{T_e - T_a - (\tau\alpha)_e I_g / U_g} = \exp\left(-\frac{nwU_g F' L}{\dot{m} Cp}\right) \quad (1.48)$$

Avec  $T_e$  et  $T_s$  : températures du fluide à l'entrée et à la sortie, respectivement.

Ou encore :

$$T_s - T_e = (T_e - T_a - (\tau\alpha)_e I_g / U_g) \left[ \exp\left(-\frac{AU_g F'}{\dot{m} Cp}\right) - 1 \right] \quad (1.49)$$

Avec  $A$ : surface de captation

Comme par ailleurs, on a :

$$\dot{Q}_u = \dot{m} Cp (T_s - T_e)$$

Il vient

$$\dot{Q}_u = A Fr \left[ (\tau\alpha)_e I_g - U_g (T_e - T_a) \right] \quad (1.50)$$

Avec :

$$Fr = \frac{\dot{m} Cp}{AU_g} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{AU_g F'}{\dot{m} Cp}\right) \right] \quad (1.51)$$

Le coefficient  $Fr$  ; [30] est appelé facteur de conductance du capteur. Il constitue, avec le coefficient de pertes global  $U_g$  et le rendement optique  $(\tau\alpha)_e$  les paramètres caractéristiques du capteur. Ils sont généralement donnés comme la forme de produits  $Fr(\tau\alpha)_e$  et  $FrU_g$ .

Ce modèle néglige la variation des coefficients d'échange de chaleur avec la température. Ceci, est parfaitement acceptable pour les capteurs travaillant à de basses températures.

## II.6 - Rendement instantané d'un capteur plan

Le rendement instantané (soit en régime permanent) du capteur solaire plan est donné par le rapport du flux de chaleur récupérée par le fluide: caloporteur à l'éclairement solaire reçu par le capteur, soit [30] :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A I_g} = \frac{A Fr [(\tau\alpha)_e I_g - U_g (T_i - T_a)]}{A I_g} \quad (1.52)$$

Ou encore :

$$\eta = Fr(\tau\alpha)_e - FrU_g \frac{T_i - T_a}{I_g}$$

Equation linéaire du modèle HWB.

Les produits  $Fr(\tau\alpha)_e$  et  $FrU_g$  représentent les paramètres caractéristiques des capteurs solaires plans. Ces caractéristiques, fournies par les constructeurs, sont établies par des labos selon des normes ou standards établis à cet effet (ASHRAE, NBS, Normes Européennes, Norme Australienne, Norme Iso,...).

Si on part de l'hypothèse que ces paramètres sont invariants (hypothèse du standard ASHER), La variation du rendement est représentée par une droite.

Toutefois, comme le rendement optique est très sensible à l'angle d'incidence, on introduit un facteur de correction noté  $k_{\tau\alpha}$ . L'expression du rendement devient :

$$\eta = k_{\tau\alpha} \left[ Fr(\tau\alpha)_e - FrU_g \frac{T_i - T_a}{I_g} \right] \quad (1.53)$$

Les caractéristiques du capteur étant établies à incidence normale.

On montre que :

$K_{\tau\alpha}$  : Facteur de correction.

### **III.1- Modélisation des pertes thermiques d'un capteur solaire plan**

Le modèle de Klein et al est assez complexe. Donc l'objectif de ce présent travail est le développement une équation mathématique qui permet d'estimer les pertes avant. Pour cela nous avons recensé les paramètres qui influencent sur les pertes avant du capteur. A savoir : température d'entrée, température ambiante, émissivité de vitrage, émissivité de la plaque, la vitesse du vent, nombre de vitrage et l'épaisseur de la lame d'air. L'aide d'un modèle polynomial, donc plus simple.

### **III.2- Effet du vitrage**

Les vitrages ou couvertures vitrées (en verre ou en plastiques) sont utilisés en tant que cloisons pour séparer 2 milieux (habitations, armoires,...) mais également pour atténuer les échanges convectifs et créer l'effet de serre dans les applications solaires. Selon ses propriétés le vitrage pourra être assimilé à un milieu transparent ou semi transparent.

### **III.3- Propriétés des vitrages :**

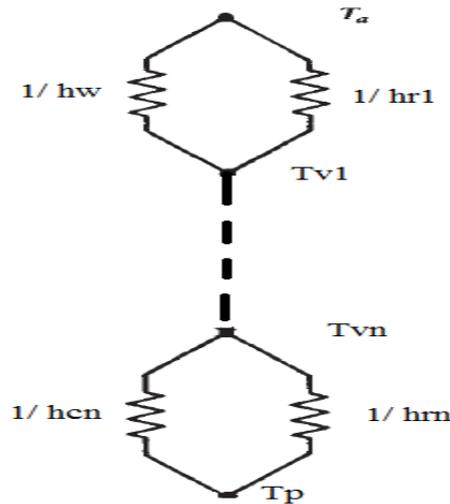
Les propriétés optiques d'un vitrage sont le coefficient d'extinction  $k$  et l'indice du milieu  $n$ . le coefficient d'extinction varie de  $4 \text{ m}^{-1}$  (verre blanc) à  $32 \text{ m}^{-1}$  (verre mauvaise qualité). L'indice du milieu varie selon la matière.

**Cas :  $N_v=1$  ( $N_v$  : Nombre de vitrages)**

Selon le schéma électrique présenté dans cette figure (2.7)

**Cas :  $N_v > 1$**

Les coefficients des pertes thermiques sont calculés de même manière. D'après le schéma électrique présent en figure 2.11.



**Figure 1.11-** Echange thermique capteur –ambiance plusieurs vitrages

A partir du schéma électrique équivalent on peut s'écrire :

$$U_{av} = \left[ \frac{1}{h_a} + \sum_{i=1}^{N_v} \frac{1}{h_i} \right]^{-1} \quad (1.54)$$

Avec :

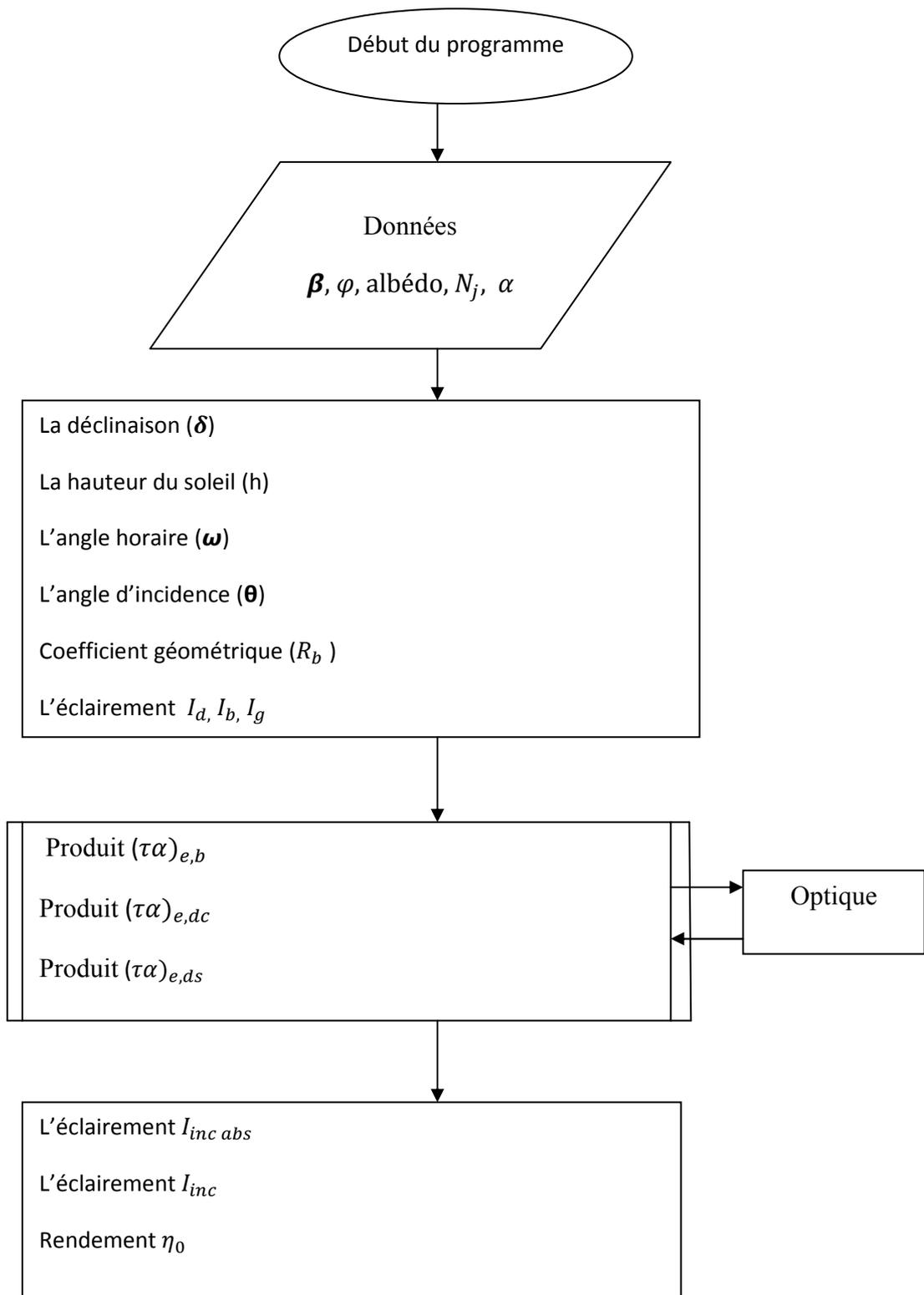
$N_v$  : Nombre de vitrage

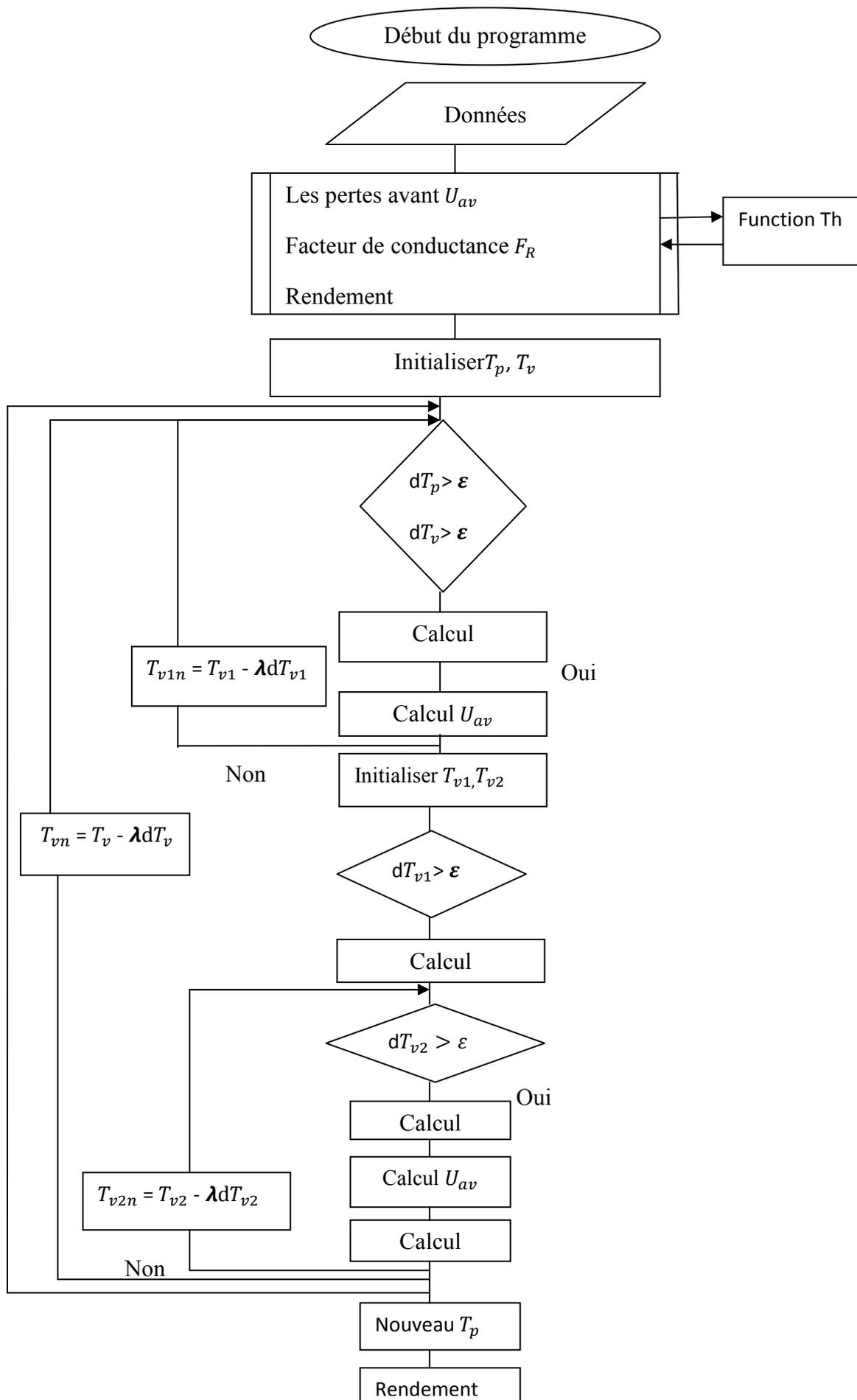
$1/h_a$  : Résistance thermique vitre – ambiance

$1/h_i$  : Résistance thermique plaque – vitre (ou vitre – vitre)

### III.4- Organigramme de calcul

L'organigramme permettant l'estimation du rendement instantané et en particulier les pertes avant d'un capteur solaire plan est représentée en figure





### **Conclusion**

Dans ce chapitre, on présente la partie théorique qui concerne le capteur solaire plan et la modélisation des paramètres qui influencer sur les pertes avant. Ensuite on à developpé un programme de simulation sous MATLAB

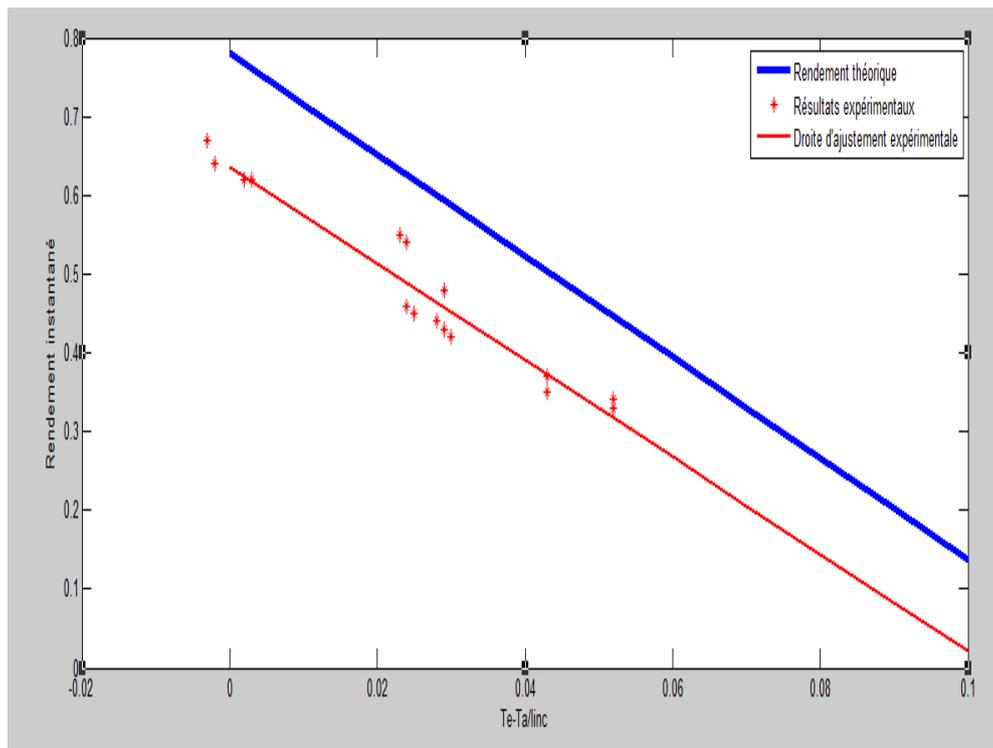
### Introduction

Le modèle mathématique qui découle de la méthode des plans d'expérience est un modèle multi polynomial de degré supérieur ou égal à 1 selon le programme étudié. Il peut également comprendre les produits de paramètres.

Aussi pour retenir le modèle et en déterminer les coefficients nous allons commencer par l'étude des réponses induites par les variations individuelles des paramètres retenues.

### III.1- Validation des résultats du programme de simulation

Les tests expérimentaux sur le prototype réalisé à la station ont été effectués en outdoor à Bouzaréah (36.8 deg de latitude Nord et 3 deg de long Est) durant l'automne. La comparaison entre les résultats théorique et expérimentaux est représentée en figure (3.1), [37].



**Figure 3.1-** Variation du rendement théorique et expérimental

On montre que :

- Il y a un écart important au niveau du rendement optique (glissement parallèle de la courbe). Cet écart est sûrement dû à la méconnaissance des caractéristiques des matériaux.

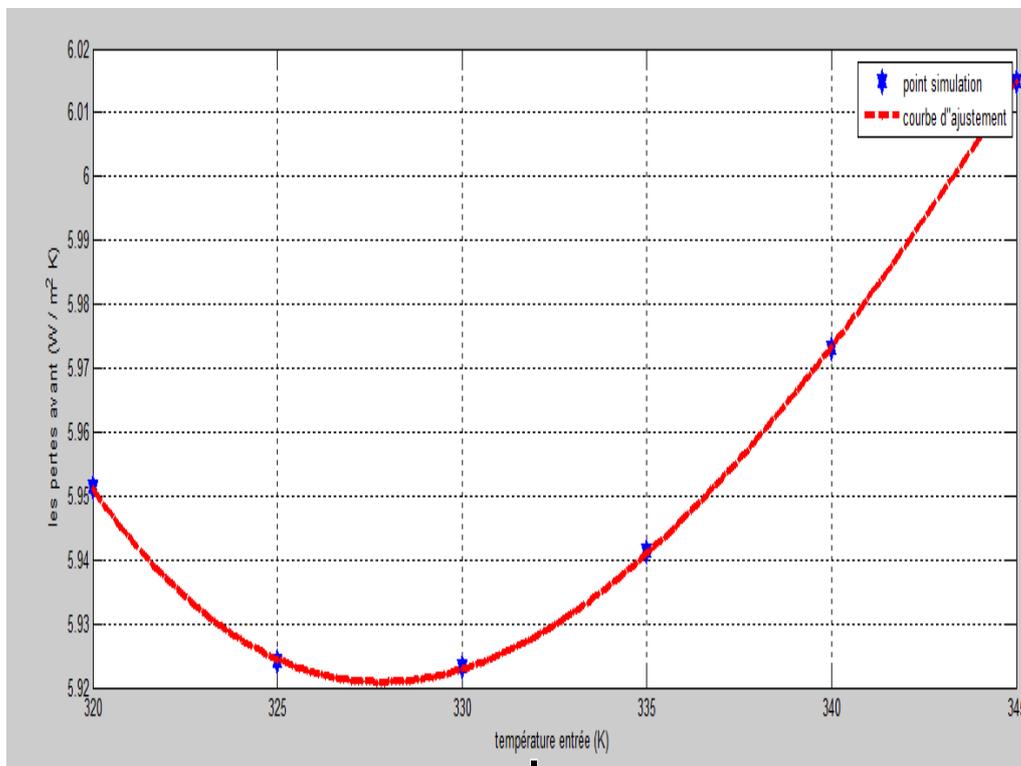
- Les pertes des 2 courbes sont identiques. Ce qui signifie que le coefficient de pertes thermiques est du même ordre.

Nous pouvons donc utiliser notre programme.

### III.2- Effet de la variation de la température d'entrée $T_e$ :

Avec :  $T_a = 300k$ ,  $320k < T_e < 345k$ ,  $E_p = 0.95$ ,  $E_v = 0.88$ ,  $e_{lame} = 0.05m$ ,  $V = 1m/s$ ,

Les résultats montre que lorsqu'on augmente la température d'entrée fait augmente les pertes vers l'avant sous forme cloche d'après la **figure (3.2)** suivante :



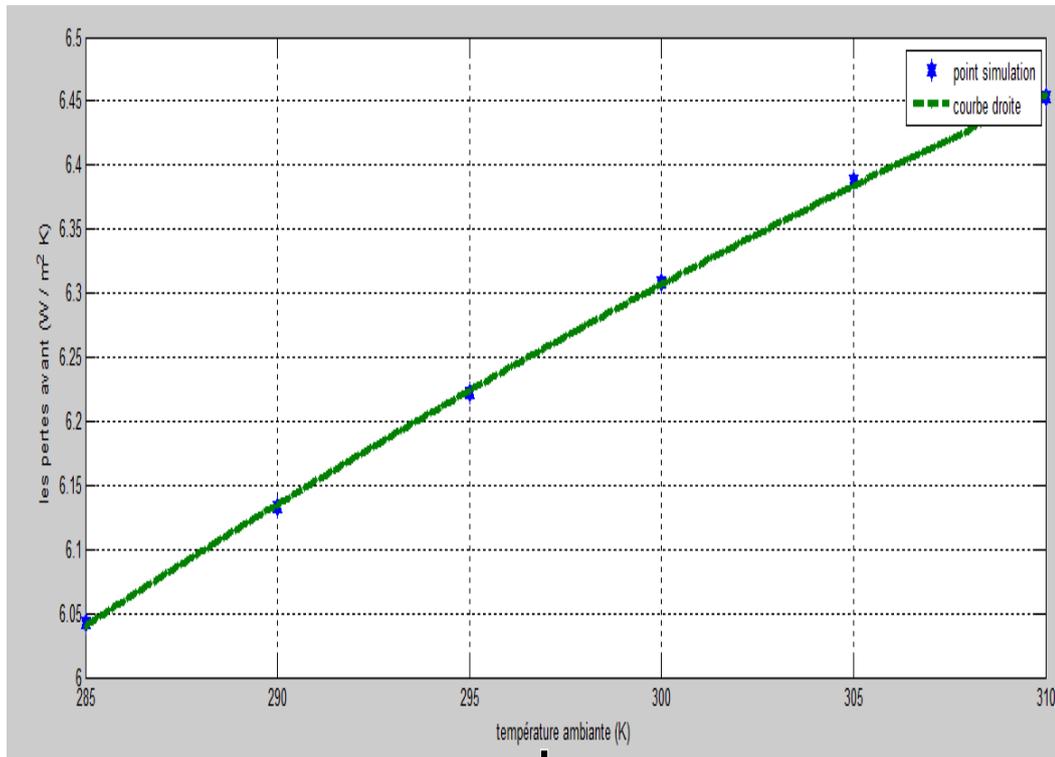
**Figure 3.2-** Variation des pertes avant en fonction de la température d'entrée

La réponse est donc du 2<sup>ème</sup> ordre.

### III.3- Effet de la variation de la température ambiante $T_a$

Avec :  $T_e = 320k$ ,  $285k < T_a < 310k$ ,  $E_p = 0.95$ ,  $E_v = 0.88$ ,  $e_{lame} = 0.05m$ ,  $v = 1m/s$ ,

On constate d'après la **figure (3.3)**: lorsqu'on augmente la température ambiante fait augmente les pertes vers l'avant linéairement.



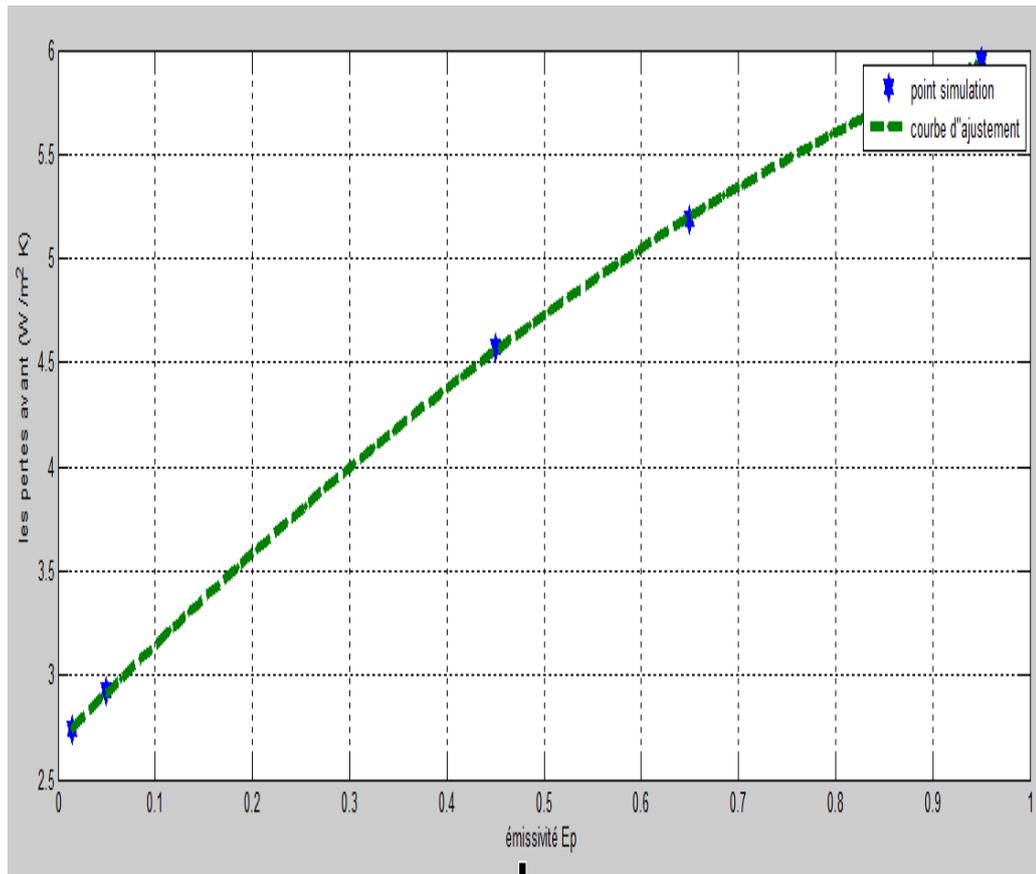
**Figure 3.3-** Variation des pertes avant en fonction de la température ambiante

La réponse peut être modélisée par l'ordre 1

### **III.3- Effet de la variation de l'émissivité de la plaque $E_p$**

Avec :  $T_e = 320\text{k}$ ,  $T_a = 300\text{k}$ ,  $E_v = 0.88$ ,  $e_{lame} = 0.05\text{m}$ ,  $V = 1\text{m/s}$ ,  $0.05 < E_p < 0.95$ ,

D'après la **figure (3.4)** lorsqu'on augmente l'émissivité de la plaque absorbante fait augmenter les pertes vers l'avant sous forme courbe.



**Figure 3.4-** Variation des pertes avant en fonction de l'émissivité de la plaque

La réponse peut être modélisée par l'ordre 1.

### **III.4- Effet de la variation de l'émissivité de vitrage $E_v$**

Avec :  $T_e = 320k$ ,  $T_a = 300k$ ,  $E_p = 0.95$ ,  $e_{lame} = 0.05m$ ,  $V = 1m/s$ ,  $0.70 < E_v < 0.95$ ,

A travers la **figure (3.5)** on remarque que l'augmentation de l'émissivité de vitrage fait augmenter les pertes vers l'avant linéairement.

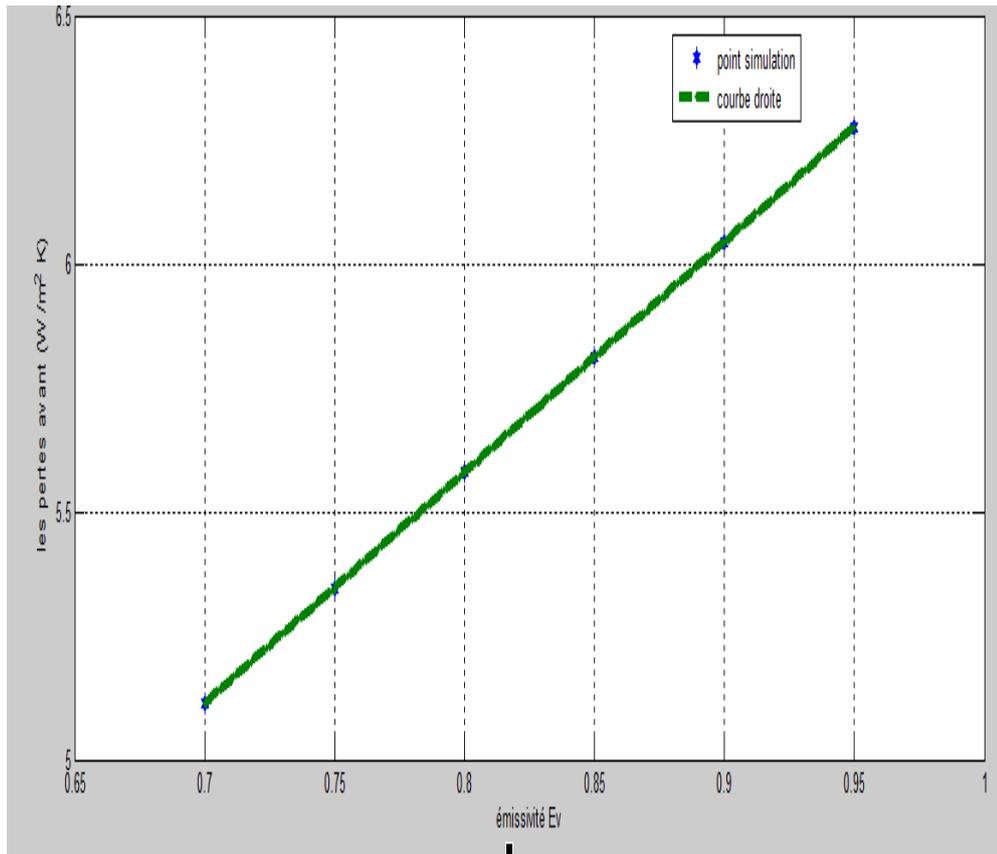


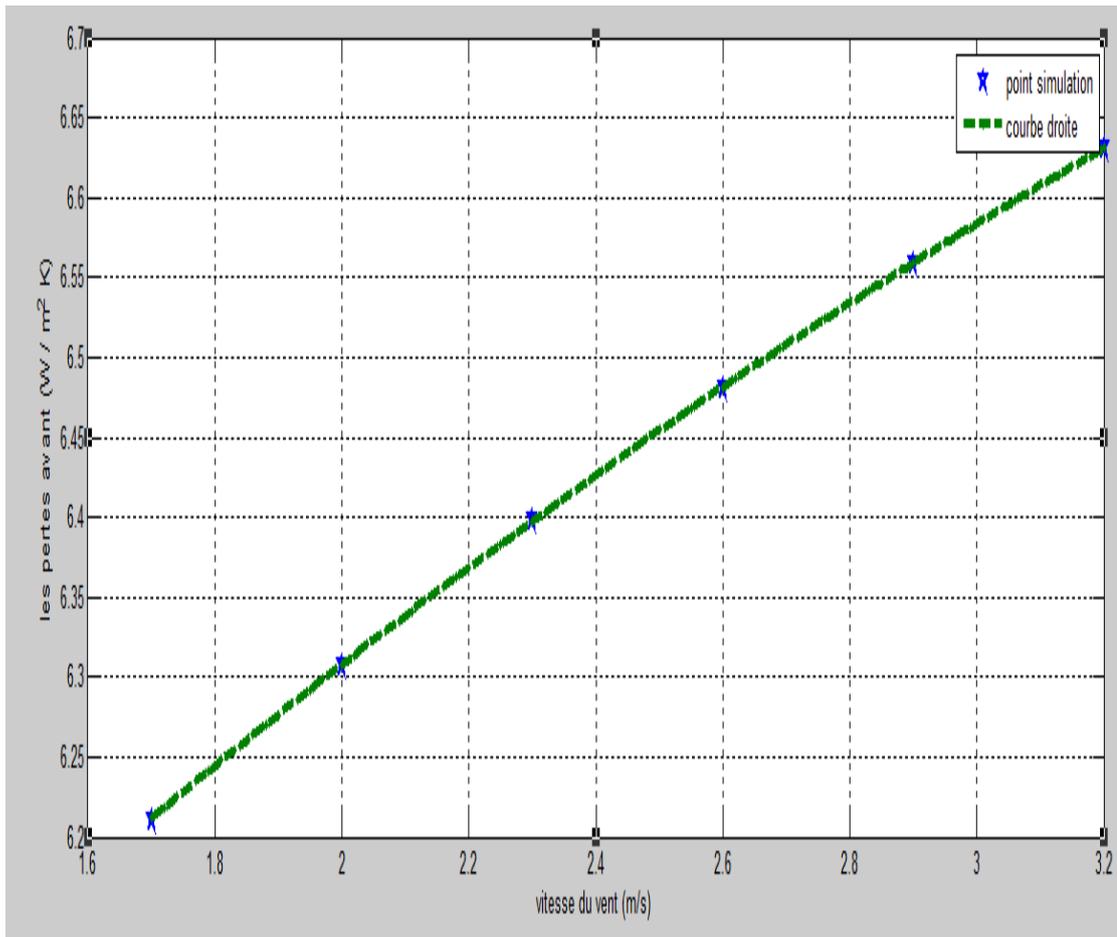
Figure 3.5- Variation des pertes avant en fonction de l'émissivité de vitrage

La réponse en peut être modélisé par l'ordre 1.

### III.5- Effet de la variation de la vitesse du vent V

Avec :  $T_e = 320k$ ,  $T_a = 300k$ ,  $E_p = 0.95$ ,  $E_v = 0.88$ ,  $e_{lame} = 0.05m$ ,  $1.7 < V (m/s) < 3.2$

A travers la **figure (3.6)** on remarque que l'augmentation de la vitesse du vent fait augmenter les pertes vers l'avant linéairement.



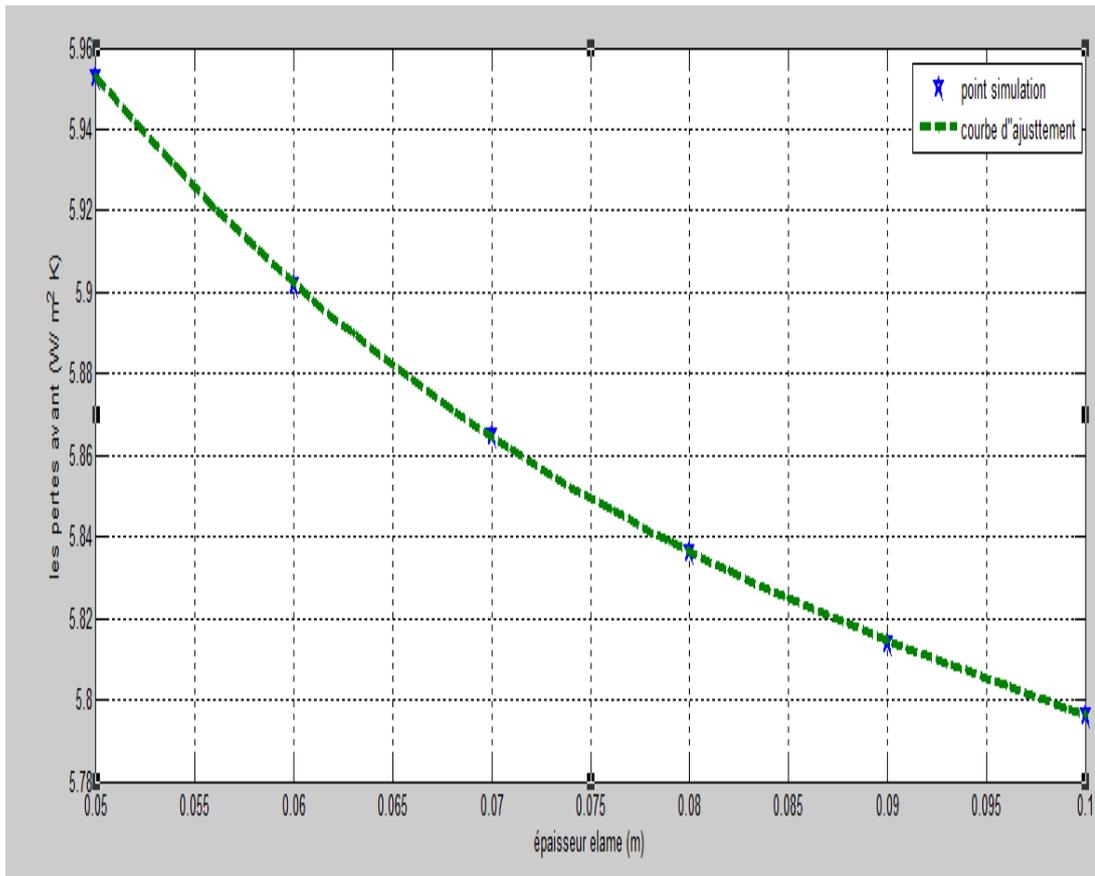
**Figure 3.6-** Variation des pertes avant en fonction de la vitesse du vent

La réponse peut être modélisée par l'ordre 1.

### **III.6- Effet de la variation de l'épaisseur de la lame d'air elame**

Avec :  $T_e = 328k$ ,  $T_a = 300k$ ,  $E_p = 0.95$ ,  $V = 1m/s$ ,  $E_v = 0.88$ ,  $0.05 < e_{lame}(m) < 0.1$ ,

On constate d'après la **figure (3.7)** l'augmentation de l'épaisseur de la lame d'air entre la plaque absorbante et la vitre entraîne une diminution des pertes vers l'avant comme représenté dans la figure



**Figure (3.7)-** Variation des pertes avant en fonction de l'épaisseur de la lame d'air

Cette variation en peut exprimer par un modèle 2<sup>ème</sup> ordre.

A la lumière de l'analyse des réponses individuelles le modèle retenu s'écrit :

$$U_{av} = a_0 + a_1 T_e + a_2 T_e^2 + a_3 T_a + a_4 E_p + a_5 E_v + a_6 V + a_7 h \quad (1.55)$$

Avec :

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$  : Coefficients

$T_e$  : Température d'entrée.

$T_a$  : Température ambiante.

$E_p$  : Émissivité de la plaque.

$E_v$  : Émissivité de vitrage.

$V$  : Vitesse du vent.

$h$  : Épaisseur de la lame d'air.

Ajoute :

Matrice générée par la simulation.

Méthode mathématique.

Le système d'équations décrivant le processus s'écrit, sous forme matricielle :

$$\mathbf{A} * \mathbf{X} = \mathbf{B}$$

Avec :

**A** : matrice de transfert dont les coefficients représentent les valeurs respectives effectuées aux différents paramètres, tel que :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{T}_{e1} & \mathbf{T}_{a1} & \cdots & \mathbf{h}_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{1} & \mathbf{T}_{e36} & \mathbf{T}_{a36} & \cdots & \mathbf{h}_{36} \end{bmatrix}$$

**B** : Vecteur réponse obtenu dont les éléments représentent les résultats obtenus, soit :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} U_{av1} \\ \vdots \\ U_{av36} \end{bmatrix}$$

**X** : vecteur inconnu dont les éléments représentent les coefficients du modèle à déterminer.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_7 \end{bmatrix}$$

La matrice  $A$  n'étant carrée (impossible à inverser). En multipliant par la matrice transposée (ce qui revient à appliquer la méthode des moindres carrés), il vient :

$$\text{Ou :} \quad \mathbf{X} = [\mathbf{A}^t \mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{A}^t \mathbf{B}]$$

Après résolution, on obtient les résultats suivants (coefficients du modèle polynomial retenu) :

$$a_0 = 104.06$$

$$a_1 = - 0.6541$$

$$a_2 = 0.001$$

$$a_3 = 0.0102$$

$$a_4 = 3.4743$$

$$a_5 = 5.4192$$

$$a_6 = 0.237$$

$$a_7 = - 7.3691$$

Après analyse des valeurs respectives des différents coefficients obtenus, on peut déduire que les paramètres les plus influents sont :

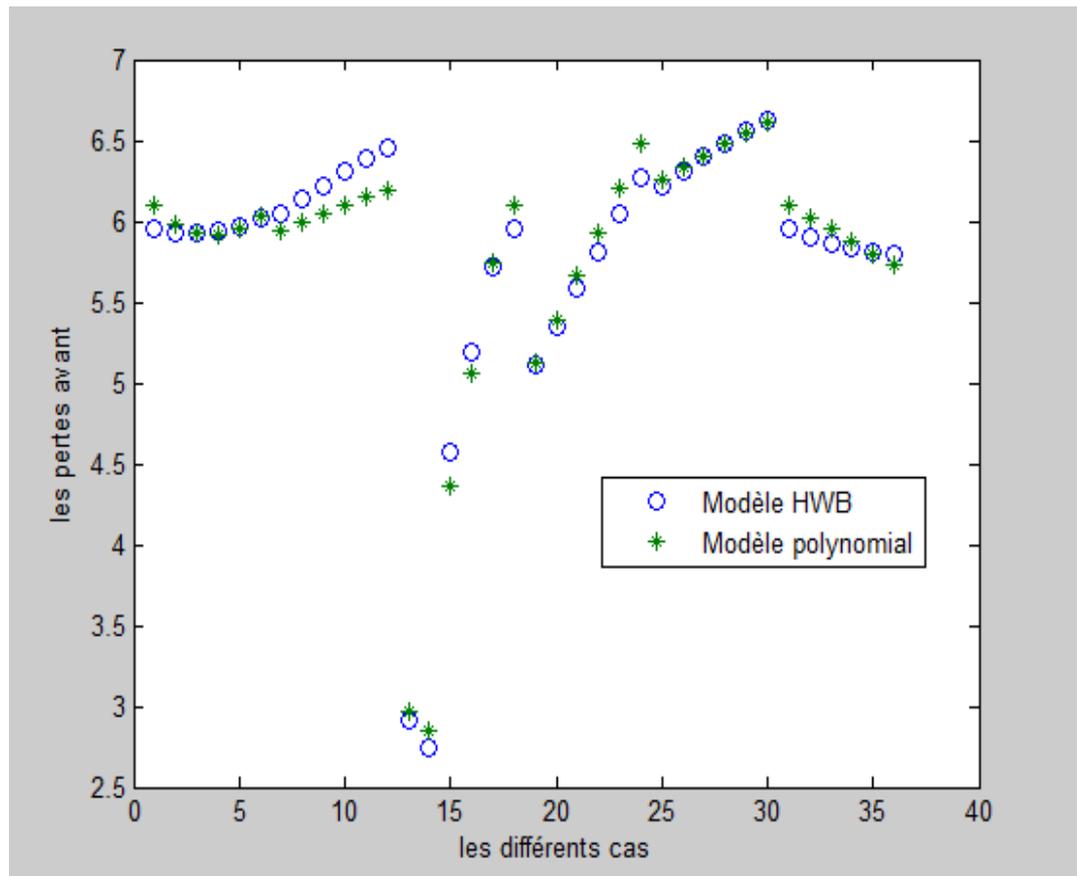
- L'émissivité de vitrage (coefficient  $a_5$  )
- L'émissivité de la plaque absorbante (coefficient  $a_4$ )
- L'épaisseur de la lame d'air (coefficient  $a_7$ )

Par ailleurs, il faut rappeler que la méthode des plans d'expérience exige un minimum de  $2^n$  tests (ou expériences). L'exposant  $n$  étant le nombre de paramètres retenus. Soit  $n=6$ , pour notre cas. Le nombre d'expériences est alors supérieur ou égal à :

$$2^n = 2^6 = 64 \text{ (points de simulation)}$$

Pour notre application nous avons opté pour 6 valeurs, par paramètre (réparties judicieusement), soit un nombre total de tests égal à 36. Ce qui peut être suffisant s'agissant de résultats de simulation.

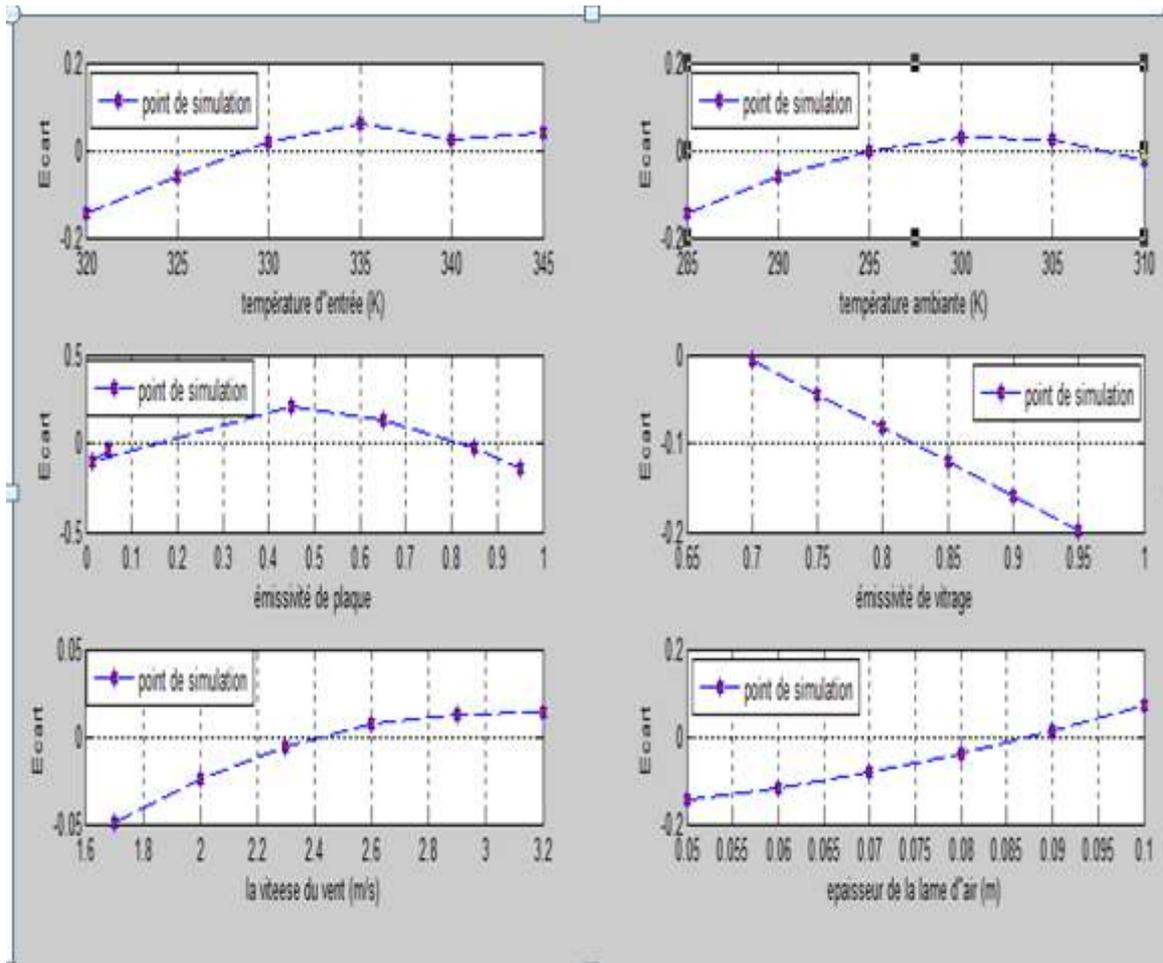
La figure (3.8) représente les résultats comparés entre le modèle théorique (modèle Hottel Woertz Bliss WB) et le modèle multi-polynomial.



**Figure 3.8-** Variation des pertes avant donnée par le modèle théorique et le modèle multi- polynomial

L'examen de la figure montre qu'il y a globalement une bonne adéquation. Les écarts les importants sont observés pour les points 7 à 12.

Les tracés de la figure 3.9 représentent les écarts obtenus pour chaque paramètre.



**Figure 3.9-** Variation des écarts entre le modèle théorique et modèle multi-polynomial pour les différents paramètres

L'écart maximal observé est dû à l'émissivité du vitrage, avec un écart de 3.3% pour une émissivité de 0.95. Valeur assez éloignée des cas courants (environ 0.88). Pour le reste les écarts sont inférieurs à 3%.

### Conclusion

Dans ce chapitre, on présente la validation des résultats du programme de simulation qui à montre que, il y a un écart au niveau du rendement optique. Cet écart est surement du la méconnaissance des caractéristiques des matériaux et les pertes des 2 courbes sont identique. Ce qui signifie que le coefficient de pertes thermiques et du même ordre.

On a développé un modèle mathématique qui permet de calculer les pertes avant. Le modèle est dit multi-polynomial selon le programme étudié. Pour retenir le modèle et en déterminer

les coefficients nous allons commencer par l'étude des réponses induits par les variations individuelles des paramètres retenues. A la fin on a fait une comparaison entre la variation des pertes avant donnée par le modèle théorique (HWB) et le modèle multi- polynomial est on à calculer l'erreur.

**Liste des figures**

<b>Figure 1.1</b> - Mouvement de la terre autour du soleil.....	2
<b>Figure 1.2</b> -Repérage de la position du soleil en coordonnées équatoriales.....	4
<b>Figure 1.3</b> - Repérage de la position du soleil en coordonnées horizontales.....	5
<b>Figure 1.4</b> - Une schématique d'un capteur solaire plan.....	8
<b>Figure 2.1</b> - Réfraction d'un rayon solaire dans un vitrage.....	20
<b>Figure 2.2</b> - Multi réflexions –transmissions dans un milieu non absorbant.....	20
<b>Figure 2.3</b> - Variation de l'angle d'incidence de l'éclairement diffus ciel en fonction de l'inclinaison du capteur.....	22
<b>Figure 2.4</b> - Multi absorptions – réflexions entre l'absorbeur et le vitrage.....	23
<b>Figure 2.5</b> - Plan incliné avec repérage des angles.....	24
<b>Figure 2.6</b> - Bilan d'énergie sur un capteur plan.....	26
<b>Figure 2.7</b> - Echanges thermiques Capteur – ambiance.....	27
<b>Figure 2.8</b> - Bilan thermique sur un élément de surface.....	31
<b>Figure 2.9</b> - Efficacités de l'ailette.....	32
<b>Figure 2. 10</b> - Bilan thermique sur un élément de fluide.....	33
<b>Figure 2.11</b> - Echange thermique capteur –ambiance plusieurs vitrages.....	38
<b>Figure 3.1</b> - Variation du rendement théorique et expérimental.....	42
<b>Figure 3.2</b> - Variation des pertes avant en fonction de la température d'entrée.....	43
<b>Figure 3.3</b> - Variation des pertes avant en fonction de la température ambiante.....	44
<b>Figure 3.4</b> - Variation des pertes avant en fonction de l'émissivité de la plaque absorbante.....	45

<b>Figure 3.5</b> -Variation des pertes avant en fonction de l'émissivité de vitrage.....	45
<b>Figure 3.6</b> -Variation des pertes avant en fonction de la vitesse du vent.....	46
<b>Figure 3.7</b> - Variation des pertes avant en fonction de l'épaisseur de la lame d'air.....	48
<b>Figure 3.8</b> - Variation des pertes avant donnée le modèle théorique et le modèle multi-polynomial.....	51
Figure 3.9- Variation des écarts entre le modèle théorique et le modèle multi-polynomial pour les différents paramètres.....	52

## Programme Informatique

```

%*****
%*****SMAILI KARIMA*****
%*****Promoteur: Dr.M.MERZOUK*****
%*****Promotion 2016*****

%*****Bibliothèque*****

```

```

function [Uav,Fr,Rdt,Ug] =
Th(Ev,Ta,Ep,elame,kis,eis,Abs,kabs,eabs,m,V,Iinc,Ia,T
e,Nv)

```

```

    Sigma = 5.67e-8;
    Nt=10; d=0.012; di=d-2e-3; w=9e-2;
    larg =Abs(1); long=Abs(2); Ec = Abs(3);
    Ac = larg*long; eislat=eis;
    hw = 2.8 + 3*V; Tc = 0.0552*Ta^1.5;
    Tp=Te+2; dTp=1;

    while abs (dTp) > .01

        if Nv==1
            dTv=1; Tv=Ta+10;

            while abs(dTv)>0.01

                Hrvc = Ev*sigma*(Tv.^4-Tc.^4)/ (Tv-Ta);

                Hrpv = sigma*(Tp.^2+Tv.^2)*(Tp+Tv)/ (1/Ev+1/Ep-1);

                [Rho, Mu, Nua, klame, Prair] = Pair ((Tp+Tv)/2);

                Nu=Nui (Tp, Tv, elame);

                Hcpv=Nu*klame/elame;

                h1=Hrvc+hw; h2=Hcpv+Hrpv;

                Tvn = (h2*Tp+h1*Ta)/ (h1+h2);

```

```

        dTv=Tvn-Tv; Tv= (Tvn+Tv)/2;
end

Uav = (1/h1 + 1/h2).^-1;

elseif Nv==2
    dTv1=1; Tv1=Ta+1; Tv2=Tv1+1;

While abs(dTv1)>0.01
    hr1=Ev*sigma*(Tv1.^4-Tc.^4)/(Tv1-Ta);
    hr2=Ev*sigma*(Tv2.^2+Tv1.^2)*(Tv2+Tv1);
    Nu=Nui(Tv2, Tv1, elame/5);
    [Rho, Mu, Nua, klame, Pr] = Pair((Tv2+Tv1)/2);
    hc2=Nu*klame/d; h1=hw+hr1; h2=hr2+hc2;
    Q= (1/h1 + 1/h2).^-1 *(Tv2-Ta);
    dTv2=1;
    while abs(dTv2)>0.01

hr2=Ev*sigma*(Tv2.^2+Tv1.^2)*(Tv2+Tv1);

hr3=Ev*sigma*(Tp.^2+Tv2.^2)*(Tp+Tv2);
    Nu=Nui(Tp, Tv2, elame);
    [Rho, Mu, Nua, klame, Pr] = Pair((Tp+Tv2)/2);
    hc3=Nu*klame/d; h3=hr3+hc3;
    %Q1= (hr3+hc3)*(Tp-Tv2);
    Tv2n=Tp-Q/h3;
    dTv2=Tv2n-Tv2; Tv2=Tv2n;
    end

    Tv1n=Ta+ (Q/(h1+h2)); dTv1=Tv1n-Tv1;
Tv1=Tv1n;
end

Uav= (1/h1 + 1/h2 + 1/h3).^-1;

else
    dTv1=1; Tv1=Ta+1; Tv2=Tv1+1; Tv3=Tv2+1;

while abs(dTv1)>0.01
    hr1=Ev*sigma*(Tv1.^4-Tc.^4)/(Tv1-Ta);
    hr2=Ev*sigma*(Tv2.^2+Tv1.^2)*(Tv2+Tv1);
    Nu=Nui(Tv2, Tv1, elame/5);
    [Rho, Mu, Nua, klame, Pr] = Pair((Tv2+Tv1)/2);

```

---

```

        hc2=Nu*klame/d; h1=hw+hr1; h2=hr2+hc2;
        Q=(1/h1 + 1/h2).^-1 *(Tv2-Ta);

        dTv2=1;
        while abs(dTv2)>0.01

hr2=Ev*sigma*(Tv2.^2+Tv1.^2)*(Tv2+Tv1);

hr3=Ev*sigma*(Tp.^2+Tv2.^2)*(Tp+Tv2);
        Nu=Nui(Tp,Tv2,elame);
        [Rho,Mu,Nua,klame,Pr] = Pair((Tp+Tv2)/2);
        hc3=Nu*klame/d; h3=hr3+hc3;
        %Q1=(hr3+hc3)*(Tp-Tv2);
        Tv2n=Tp-Q/h3;
        dTv2=Tv2n-Tv2; Tv2=Tv2n;
        end
        dTv3=1;
        while abs(dTv3)>0.01

hr3=Ev*sigma*(Tv3.^2+Tv2.^2)*(Tv3+Tv2);

hr4=Ev*sigma*(Tp.^2+Tv3.^2)*(Tp+Tv3);
        Nu=Nui(Tp,Tv3,elame);
        [Rho,Mu,Nua,klame,Pr] =
Pair((Tp+Tv3)/2);
        hc4=Nu*klame/d; h4=hr4+hc4;
        %Q1=(hr3+hc3)*(Tp-Tv2);
        Tv3n=Tp-Q/h4;
        dTv3=Tv3n-Tv3; Tv3=Tv3n;
        end

        Tv1n=Ta+(Q/(h1+h2)); dTv1=Tv1n-Tv1;
Tv1=Tv1n;
        end

        Uav=(1/h1 + 1/h2 + 1/h3 + 1/h4).^-1;

        end

        Uar=kis/eis;

        Alat=2*(larg+long)*Ec;

```

```

Ulat=(kis/eislat)*Alat/Ac;

Ug=Uav+Uar+Ulat;

b=sqrt(2*Ug/(kabs*eabs));

F=tanh((b*(w-d))/2)/(b*(w-d)/2);

hi=hfi(Tp,di,m*Ac/Nt);

F1=1./(w*Ug); F2=1./(Ug*(d+(w-d)*F))+1./(pi*d*hi);
Fabs =F1/F2;

[Rho,Muf,Pr,K,CpE] = Peau(Tp-273);

Fr = (m.*CpE./Ug).*(1-exp(-Ug.*Fabs./(m*CpE)));

Qu=Ac*Fr.*((Ia)-Ug*(Te-Ta));

Tp_n=Ta+(Ia/Ug)-Qu/(Ac.*Ug);

dTp=Tp_n-Tp;Tp=Tp_n;

end

Rdt = Qu/(Ac*Iinc);

end

```

### Programme pour calculée la matrice

```

clear
Te0=320; Ta0=300; Ep0=0.95; Ev0=0.88; V0=1; h0=0.05;
Te=[320 325 330 335 340 345]';
Ta=[285 290 295 300 305 310]';
Ep=[0.05 0.015 0.45 0.65 0.85 0.95]';
Ev=[0.7000 0.7500 0.8000 0.8500 0.9000 0.9500]';
V=[1.7000 2.0000 2.3000 2.6000 2.9000 3.2000]';
h=[0.0500 0.0600 0.0700 0.0800 0.0900 0.1000]';
Uav=[5.9512 5.9240 5.9232 5.9412 5.9730 6.0149 6.0422
6.1329 6.2216 6.3083 6.3878 6.4530 2.9203 2.7420
4.5669 5.1893 5.7169 5.9512 5.1136 5.3469 5.5797

```

```
5.8120 6.0439 6.2757 6.2115 6.3083 6.3980 6.4815
6.5589 6.6310 6.3088 6.2499 6.2074 6.1748 6.1493
6.1287]';
```

```
A=ones(36,8);X=ones(36,1);
X1=X*Te0;X1(1:6)=Te;
X2=X*Ta0;X2(7:12)=Ta;
X3=X*Ep0;X3(13:18)=Ep;
X4=X*Ev0;X4(19:24)=Ev;
X5=X*V0;X5(25:30)=V;
X6=X*h0;X6(31:36)=h;
A(:,2:8)=[X1 X1.^2 X2 X3 X4 X5 X6];
a=A\Uav;
Uc=A*a;
Er=norm(Uav-Uc);

xx=(1:36)';
plot(xx,Uav,'o',xx,Uc,'*')
legend('théorique du capteur','Modèle polynomial')
xlabel('les différents cas')
ylabel('les pertes avant')
```

**Nomenclateur**

Symboles	Désignation	Unité
$\delta$	Déclinaison	Degré
TSV	Temps solaire vrai	Heure
$E_t$	Equation du temps	min
D	Décalage	Heure
$T_l$	Temps local	Heure
$L_{ref}$	Longitude de référence	Degré
$L_{lieu}$	Longitude du lieu	Degré
$D_j$	Durée du jour	Heure
$R_b$	Coefficient de correction géométrique	/
$\theta_{e,sol}$	Angle d'équilibre diffus de sol	Degré
$\theta_{e,cil}$	Angle d'équilibre diffus du ciel	Degré
$I_{abs}$	Eclairement absorbé	W / m <sup>2</sup>
$I_g$	Eclairement global	W / m <sup>2</sup>
$I_d$	Eclairement diffus	W / m <sup>2</sup>
$I_b$	Eclairement direct	W / m <sup>2</sup>
$\rho_s$	Albédo	/
$I_b$	Eclairement reçu par un plan incliné	W / m <sup>2</sup>
$\eta_0$	Rendement optique	/
$Q_a$	Puissance solaire absorbé par la plaque absorbante	W
$Q_p$	Puissance thermique cédée à l'environnement	W
$Q_u$	Puissance thermique récupérée par le fluide caloporteur	W
$\omega$	L'angle horaire	Degré
$\varphi$	Latitude	Degré
h	La hauteur du soleil	Degré
a	L'azimut du soleil	Degré
k	Coefficient d'extinction	m <sup>-1</sup>
l	Chemin optique	m
$h_{rvc}$	Coefficient de transfert par rayonnement vitrage- ciel	W /m <sup>2</sup> K
$h_{rpv}$	Coefficient de transfert par rayonnement plaque- vitrage	W /m <sup>2</sup> K
$h_w$	Coefficient de transfert convectif du au vent	W /m <sup>2</sup> K
$T_c$	Température du ciel	K
$T_a$	Température ambiante	K

## Nomenclature

$T_p$	Température de plaque	K
$T_v$	Température de vitrage	K
$\varepsilon_p$	Emissivité de la plaque absorbante	/
$\varepsilon_v$	Emissivité de vitrage	/
$U_{av}$	Coefficient de perte thermique avant	W /m <sup>2</sup> K
$U_{lat}$	Coefficient de perte thermique latérale	W /m <sup>2</sup> K
$U_{ar}$	Coefficient de perte thermique arrière	W /m <sup>2</sup> K
$U_g$	Coefficient de perte thermique global	W /m <sup>2</sup> K
A	Surface du capteur	m <sup>2</sup>
e	Epaisseur de l'isolant arrière	m
$k_{is}$	Conductivité de l'isolant arrière	W / m K
$N_U$	Nombre de Nusselt	/
$R_a$	Nombre de Rayleigh	/
$e_v$	Epaisseur de vitrage	m
$D_e$	Diamètre externe de tube de l'absorbeur	m
$A_{lat}$	Surface latérale	m <sup>2</sup>
dy	Elément de la longueur du capteur	m
w	Largeur de l'ailette	m
F	Rendement de l'ailette	/
$D_i$	Diamètre interne du tube de l'absorbeur	m
$C_p$	Chaleur spécifique de l'eau	J / kg K
$h_f$	Coefficient de transfert par convection entre le fluide-paroi	W /m <sup>2</sup> K
$T_f$	Température de fluide	K
F'	Efficacité de l'absorbeur	/
n	Nombre de tubes	/
K	Conductivité de la plaque absorbante	W / m K
$F_R$	Facteur de conductance de l'absorbeur	/
$K_{\tau\alpha}$	Facteur de correction	/
$\eta$	Rendement global du capteur	/

## Nomenclateur

---

$\dot{m}$	Débit massique	kg / s m <sup>2</sup>
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzman	W / m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
OMM	Constante solaire	W / m <sup>2</sup>

**Introduction****Chapitre 1- Etude Bibliographique**

I - Le gisement solaire.....	1
I.1- Caractéristique du soleil.....	1
I.2- Constante solaire.....	1
I.3- Rayonnement solaire.....	1
I.4- Repérage de la position du soleil.....	2
I.5- Coordonnées équatoriales.....	2
I.5.1- La déclinaison ( $\delta$ ).....	2
I.5.2- Temps solaire vrai TSV.....	3
I.5.3- l'angle horaire ( $\omega$ ).....	3
II.1- Coordonnées horizontales.....	4
II.1.1- La hauteur de soleil (h).....	4
II.1.2- longitude (L).....	4
II.1.3- latitude ( $\varphi$ ).....	4
II.1.3- L'azimut du soleil (a).....	5
II.1.4- Angle horaire aux lever et coucher du soleil.....	5
III- Capteur solaire.....	6
III.1- Principe de fonctionnement.....	6
III.2- Effet de serre dans les capteurs solaires.....	7
III.3- Les différents types de capteurs solaires thermiques.....	7
III.3.1- Capteur à air.....	7
III.3.2- Capteur à eau.....	7
III.3.2-1- Les capteur non –vitrés.....	7
III.3.2-2- Les capteurs plans vitrés.....	8
III.3.2-3- Les capteurs à tube sous vide.....	8
III.4- Capteur solaire plan vitré.....	8
III.4.1- L'absorbeur.....	9

III.4.2- Le coffre.....	10
III.4.3- L'isolant.....	10
III.5- Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires.....	10
a- Paramètres externes.....	10
b- Paramètres internes.....	10
c- Paramètres de fonctionnement.....	10
III.6- Etude Bibliographique .....	18

## **Chapitre 2 - Modélisation des pertes thermique d'un capteur solaire plan**

I-Rendement optique .....	19
I.1- Calcul du rendement optique.....	19
I.2- Transmittivité d'un vitrage plan.....	19
I.2.1- Rayonnement Direct.....	19
I.2.2- Transmittivité de rayonnement diffus.....	20
II.1- Produit ( $\tau*\alpha$ ) effectif .....	22
II.2-Eclairement reçu sur un plan incliné.....	23
II.2.1- Angle d'incidence.....	23
II.2.2- Coefficient de correction géométrique ( $R_b$ ).....	24
II.2.3- Eclairement direct, diffus ciel, diffus sol.....	25
II.2.4- Eclairement absorbé par la plaque absorbante ( $I_{abs}$ ).....	25
II.2.5- Eclairement reçu par un plan incliné ( $I_b$ ).....	25
II.3- Rendement optique du capteur.....	25
II.4- Bilan thermique sur un capteur solaire plan.....	26
II.4.1- pertes avant.....	27
II.4.2- Pertes arrière et latérales.....	30
II.5.1 - Bilan énergétique sur un élément de l'absorbeur.....	31
II.5.2 -Bilan énergétique sur un élément de fluide.....	33

II.5.2 - Facteur de conductance.....	34
II.6 - Rendement instantané d'un capteur plan.....	36
III.1- Modélisation des pertes thermiques d'un capteur solaire plan.....	37
III.2- Effet de vitrage.....	37
III.3- Propriétés des vitrages.....	37
III.4- Organigramme de calcul .....	40

### **Chapitre 3 - Résultats et Discussions**

III.1- Validation des résultats du programme de simulation.....	42
III.2-Effet de la variation de la température d'entrée $T_e$ .....	43
III.3-Effet de la variation de la température ambiante $T_a$ .....	44
III.4-Effet de la variation de l'émissivité de la plaque absorbante $E_p$ .....	45
III.5-Effet de la variation de l'émissivité de vitrage $E_v$ .....	46
III.6-Effet de la variation de la vitesse du vent $V$ .....	47
III.7-Effet de la variation de l'épaisseur de la lame d'air .....	48
III.8- Variation des pertes avant donnée le modèle théorique et le modèle polynomial	51
III.9- Variation des écarts entre le modèle théorique et le modèle multi- polynomial pour les différents paramètres.....	52
<b>Conclusion.....</b>	<b>54</b>
<b>Références.....</b>	<b>55</b>
<b>Annexe</b>	

### Conclusion

Notre étude est basé sur les pertes thermique vers l'avant d'un capteur solaire plan. Nous avons commencé l'étude par faire une recherche bibliographique qui a permis de voir les définitions des différents concepts, d'étudier quelques modèles dans littérature.

Dans le but d'étudier l'influence de quelques paramètres sur coefficient des pertes thermiques vers l'avant du capteur solaire plan. Par la méthode des plans expériences établis par les mathématiciens, nous avons developpé un modèle mathématique polynomial qui permet de calculer ces pertes thermique. La méthode la plus indiquée est l'application de l'algorithme dérive la théorie du capteur solaire plan. Un programme de simulation basé sur cet algorithme à été développé sous MATLAB.

Nous avons commencé par la validation des résultats de la simulation qui à montre que :

- Il y a un écart au niveau du rendement optique. Cet écart est surement du la méconnaissance des caractéristiques des matériaux.
- Les pertes des 2 courbes sont identique ce qui signifie que le coefficient de pertes thermiques et du même ordre (nous pouvons utiliser notre programme).

On a tracé la variation des pertes avant en fonction de la variation des paramètres. A partir de l'analyse des réponses individuelles nous avons obtenir un modèle multi-polynomial pour retenir sous modèle on a déterminé leur coefficient. Est on a représente les résultats comparés entre le modèle théorique (modèle de Hottel Woertz Bliss) et le modèle multi-polynomial tel que l'écart important sont observé pour les points 7 à 12.

On a présenté les écarts obtenus pour chaque paramètre, l'écart maximal observé est dû à l'émissivité du vitrage, avec un écart de 3.3% pour une émissivité de 0.95. Valeur assez éloignée des cas courants (environ 0.88). Pour le reste les écarts sont inférieurs à 3%.

- [1]- Yves Jannot, Thermique Solaire. Octobre 2003.
- [2]- Bernard, G menguy ; M, Schwartz, le rayonnement solaire conversion thermique et applications, technique et documentation.1979.
- [3]- M.Capderou, Atlas solaire de l'Algrie.Edition EPAU, Alger 1985.
- [4]- Pr. MERZOUK Mustapha, Conversion Thermodynamique Solaire Potentiel, Système et performances. Cours Master 2,2016.
- [5]- KASBADJI Nachida, Etude Théorique et Expérimentale des Performances Instantanées de Trois Capteurs Solaires Plans a Eau. Mémoire de Magister En Energie Renouvelables Energie Solaire Conversion Thermodynamique, Centre D'études Nucléaires et Solaire. 1986.
- [6]- AGUEDAL, Liyes, Approche des Conditions Thermiques de Parois à L'étude des Ecoulements dans les Cavités Bidimensionnelles : cas du Capteur Solaire à air, mémoire d'ingénieur d'Eta. Université Blida 2010.
- [7]- KEBICH Mourad, Calcul du Rendement Optique d'un Capteur Solaire Plan. Mémoire de License, Université de Blida, 2010.
- [8]- B.p.ACELL « A Simple Equation For The Effect Of Multiple Refections On The Solar Radiation Absorbed a Collector With a Double Glazed Cover Plate » Division of Mechanical Engineering, The Manchester School of Engeneering, University of Manchester, Oxford.Road, Manchester M 139 PL, U.K (acpcted 17 November 1997).
- [9]- Hottel, H.C et B.B.Woertz, The Performance of Flate Solar Heat Collectors.Trns ASME, vol, 64, N°91 1942.
- [10]- Bliss Jr,R.W.,The Derivations of Servieral Plate-Efficieny Factors Useful In The Design of Flate –Plte Solar Heat Collectors Solar Energy, Vol 27,N°2,1981.
- [11]- Abdel –Khalik, S.L., Heat Removal Factor for Flat –Plate Solar Collector with Serpentin tube. Solar Energy, vol 18,1976.
- [12]- Whilliers, A., Thermal Résistance of the tube –Plate bonb in Solar Heat Collectors. Solar Energy, vol 8, N° 3,1964.
- [13]- Klein, S.A, Calculation of Flat –Plate Collector loss Coefficient Technical note, Solar Energy, vol 17,1975.
- [14]- Agarwal, V, K. et D.C.larson, Calculation of top loss Coefficient of Flat –Plate Collector. Technical note, Solar Energy, vol, 27,1981.
- [15]- Francey, J, L.A et J Papaioannou, Wind Related Heat losses of Flat –Plate Collector Solar energy, vol 37, N° 1,1985.

- [16]- Sparrow, E.M., J, W.Ramsey et E.A.Mass, effect of finite with on Heat Transfer and Fluid flow about and inclined Rectangulaire Plate. Journal of Heat Transefer Tran –ASEM, vol 101, mai1979.
- [17]- Keller.J, Characterization of the Thermal Performance of uncoverd Solar Collectors Sky Paramètres including the dependance on wind velocity, Humidity and infrared Sky Radiation as well as on Solar irradianc. Congrès de vienne de mai 1985.
- [18]- Eaton, C, B.et H.A, Blum, The use of moderte vacuum environments. As a means of increasing the Collection Efficiencies and Opérateuring Températures of Flat –Plate Solar Collectors Solar Energy, vol 17,1975.
- [19]- Hollands, K.G.T et K.Iynkaram, Proposal for a Compound –Honeycomb Collector Solar Energy, vol 34, N° 4/5,1985.
- [19]- T.Lezt and M. Lallemand. Etude Théorique et Expérimentale d'un Capteur Solaire Plan à air en Régime Dynamique (Revue Phys.Appl.21 PP 727-734. (1986)
- [20]- A.A.Mohamed, High Efficiency Solar air Heater Solar Energy, 60 PP 71- 76. (1997)
- [21]- A. Benkhelifa, Optimisation d'un capteur solaire plan (*Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique, PP 13-18*). (1998)
- [22]- Donation Njomo, Etude Théorique de Comportement Thermique d'un Capteur Solaire Plan à air à Couverture Combinée Plastique – Vitre, 1998.
- [23]- K. Sopiana, Suprantob, W.R.W. Daudb, M.Y Othman, B. Yatime, Thermal Performance of the Double Pass Solaire Collector with & without pocous media Renewable enrgy, 18 PP.557-564. (1999)
- [24]- H. Abdi et al, Etude Expérimentale et Théorique des Performances de deux Capteurs Plans à Contacte direct Eau –Plaque d'absorption (Rev. Energ. Ren. : Chemss, PP 53-60). 2000
- [25]- A, A, Zaid ; A, Moulla ; M, S, Hantala ; J, Y, Demsons. Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans à air : application au séchage de l'oignon jaune et du hareng, Revue des Energies Renouvelables, vol 4, PP 69- 78. (2001).
- [26]- A. Zerrouki et al, Modélisation des Pertes Thermiques dans un Capteur Solaire à Air à deux Passes, Rev. Energ. Ren. Vol. 5, PP 49-58 49. (2002)
- [27]- F.Mokhtari, D. Semmar, A. Hamid. Etude de la Variation de la Température de la Plaque absorbante pour différents Capteurs Solaires à air. Rev. Energ. Ren. : 11 èmes Journées Internationales de thermique, PP 47-51. (2003)
- [28]- L.C. Demartin, H.A. Vielmo and S.U.Moller, Numéris and Experimental Analysis of the turbulent flow through a channel with baffle Plates.J.of the Braz soc of Mech. Sci and Eng Vol XXVI, No.2/153. 2004

- [29]- A.ABENE, V, DUBOIS, A.OUAGUED, M, SI-YOUCHEF ET M.LERAY. Etude Expérimentale de Capteurs Solaires à air « le séchage de la figue »technologie avancée numéro 17, 2005.
- [30]- F, Benyelles ; B, Benabadjia ; B, Benyoucef ; Z, Ziani. Comparaison entre un Capteur à aérogel de Silice et d'autres Capteurs Plans, 13 emes Journées Internationales de Thermique. (2007).
- [31]- K. Aoues ; N. Moummi ; A. Moummi ; M. Zellouf ; A. Labed ; E, Echouri. Etude de l'influence des rugosités artificielles sur les Performances Thermiques des Capteurs Solaires Plans à air, Revue des Energies Renouvelables, Vol 11, N°2, PP 219-227. (2008).
- [32]- ]- K. Aoues ; N.Moummi ; M. Zellouf ; A. Moummi ; A. Labed ; E.Achouri ; A. Benchabane. Amélioration des Performances Thermiques d'un Capteur Solaire Plan à air : étude Expérimentale dans la région de Biskra, Revue des Energies Renouvelables, vol 12, N°2, PP 237- 248. (2009).
- [33]- A, Labed ; N, Moummi ; K. Aoues ; M.Zellouf ; A, Moummi. Etude Théorique et Expérimentale d'un Capteur Solaire Plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, N°4, PP 551- 561. (2009).
- [34]- Prasad, S.B et al Investigation of Heat Transfer and friction characteritics of packed bed Solar air Heat using wire mesh aspacking material, sol. Energy 2009.
- [35]- Rabéa. Kaoulal. Sidi Med Elaminebekkouche.Tayeb Benouaz ; Sofiane. Kherrou. Modélisation numérique d'un Capteur Solaire Plan à air fonctionnant en régime transitoire en vue d'intégration au bâtiment conférence IBPSA France – Arras – 2014.
- [36]- Duffie, J A et W.A.Beckman, Solar Engineering of Thermal Prcesses Edition J.Wiley & Sons, USA 1991.
- [37]- Kasbadji. N et Merzouk. M, Capteur Solaire Premier, Rapport Technique interne, CDER, 1989.