

**REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR**



G 17.0322



**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
Centre de Thiès**

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Option électromécanique

PROJET DE FIN D'ETUDE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

THEME :

Etude des échanges thermiques à l'intérieur de la
cavité vitre-absorbeur d'un capteur à haut
rendement

Auteur : Mr Ibra SECK
Directeur : Mr Banda NDOYE
Co-directeur : Mr Salif GAYE

Juillet 2006

Remerciements

Nous adressons vivement nos remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail. Particulièrement nos remerciements vont à l'endroit de M. Banda Ndoye et M. Salif Gaye professeurs à l'ESP, qui nous ont assisté pour mener à bien ce travail.

Au corps professoral de l'école, au personnel administratif du département Génie Electromécanique, à nos amis et camarades de l'école, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

SOMMAIRE

Au niveau de l'eau de circulation des capteurs plans, des travaux démontrent que l'apport calorifique (utile) à l'eau de circulation est redevable pour plus de 60% aux échanges radiatifs. Un capteur à haut rendement qui optimise ces échanges radiatifs est en cours de développement. L'originalité du capteur réside dans la conception de l'absorbeur qui est ici constitué des tubes en cuivre qui servent à la circulation du fluide caloporteur.

Dans les systèmes classiques, les tubes de circulation du fluide ne font pas qu'un avec l'absorbeur. Pour le système étudié, outre le fait que ici l'absorbeur se confond avec les tubes, la forme cylindrique de la surface absorbante (facteur de forme favorable pour les échanges par rayonnement à l'intérieur de la cavité) ainsi que la configuration de tubes jointifs par soudage (pertes par conduction utiles) optimisent les apports calorifiques à l'eau de circulation. C'est donc un capteur à haut rendement.

Le but de cette étude est d'abord de calculer le flux net reçu par l'absorbeur ensuite de faire sa modélisation et enfin de dresser l'organigramme permettant d'accéder rapidement au rendement.

A partir du model obtenu on doit pouvoir connaître le comportement du système dans un site en fonction des données météorologiques et des paramètres de fonctionnement.

Introduction

Au Sénégal, la consommation brute d'énergie est d'environ 3 millions de tonnes équivalent de pétrole par an dont 60% pour le bois d'énergie (charbon de bois) et 35% pour les produits pétroliers. Les autres sources d'énergie utilisées sont : le gaz naturel, l'hydroélectricité, les résidus agro-industriels (la bagasse de la compagnie sucrière de Richard Toll), le biogaz, les ordures et les déchets urbains et enfin l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

Le Sénégal n'étant pas pour l'instant producteur de pétrole, chaque année, ce sont des centaines de milliards de francs CFA qui sont dépensés pour acheter cette source d'énergie à l'étranger afin de produire de l'électricité pour l'industrie et le transport. En 2004 par exemple, la facture pétrolière était de 280 milliards soit plus de 40% du revenu d'exploitation. Par conséquent, trouver des voies et moyens afin de réduire cette facture pétrolière revêt d'une importance capitale.

Quelle stratégie doit on adopter pour y arriver ?

Au moment où l'on parle de plus en plus de la nécessité de réduire les gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O ...), le développement à grande échelle des énergies renouvelables (solaire et éolienne) dans notre pays peut être une solution.

Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt qu'on lui a porté est sa gratuité (nous y reviendrons), sa disponibilité pour une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connue par les sources d'énergie fossile.

Cependant, on s'est très vite aperçu que l'énergie solaire n'est pas tout à fait gratuite : son utilisation nécessite un investissement de départ souvent plus lourd que pour les sources d'énergies conventionnelles et bons nombres d'installations solaires sont aujourd'hui à l'arrêt faute d'avoir pas prévu un budget pour la maintenance des équipements.

Toutefois sans être totalement gratuite, l'énergie solaire présente des coûts de fonctionnement réduits et offre dans certains cas une alternative économiquement rentable par rapport aux sources d'énergie conventionnelles.

Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire sera lié non seulement à ses avantages économiques (qui grandiront au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossile diminueront) mais aussi à des considérations liées à la protection de l'environnement :

- ✓ pas de rejets polluants (fumées contenant du CO₂ et des NOx d'azote par centrales thermiques)
- ✓ pas de danger radioactifs et de déchets encombrants (centrales nucléaires)

L'énergie solaire permet une production :

- ✓ généralement plus simple
- ✓ moins traumatisante pour la nature et pour les hommes
- ✓ plus économique à long terme
- ✓ décentralisée (utilisation sur place d'une énergie disponible)

Ses applications sont nombreuses et variées ; citons

- ✓ le chauffage des habitations, des piscines
- ✓ la production d'eau sanitaire
- ✓ le pompage de l'eau ou la production d'électricité.

Parmi toutes les utilisations possibles de l'énergie solaire, le chauffage de l'eau à usage domestique est l'une des plus immédiates et des plus simples. C'est aussi le plus répandu.

Les capteurs de chaleur solaire sont des appareils transformant l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. On peut ensuite utiliser cette chaleur comme celle de toutes les sources usuelles de chaleur, c'est-à-dire pour chauffer les locaux industriels ou logements, fournir l'eau chaude sanitaire, activer la croissance des végétaux, sécher les grains et les fourrages, faire fonctionner des moteurs thermiques produisant de l'énergie mécanique ou de l'électricité, et pour alimenter des machines de réfrigération destinées au conditionnement de l'air ou à la conservation des aliments.

Un capteur est essentiellement constitué :

- ✓ d'un panneau noir appelé absorbeur, pourvu d'un réseau de tubulaires dans lesquelles circule un fluide caloporteur drainant les calories absorbées vers leur lieu d'utilisateur ou de stockage.
- ✓ d'une couverture généralement en verre, simple ou double, destinée à piéger l'énergie solaire.
- ✓ d'un boîtier contenant le tout et dont les parois sont tapissées d'une couche isolante destinée à réduire les pertes de l'absorbeur vers l'arrière ou les cotés.

Plusieurs recherches ont été faites en vue d'optimiser le rendement des capteurs solaires.

Notre PFE rentre dans ce cadre.

En effet dans ce projet, l'originalité de notre capteur réside dans la conception de l'absorbeur qui est ici constitué des tubes en cuivre qui servent à la circulation du fluide caloporteur. Dans les systèmes classiques, les tubes de circulation du fluide ne font pas qu'un avec l'absorbeur : la surface de canalisation exposée au rayonnement solaire représente moins de 30% de la surface totale exposée. Or des travaux démontrent que l'apport calorifique (utile) à l'eau de circulation est redevable pour plus de 60% aux échanges radiatifs. Outre le fait qu'ici l'absorbeur se confond avec les tubes, la forme cylindrique de la surface absorbante (facteur de forme favorable pour les échanges par rayonnement à l'intérieur de la cavité) ainsi que la configuration de tubes jointifs par soudage (pertes par conduction utiles) optimisent les apports calorifiques à l'eau de circulation. C'est donc un capteur à haut rendement.

Le but de notre étude sera d'abord de montrer les avantages du nouveau système, ensuite de calculer le flux net reçu par l'absorbeur et enfin de faire sa modélisation permettant d'accéder rapidement au rendement.

A partir du modèle obtenu on doit pouvoir connaître le comportement du système dans un site en fonction des données météorologiques et des paramètres de fonctionnement bien définis.

Le plan que nous adopterons est le suivant :

- ✓ dans le chapitre 1, nous allons faire des rappels sur les transferts de chaleur
- ✓ dans le chapitre 2, il sera question d'expliquer le principe de fonctionnement des capteurs solaires ainsi que leur utilisation
- ✓ la présentation du nouveau système ainsi que l'étude des échanges thermiques seront faits dans le chapitre 4.
- ✓ et enfin, il y'aura la conclusion et les recommandations.

Chapitre 1 : Rappels sur les transferts de Chaleur

Tous les calculs de systèmes solaires utilisant la conversion thermique de l'énergie font appel à quelques formules de base relatives à la transmission de chaleur. Nous rappelons brièvement ici les phénomènes mis en jeu et les résultats que nous aurons à utiliser. Nous limiterons volontairement cette partie, des compléments peuvent être trouvés dans des ouvrages spécialisés de thermique.

1.1 Classification des différents modes de transmission de la chaleur

La chaleur peut être transmise à l'aide d'un support matériel par chocs de particules ou sans support matériel, la propagation étant alors de nature ondulatoire. Mettons en évidence ces deux types de phénomènes.

1.1.a Transfert de chaleur avec support matériel

- Transmission de la chaleur par conduction

Considérons un solide (S) isolé thermiquement à sa périphérie, dont la température est non uniforme ($T_1 > T_2$). Laissons évoluer (S) ; au bout d'un temps variable, sa température devient uniforme ; de la chaleur a été transmise par conductibilité thermique (conductivité ou conduction) des régions les plus chaudes vers les régions les plus froides.

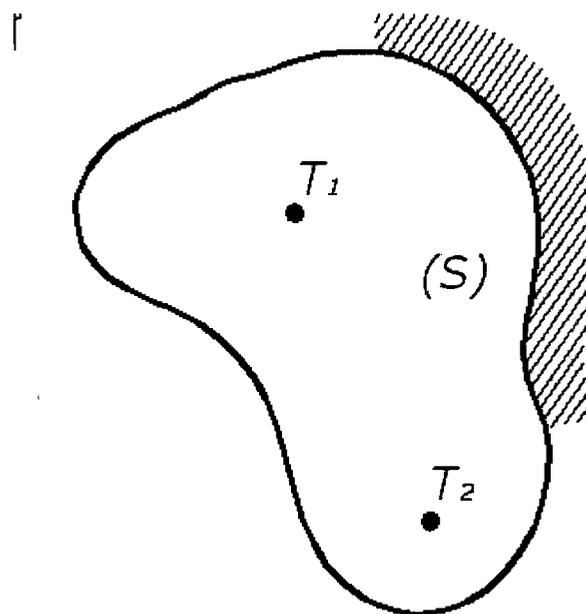


Figure 1.1: Transmission de la chaleur par conduction

- Transmission de chaleur par convection

Soit une paroi à température moyenne T_1 et un fluide en mouvement quelconque au contact de cette paroi ($T_1 > T_2$ par exemple) (fig1.1.b)

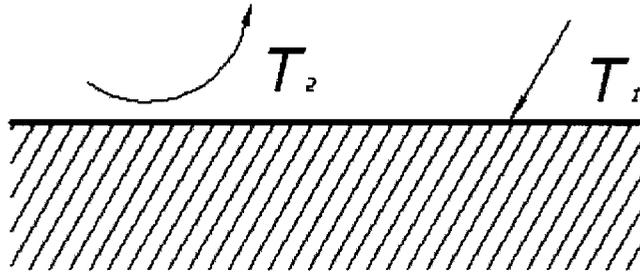


Figure 1.2: Transmission de chaleur par convection

On note au cours du temps que la température T_1 diminue et que T_2 augmente. Il y'a eu échange de chaleur par convection entre la paroi et le fluide en mouvement.

On distingue deux types de convection :

- ✓ La convection naturelle

Le fluide se met en mouvement de lui-même par l'intermédiaire des courants de gravité dus aux différences de température entre la paroi et le fluide.

- ✓ La convection forcée

Le fluide est mis en mouvement par un moyen mécanique, pompe ou ventilateur.

1.1.b Transmission de chaleur sans support matériel

- La transmission de chaleur par rayonnement

Plaçons dans une enceinte isolée, dans lequel on fait le vide, deux corps (S_1) et (S_2) à températures initiales T_1 et T_2 et ($T_1 > T_2$) (figure 1.1.c)

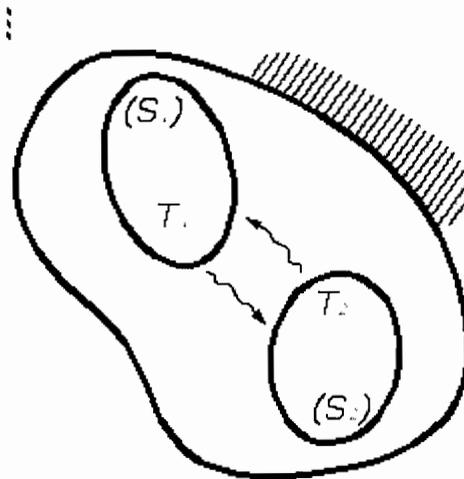


Figure 1.3: La transmission de chaleur par rayonnement

Au cours du temps on remarque que T_1 diminue et T_2 augmente.

De l'énergie a donc été échangée entre les deux corps, et de plus sans support matériel, ce qui permet de supposer que la propagation de l'énergie a une nature ondulatoire. On dit dans ce cas qu'on a échangé d'énergie (ou de chaleur) par rayonnement.

1.2°) Lois fondamentales régissant les échanges de chaleur par conductibilité, convection et rayonnement

1.2.a. Transmission de chaleur par conduction

Etant donné un corps (S) quelconque dont la température n'est pas uniforme, la quantité de chaleur dQ traversant une surface dA découpée dans (S) pendant le temps dt est donnée par la relation de FOURIER :

$$dQ = -\lambda \cdot \text{grad}T \cdot dA \cdot dt \quad (1.1)$$

λ est le coefficient de conductivité thermique du matériau ; c'est un scalaire pour un corps isotrope qui s'exprime en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (ou $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

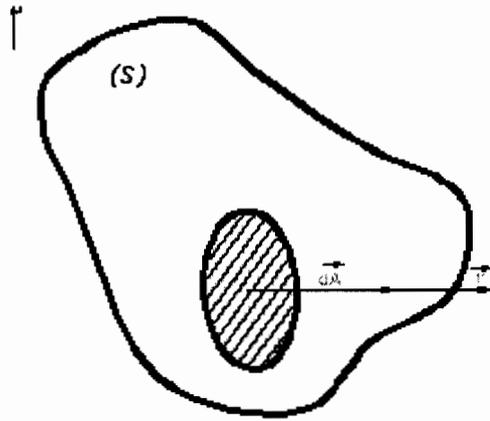


Figure 1.4: Transmission de chaleur par conduction

λ dépend de la nature du corps (corps isolants : λ faible) et de la température (généralement λ augmente avec la température).

On introduit également la notion de densité de flux de chaleur :

$$\vec{\phi} = -\lambda \cdot \text{grad} \cdot T. \quad (1.2)$$

La quantité de chaleur traversant une surface par conductibilité est alors $\vec{\phi}$ à travers la surface considérée.

La grandeur transférée, appelée chaleur, ne peut être ni mesurée ni observée directement mais les effets qu'elle produit sont sujets à l'observation et aux mesures.

L'équation fondamentale de transmission de chaleur par conductibilité, en régime transitoire, dans un corps immobile et en supposant λ indépendant de la température, s'exprime sous la forme suivante :

$$a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.3)$$

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$: Diffusivité thermique du milieu considéré

c : chaleur massique du milieu

ρ : Masse volumique du milieu

En régime permanent, on a $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ on en déduit les formules suivantes pour la quantité de

chaleur transmise q :

Pour le mur d'aire A et d'épaisseur faible par rapport aux dimensions latérales, on a la formule suivante :

$$q = \frac{\lambda}{e}(T_1 - T_2)A \quad (\text{Watt}) \quad (1.4)$$

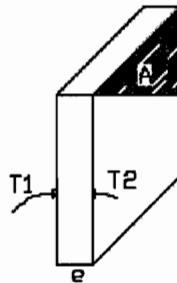


Figure 1.5 : Transmission de chaleur par conduction dans un mur d'aire A et d'épaisseur e faible par rapport aux dimensions latérales

Le flux surfacique (ou densité de flux de flux de chaleur) s'écrit :

$$\frac{q}{A} = \frac{\lambda}{e}(T_1 - T_2) \text{ en } (\text{W/m}^2) \quad (1.5)$$

En posant $\frac{q}{A} = \varphi$ on a :
$$\varphi = \frac{\lambda}{e}(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{e/\lambda} \quad (1.6)$$

Cette équation montre qu'il existe une analogie entre le flux de chaleur et l'intensité du courant. Si on considère que $(T_1 - T_2)$ joue le rôle du potentiel et e/λ celui de la résistance thermique de la paroi entre 2 nœuds aux potentiels T_1 et T_2 le flux de chaleur net serait analogue à l'intensité du courant dans un réseau analogue. (Voir schéma)



Figure 1.6 : Analogie entre le flux de chaleur et l'intensité du courant

- ✓ La conductance thermique de la paroi est $K = \lambda/e$
- ✓ La résistance thermique de la paroi est $R_{th} = e/\lambda$

1.2.b Transmission de chaleur par convection

Etant donné un fluide en mouvement au voisinage d'une paroi à température à différente ($T_1 > T_2$ par exemple) voir figure(1.2.b) suivante.

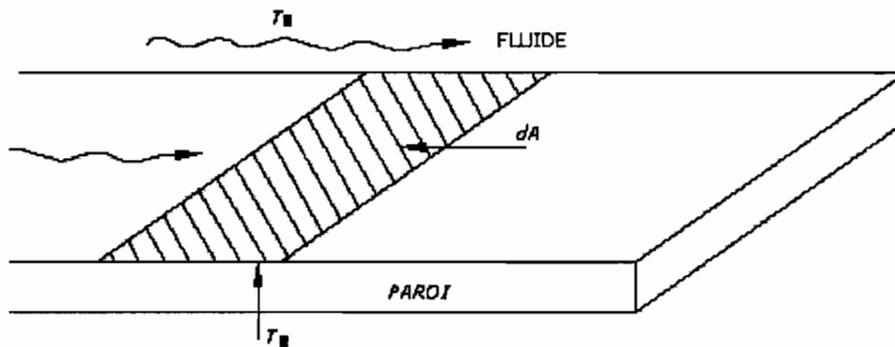


Figure 1.7: Transmission de chaleur par convection

Il existe une très forte variation de vitesse et de température au voisinage immédiat de la surface (phénomène de couche limite). L'existence d'un gradient de température correspond à une transmission de chaleur par conductibilité dans cette région ; la quantité de chaleur correspondant est difficile à évaluer de cette façon.

La loi de NEWTON permet d'éviter cette difficulté, et exprime la quantité de chaleur dQ échangée par convection pendant le temps dt sous la forme :

$$dQ = h_c (T_1 - T_2) dA dt \quad (1.7)$$

h_c : Coefficient d'échange de chaleur par convection ou coefficient de convection

T_1 : température de surface de la paroi.

T_2 : température du fluide dans la masse (à l'extérieur de la couche limite).

dA : aire de la surface en contact(solide –fluide).

h_c s'exprime en $W.m^{-2}.K^{-1}$ (ou $kcal .m^{-2}.h^{-1}.K^{-1}$) et dépend essentiellement de la nature du fluide (sa viscosité en particulier) de la vitesse de l'écoulement (laminaire ou turbulent), de l'état de surface de la paroi, des températures de surface et du fluide .

Nous ne développerons pas ici toute la théorie qui permet d'atteindre les expressions de h_c , il faut savoir que pour un écoulement donné, il existe de nombreuses formules empiriques donnant h_c , la seule difficulté réside en fait dans le choix judicieux de la bonne formule h_c .

Exemple : cas du vent circulant au voisinage d'un plan : on peut utiliser la formule suivante pour les conditions atmosphériques usuelles :

$$h_c = 5,7 + 3,8v \text{ avec } h_c \text{ en } W.m^{-2}.K^{-1} \text{ et } v \text{ est la vitesse en } ms^{-1}.$$

1.2.c Transmission de chaleur par rayonnement

On peut donner, par la théorie ondulatoire, une explication qualitative du mécanisme par lequel l'énergie de rayonnement se transmet. Dans le procédé de l'émission du rayonnement un corps transforme une partie de son énergie interne en ondes électromagnétiques, qui sont une forme d'énergie. Ces ondes se déplacent dans l'espace jusqu'à ce qu'elles frappent un autre corps, ou une partie de leur énergie est absorbée et transformée de nouveau en énergie interne. L'énergie du rayonnement provoque une diminution de sa température dans le corps émetteur et une diminution de sa température à moins que la chaleur soit produite à l'intérieur de ce corps, comme dans le soleil par exemple, ou que le corps reçoive de la chaleur d'une autre source. La température d'un corps reste constante seulement s'il reçoit ou produit une quantité de chaleur équivalente à l'énergie d'émission.

Tous les corps reçoivent et émettent continûment des rayonnements auxquels nous sommes exposés en tout temps. Cependant nos sens ne sont pas capables de détecter le rayonnement que si la longueur d'onde s'étend de 0,1 à 100 μ m sur le spectre. Dans cette gamme, le rayonnement chauffe de façon appréciable le corps qui le reçoit et excite également le nerf optique sous forme de lumière dans une bande étroite de 0,38 à 0,76 μ m.

Nous nous occuperons seulement du rayonnement thermique c'est-à-dire du rayonnement émis par des corps du fait de leur température.

La quantité totale de chaleur de rayonnement qu'émet un corps par unité de surface et de temps est appelée *pouvoir émissif total* E dépend de la température et des caractéristiques de la surface du corps. A chaque température considérée, la quantité de rayonnement émise par micron est différente suivant les longueurs d'onde.

- Absorption, Réflexion et Transmission du rayonnement

Lorsque le rayonnement tombe sur un corps, il est partiellement absorbé, partiellement réfléchi et transmis comme l'indique la figure suivante. La relation entre l'énergie absorbée, réfléchie et transmise s'écrit :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1.8)$$

Dans laquelle

α = Facteur d'absorption c'est à dire la fraction du rayonnement incident absorbé par le corps

ρ = Facteur de réflexion c'est-à-dire la fraction du rayonnement incident réfléchi par la surface du corps

τ = Facteur de transmission, c'est dire la fraction du rayonnement incident transmise à travers le corps. (Voir schéma)

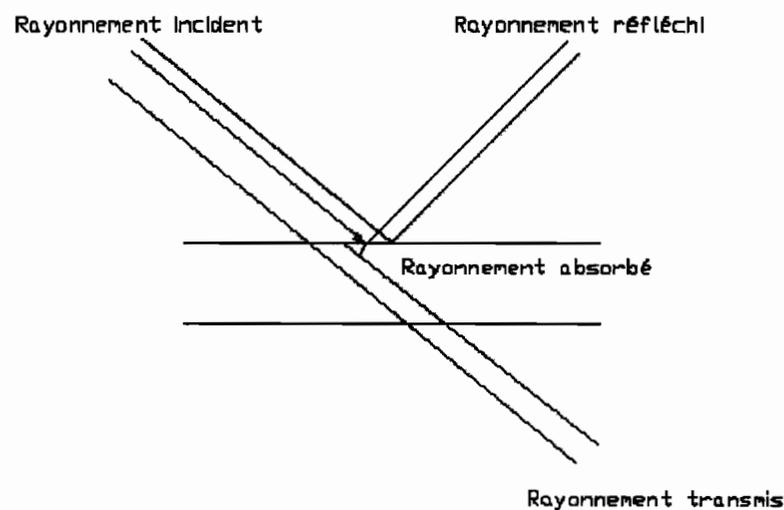


Figure 1.8: Absorption, Réflexion et Transmission du rayonnement

La majorité des matériaux solides utilisés dans la pratique absorbent pratiquement tout le rayonnement sur une couche de surface très fine moins de 1,25mm épaisseur.

Les corps qui ne transmettent pas le rayonnement sont appelés **opaques** et on a $\tau = 0$ l'équation devient :

$$\alpha + \rho = 1 \quad (1.9)$$

Pour un corps transparent ($\alpha = 0$) et on aura :

$$\alpha + \tau = 1 \quad (1.10)$$

Le verre, le sel de roche et d'autres cristaux sont des exceptions parmi le solide car, malgré leur forte épaisseur, ils restent jusqu'à un certain point transparent au rayonnement de certaines longueurs d'onde.

Beaucoup de liquides et de gaz sont aussi transparents.

La réflexion du rayonnement peut être soit régulière soit diffuse. Si une surface est bien polie et lisse, la réflexion du rayonnement sera similaire à celle d'un rayon lumineux : l'angle d'incidence sera égal à l'angle de réflexion. C'est la réflexion régulière. La plupart des matériaux utilisés dans l'industrie sont « rugueux » parce que leur surface présente des aspérités qui sont grandes par rapport à une longueur d'onde. La réflexion du rayonnement à partir d'une surface rugueuse se dirige pratiquement dans toutes les directions. C'est la réflexion diffuse. On peut définir une surface de réflexion diffuse comme étant celle qui réfléchit de l'énergie dans l'espace avec la même répartition qu'un corps noir. Dans la plupart des cas pratiques on peut traiter la réflexion comme si elle était complètement diffuse.

Les grandeurs relatives α , ρ et τ ne dépendent pas seulement du matériau, de son épaisseur et de son état de surface, mais varient aussi avec la longueur d'onde du rayonnement.

- La loi de KIRCHOFF et le corps noir

Comme le gaz parfait, le corps noir est un concept théorique qui peut seulement être approché dans la pratique. On peut définir le corps comme un corps qui absorbe tout le rayonnement qui lui parvient et n'en réfléchit ou n'en transmet rien. C'est un corps qui émet, à chaque température considérée la plus grande quantité de rayonnement thermique à chaque longueur d'onde.

On utilise le corps noir comme une référence à laquelle on compare les caractéristiques de rayonnement des autres corps.

- Emittance totale :

L'émittance totale est le flux par unité de surface de la source. Si q est le flux émis par une surface S dans l'ensemble des directions (flux hémisphériques), alors l'emittance totale s'écrit :

$$M = \frac{dq}{dS} (W / m^2) \quad (1.11)$$

- Emissivité d'un corps (facteur d'émission d'un corps) :

L'émittance totale d'un corps réel (M) est inférieure à celle du corps noir (M_0).

L'emissivité (ou facteur d'émission) d'un corps est définie par le rapport

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} \quad (1.12)$$

On a toujours : $0 < \varepsilon < 1$ pour tout corps réel, et $\varepsilon = 1$ pour un corps noir

- Corps gris

Un corps gris est un corps dont l'émissivité et l'absorption ne dépendent pas de la longueur d'onde λ

- Calcul de l'émittance totale du corps noir

- Loi de Stéfan-Boltzmann :

En 1879, le physicien Stephan établi expérimentalement que le corps noir émet un rayonnement suivant la puissance quatrième de sa température absolue. Environ 5 années plus tard, Boltzmann justifie ce résultat à partir de considérations thermodynamiques.

On a :

$$M_0 = \sigma T^4 \quad (1.13)$$

σ est la constante de Stéfan-Boltzmann

- Loi de Planck

Max Planck a établi en 1900 (au moyen de sa théorie des quanta) une relation donnant l'évolution de l'émittance monochromatique

$$M_{0,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (1.14)$$

λ = longueur d'onde en μ_m

T = température absolue en kelvin (K)

$$C_1 = 3,74 \times 10^8 \text{ en } W\mu m^4 / m^2$$

$$C_2 = 1,6729 \times 10^4 \text{ en } \mu m.K$$

- Loi de WIEN

La loi de WIEN donne l'abscisse et l'ordonnée du maximum de l'émittance monochromatique du corps noir à chaque température sous la forme.

$$\lambda_{\max} T = 2898 \mu m K \quad (1.15)$$

Chapitre 2: Les capteurs solaires plans : Utilisation et principe de fonctionnement

2.1 : Les besoins en eau chaude :

Le premier pas de la conception d'un capteur solaire consiste à l'établissement des besoins. Ces besoins dépendent du mode de vie des utilisateurs. Les variables qui influent sur la consommation sont :

- ✓ la nature de l'utilisation
- ✓ le genre de vie des utilisateurs (pays, région, milieu et niveau de vie)
- ✓ l'équipement thermique
- ✓ la saison
- ✓ le jour de la semaine
- ✓ le moment de la journée

2.1.a Eau chaude sanitaire

Les principales utilisations de l'eau chaude sanitaire sont :

- ✓ Utilisation pour la toilette
- ✓ Utilisation pour la vaisselle, le lavage et le ménage effectué manuellement.
- ✓ Utilisation pour la vaisselle, le lavage et le ménage effectué par machine.

- Utilisation pour la toilette :

Pour faire sa toilette dans les meilleures conditions de confort, des études ont montré que la température la plus indiquée est 40°C. En moyenne on utilise 30 litres pour une douche et 120 litres pour un bain.

- Utilisation pour la vaisselle, le lavage et le ménage effectué manuellement :

Il faut à la fois :

- ✓ obtenir la dissolution des corps gras qui commence à 55°C
- ✓ permettre à l'utilisateur de supporter la température de l'eau
- ✓ Pour ces raisons on peut adopter une température de 60°C

- Utilisation pour la vaisselle, le lavage et le ménage effectué à la machine :

Dans le cas du lavage, le brossage ou frottage aux endroits sales n'est plus dirigé par l'œil de l'opérateur.

Dans le cas des machines à laver, la vaisselle, le frottage est supprimé et remplacé par les jets d'eau.

Les actions intelligentes ou mécaniques supprimées sont alors compensées par une température d'eau plus élevée ; on peut adopter une température de 85 à 90°C

2.1 .b Eau chaude industrielle

L'importance de la place qu'occupe la production d'eau chaude industrielle varie d'une industrie à une autre, elle dépend des activités menées dans l'industrie. Les besoins en eau chaude en quantité et en température, dans l'industrie sont très variés, et sont fonction des applications qui nécessitent de l'eau chaude.

Dans les industries, on a dès fois besoin de chauffer des fluides pour certaines applications.

Souvent on a recours à l'énergie électrique pour satisfaire à ces besoins. Cependant pour certains types de besoins le chauffage solaire est le plus approprié. Cela va permettre de diminuer considérablement la consommation en électricité.

2.1. c Les règles de conception

Le concepteur d'une installation de production d'eau chaude sanitaire doit tout d'abord viser à assurer à l'utilisateur un service satisfaisant. Plusieurs principes doivent être respectés :

- La qualité de l'eau distribuée doit être bonne.
- Sa température doit être stable, et réglable ; l'utilisateur supporte mal des variations en cours de puisage ; les risques de surchauffe accidentelle doivent être en tout cas totalement écartés.
- La mise à disposition de l'eau chaude doit être aussi immédiatement possible, surtout dans les secteurs résidentiel et hôtelier : l'utilisateur accepte mal un retard dans l'obtention d'une eau à température satisfaisante, retard qui entraîne par ailleurs un gaspillage d'énergie et d'eau, donc un surcoût.
- La fréquence des pannes ou anomalies de fonctionnement doit être aussi réduite que possible ce qui exige la limitation des risques de détérioration des installations par corrosion.
- Le coût d'exploitation (énergie et entretien) doit être limité.

2.2 Utilisation des capteurs solaire plan :

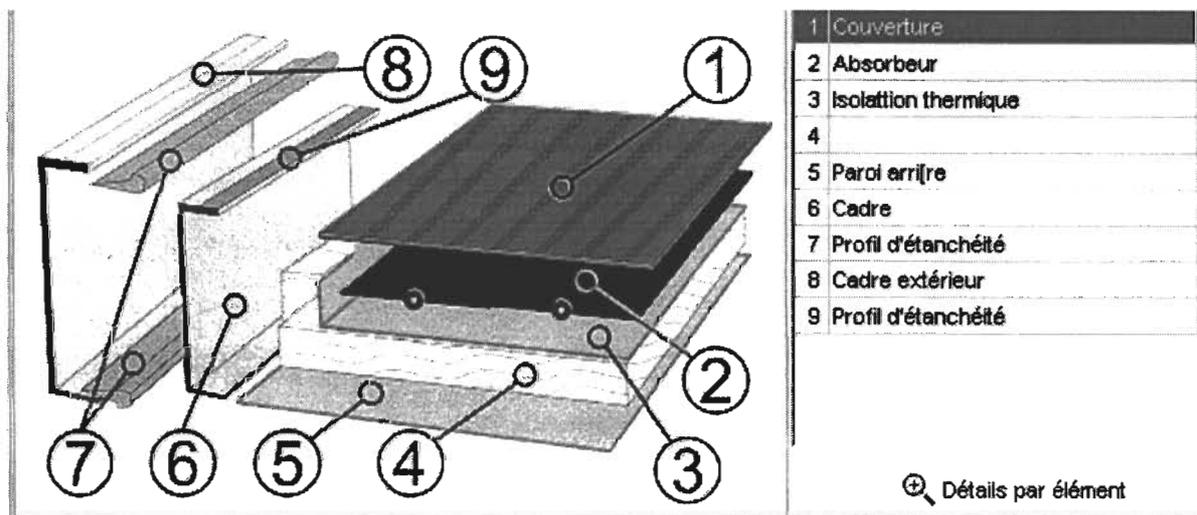
Les capteurs de chaleur solaire plan sont des appareils transformant l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. On peut ensuite utiliser cette chaleur comme celle de toutes les sources usuelles de chaleur, c'est-à-dire pour chauffer les locaux industriels ou les logements, fournir de l'eau chaude sanitaire, activer la croissance des végétaux, sécher les grains etc. .

2.3 Principe de fonctionnement des capteurs solaire :

Le fonctionnement du capteur est basé sur le principe de l'effet de serre. Cet effet s'explique par le fait que le verre est un matériau transparent au rayonnement solaire (aux courtes longueurs d'ondes) alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge (aux grandes longueurs d'ondes). Un flux solaire traversant une vitre et venant chauffer un corps derrière cette vitre se trouve donc piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps principalement dans l'infrarouge ne peut traverser la vitre.

Le corps qui sert à capter le rayonnement solaire est appelé absorbeur. Il est généralement noirci afin d'augmenter son coefficient d'absorption. L'absorbeur chauffé cède sa chaleur à un fluide circulant en bon contact thermique avec lui. D'un point de vue thermique, la surface absorbante absorbe l'énergie incidente, qu'elle transmet par l'intermédiaire de surfaces d'échanges à un fluide caloporteur. Cette transmission s'effectue plus ou moins efficacement selon, d'une part le type de capteur, et d'autre part suivant le niveau de température du fluide caloporteur. Le capteur est le siège de déperditions thermiques. Les surfaces chaudes échangent de la chaleur avec l'environnement par rayonnement, conduction et convection.

2.3.a Le schéma de principe :



La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de sa température ΔT à la traversée du capteur.

2.3.b Les capteurs solaires et leurs principaux composants :

Les capteurs solaires sont d'un principe très simple et se composent en général de quatre parties principales :

- La première absorbe l'énergie solaire et la convertit en chaleur. Dans sa forme la plus simple, ce n'est rien de plus qu'une plaque noircie exposée au soleil.
- Un couvercle, habituellement une plaque de verre, recouvre l'absorbeur, pour permettre des températures plus élevées, à pertes calorifiques fixes
- La troisième partie consiste en un moyen de transfert de la chaleur collectée par l'absorbeur à un fluide d'échange thermique appelé fluide de travail. Ce dispositif s'appelle échangeur de chaleur. Dans un chauffe-eau solaire simple, l'échangeur est une canalisation soudée à la plaque absorbante, l'eau circulant dans la canalisation servant à transférer la chaleur vers le point d'utilisation

2.4 Les facteurs mis en jeu dans la conception des capteurs solaires :

La chaleur produite par un capteur solaire peut être utilisée de façon conventionnelle. Il existe cependant plusieurs facteurs qui rendent difficiles les applications de la chaleur solaire. C'est d'abord la nature intermittente du rayonnement solaire qui en est la principale raison. Non seulement le soleil disparaît la nuit et la longueur du jour varie avec la saison, mais il reste l'effet imprévisible des conditions météorologiques locales sur la disponibilité de l'énergie solaire. Il faut donc tenir compte de toutes ces disponibilités et presque partout les systèmes de chauffage solaire pour l'eau sanitaire ou les locaux doivent comporter un appareil de chauffage auxiliaire, même si le système comporte un accumulateur de chaleur. Les capteurs solaires ne peuvent donc pas remplacer complètement les combustibles fossiles mais simplement diminuer leur consommation pour certains usages.

Le fait que la quantité d'énergie solaire captée soit directement proportionnelle à la surface du capteur et que le prix le plus bas au mètre carré du capteur est quand même élevé, ce qui rend l'énergie solaire coûteuse en investissements. Il faut investir un capital important pour bénéficier de cette source d'énergie inépuisable. Ce coût non négligeable au mètre carré rend l'investissement des installations de captages de chaleurs solaires très important, ce qui donne une importance très grande à la conception du capteur de chaleur solaire.



2.5 Capteurs solaires à eau

On peut distinguer deux types de systèmes : les systèmes à basse pression de circulation et les systèmes à hautes pressions de circulation. On emploie les systèmes à basse pression pour le chauffage des piscine, le chauffage d'eau industrielle ou pour l'eau chaude sanitaire. Dans les systèmes à basse pression, il suffit d'un film plastique noire comme réservoir pour l'eau. Le plastique doit cependant être suffisamment épais pour supporter les conditions atmosphériques, sans l'être trop car c'est très mauvais conducteur thermique. La figure suivante illustre un capteur solaire très simple à haut rendement.

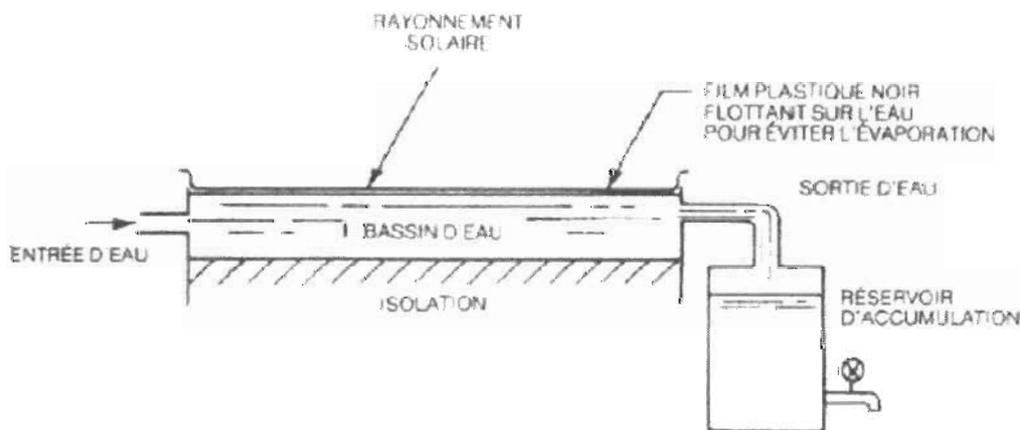


figure2.2: un capteur solaire très simple à haut rendement.

Dans les systèmes de collecte de chaleur à haute pression, le circuit d'eau est généralement constitué de tubes en cuivre et de plaques métalliques qui augmentent la surface d'absorption.

2.6 Types de composants :

Pour décrire une classe de capteurs solaires on utilise souvent le type de couvercle, d'absorbeur, ou d'échangeur de chaleur. Le couvercle peut ne pas exister et dans ce cas le capteur est dit **non vitré** ; ou bien il existe un ou deux feuilles de verre et le capteur est à simple vitrage ou à double vitrage.

2.7 Le rendement des capteurs solaires

L'une des mesures des performances des capteurs solaires est la mesure du rendement instantané. Ce rendement se définit comme étant le rapport de l'énergie thermique recueillie par le fluide de travail à l'énergie thermique reçue du soleil. Le numérateur du rendement

représente la chaleur nette collectée, c'est-à-dire la chaleur restante utilisable après les diverses pertes à la réception et à l'absorption.

Cependant il faut dire que le rendement instantané n'est valable que pour un instant donné, et le rendement réel doit être calculé par moyenne sur une période de temps déterminé, jour, saison ou année. Il devient ainsi le rapport de l'énergie utilisable fournie par l'appareil à l'énergie solaire interceptée pendant la période considérée.

2.8 Mécanisme des pertes :

2.8.a. la réflexion :

Les réflexions se produisent sur le vitrage, s'il existe, et sur l'absorbeur lui-même. S'il ne se produisait pas de réflexion, le capteur paraîtrait parfaitement noir pour un observateur placé dans la direction du rayonnement du rayonnement solaire incident.

2.8.b la réémission :

La réémission de rayonnement se produit à partir des éléments chauds du capteur solaire. C'est surtout l'absorbeur chaud qui réémet un rayonnement thermique vers l'espace ou le vitrage. Si l'on utilise un vitrage opaque au rayonnement infrarouge les pertes nettes par rayonnement, en absorbant ce rayonnement et en réémettant environ la moitié vers l'absorbeur. Le reste est réémis dans l'espace et perdu.

2.8.c la convection :

La convection est le transfert de chaleur occasionné par le fluide en mouvement, ici l'air de l'atmosphère. Le couvercle de verre ralentit le mouvement de l'air au dessus de l'absorbeur et réduit ainsi les pertes par convection. Cependant, dans l'espace compris entre l'absorbeur et le vitrage, l'air chaud tend à s'élever alors que l'air froid descend, créant un courant de convection naturelle. Si cet espace n'est pas hermétiquement fermé, des fuites d'air peuvent se produire. Ces fuites sont appelées *transpiration*. Elles sont très souvent accentuées par des gradients de pressions induits par le vent. C'est l'air chaud qui quitte l'enceinte, et est remplacé par l'air froid de l'extérieur. Une certaine convection naturelle se produit au dessus du vitrage, et si le vent souffle la convection devient forcée et refroidit sensiblement le vitrage. Ce refroidissement accroît sensiblement les pertes de chaleur du système.

2.8.d la conduction

La conduction est le transfert de chaleur à l'intérieur d'un matériau soumis à un gradient de température. Elle est produite par les mouvements des molécules, des atomes des atomes ou des électrons. Pour réduire les pertes par conduction, on utilise un matériau très faiblement

conducteur de la chaleur (isolant thermique) pour isoler le dos d'un capteur plan. La quantité de chaleur qui réussit à traverser l'isolant se perd alors par convection ou rayonnement.

2.9 Limitations des pertes de chaleur

L'énergie thermique disponible à partir d'un capteur solaire est équivalente à énergie incidente diminuée des pertes. Un capteur idéal devrait être constitué d'une partie absorbante (absorbeur) qui possède un facteur total d'absorption élevé vis-à-vis du rayonnement solaire un facteur d'émission total d'émission faible pour sa température moyenne de fonctionnement et posséder une bonne isolation thermique pour toute la périphérie du système.

On limite fortement les pertes par une conception adaptée du capteur :

- Diminution de la réémission d'une surface exposée au rayonnement par utilisation de l'effet de serre.
- Augmentation de l'énergie captée par utilisation de surface sélective.
- Isolation thermique de l'ensemble etc.

2.9.a Diminution de la réémission d'une surface exposée au rayonnement par utilisation de l'effet de serre :

Soit une surface exposée à un rayonnement d'éclairement énergétique G_n , face à laquelle on place une vitre d'épaisseur (voir figure).

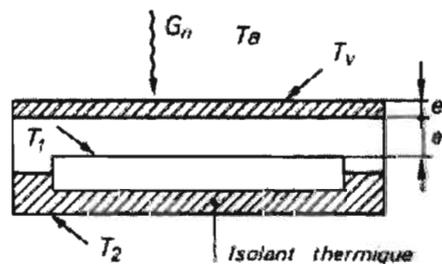


Figure 2.3: surface exposée à un rayonnement énergétique

Le facteur de transmission monochromatique τ_λ de la vitre dépend de la température du corps émettant le rayonnement : T_s (température du soleil) et dans une très faible mesure de la température T_v du récepteur. L'allure de la courbe $\tau_\lambda = \tau(\lambda)$ est représentée sur la figure suivante, elle donne également l'évolution de $M_{0,\lambda}$ en fonction de la longueur d'onde.

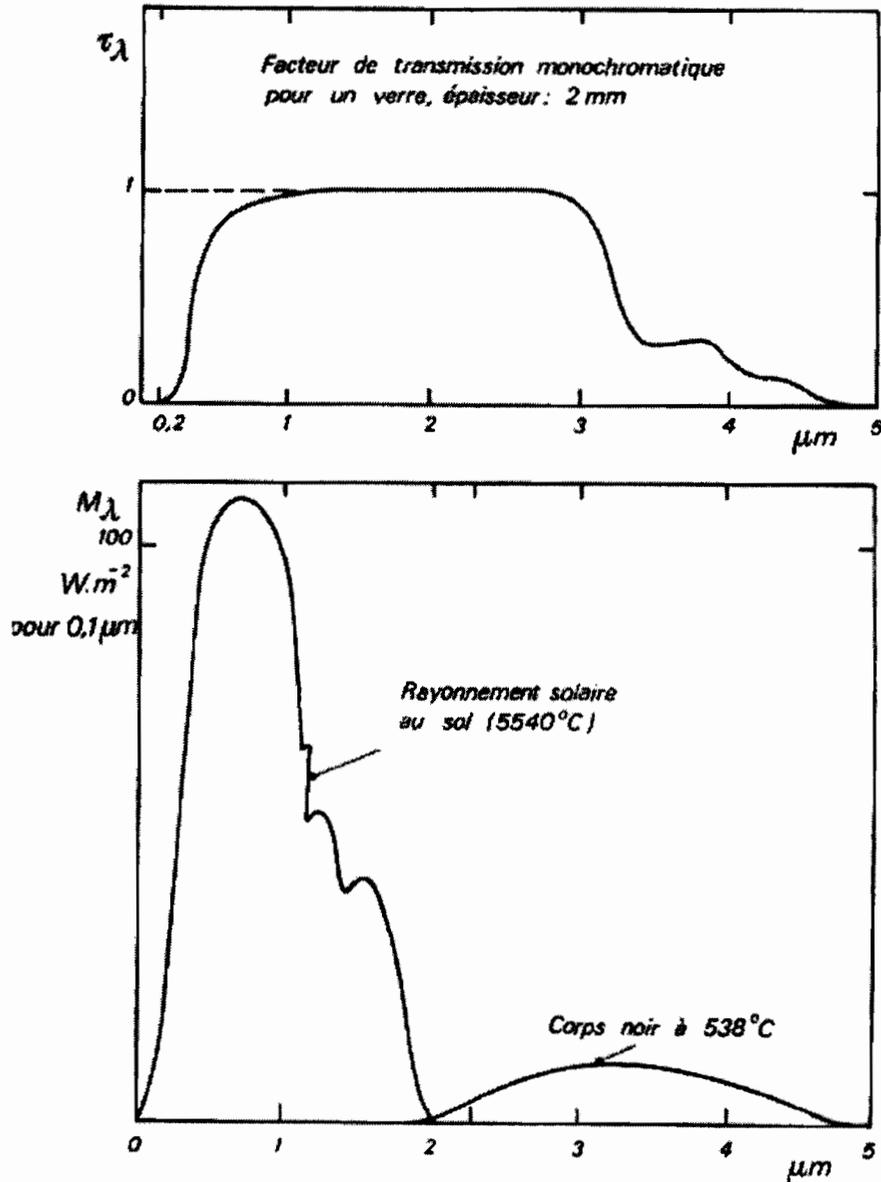


Figure 2.4 : L'allure de la courbe $\tau_\lambda = \tau(\lambda)$

On voit que la plus grande partie de l'énergie incidente est transmise.

La réémission de l'absorbeur se fait à une température $T_1 < T_s$; ce spectre se trouve décalé vers les fortes d'onde pour lesquelles le facteur de transmission de la vitre est faible. La majeure partie de l'énergie incidente est donc conservée dans le capteur, ce phénomène constituant « l'effet de serre »

Sur la figure suivante est représentée la répartition du flux incident dans un capteur à une vitre.

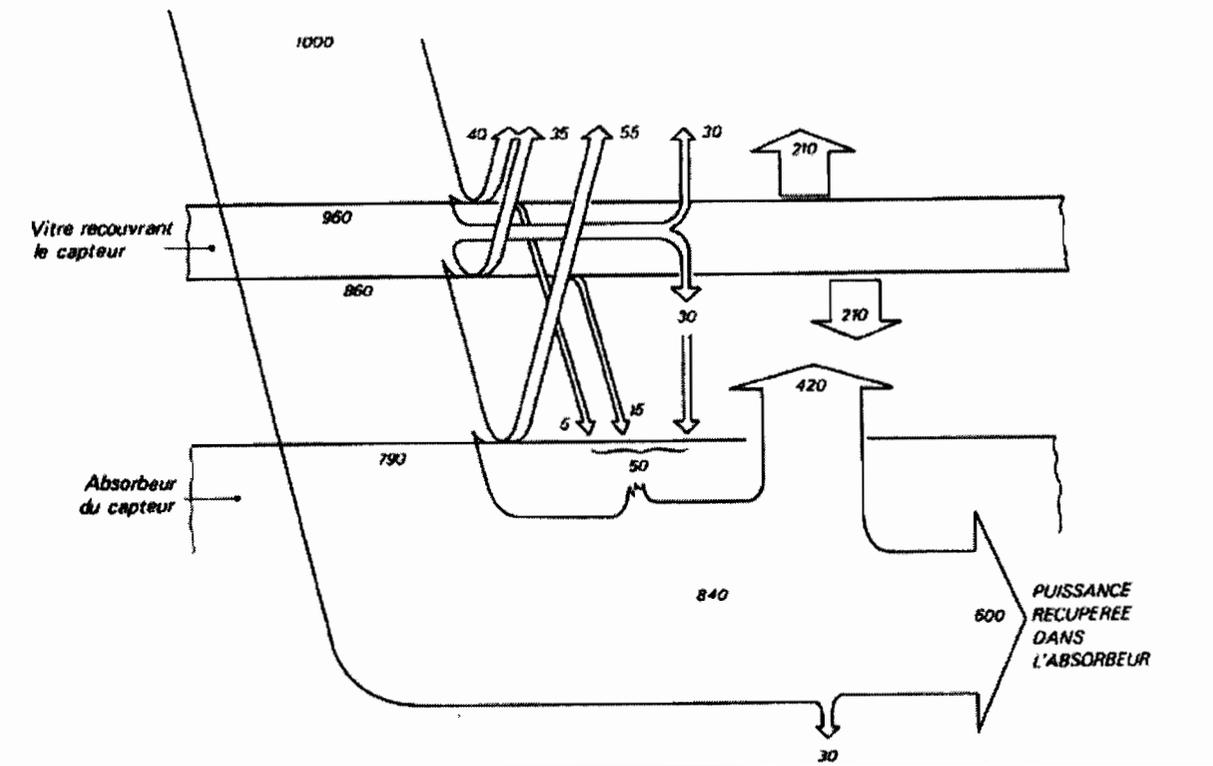


Figure 2.5: la répartition du flux incident dans un capteur à une vitre

2. 9.b Augmentation de l'énergie captée par utilisation de surface sélective

La surface captatrice idéale du rayonnement solaire devrait absorber toute l'énergie correspondant au spectre solaire, c'est-à-dire pour $\lambda < 3\mu\text{m}$, et émettre dans l'infrarouge lointain ($\lambda > 3\mu\text{m}$) correspondant au spectre du rayonnement réémis par l'absorbeur dont la température se situe entre 50 et 100°C pour les capteurs plans par exemple.

Il est évident que la recherche de telles surfaces présente surtout de l'intérêt pour les surfaces captatrices à hautes températures car la loi de réémission de l'énergie est proportionnelle à T^4 .

Dans les conditions normales de fonctionnement, la surface idéale devra donc posséder les valeurs suivantes portées sur la figure suivante pour ses facteurs monochromatiques d'absorption α_λ , d'émission ε_λ , de réflexion ρ_λ et de transmission τ_λ ; λ_c est la longueur d'onde critique.

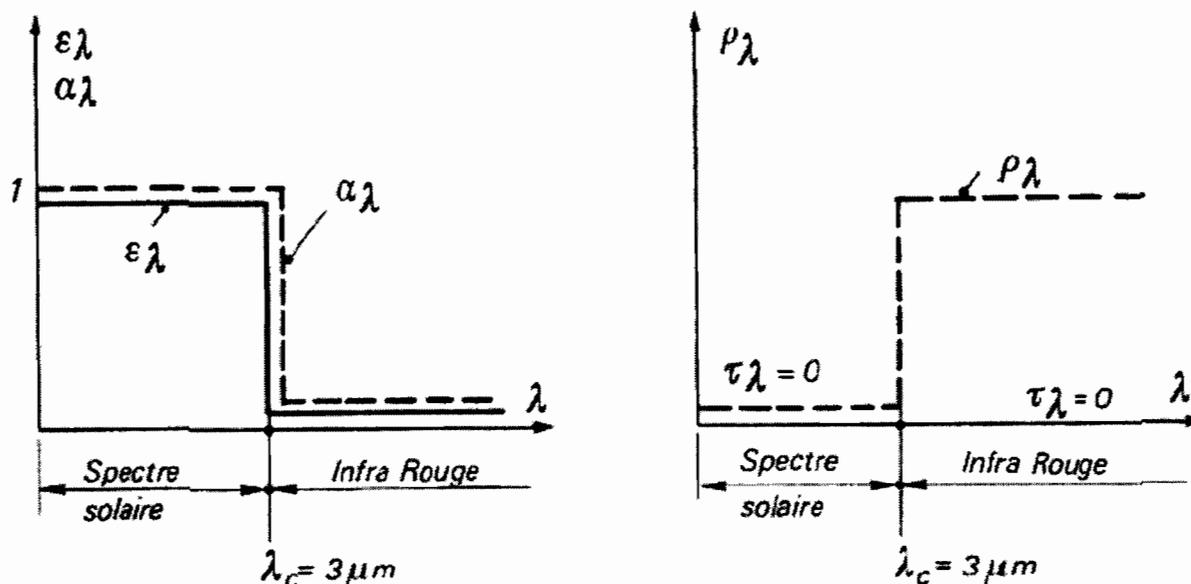


Figure 2.6: facteurs monochromatiques d'absorption α_λ , d'émission ϵ_λ , de réflexion ρ_λ et de transmission τ_λ d'une surface captatrice idéale

De nombreuses recherches sont en cours de développement et concerne de telles surfaces. Elles sont fondées sur le traitement des métaux généralement par dépôts de multicouches judicieusement choisies.

2.9.c Isolation thermique de l'ensemble.

L'absorbeur doit transmettre l'énergie qu'il capte au fluide caloporteur en évitant les pertes (conductibilité, convection, rayonnement) des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adoptées sont les suivantes :

✓ Partie avant de l'absorbeur.

La lame d'air d'épaisseur e' situé entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission par conductibilité ; mais si e' est trop grand, une convection naturelle de l'air intervient, ce qui entraîne des pertes non négligeables

En plaçant deux vitres on limite évidemment les pertes dues à la réémission (double effet de serre) et on limite aussi les pertes conduction convection.

✓ Partie arrière et latérale :

On place un isolant sur ces parties afin de limiter les pertes conduction et convection à la périphérie.

2.10 Contrôle de la réémission du rayonnement.

2.10.a Les vitrages écrans au rayonnement

La réémission de rayonnement peut être réduite en utilisant simplement un vitrage multiple.

La réduction nette des pertes est obtenue au prix de l'installation d'un vitrage additionnel.

Même sans tenir compte des considérations économiques on atteint très vite un point où un vitrage additionnel n'apporte plus de rendement.

2.10.b sélectivité spectrale

Plus réduire plus efficacement les pertes par réémissions de rayonnement, la meilleure façon est d'utiliser un absorbeur sélectif. On s'arrange pour avoir une valeur faible de ε tout en ayant en même temps une valeur élevée de l'absorbance α .

Chapitre 3 : Présentation du nouveau modèle : Aspects théorique et pratique des échanges thermiques dans la cavité vitre- absorbeur du capteur plan :

L'énergie thermique disponible à partir d'un capteur solaire est équivalente à l'énergie incidente diminuée des pertes. Il faut donc concevoir le capteur de façon à maximiser l'énergie incidente et prendre des mesures pour minimiser les pertes de chaleur. Ces pertes d'énergie sont dues à la réflexion, la réémission de rayonnement, la convection et la conduction comme indiquée dans le schéma suivant :

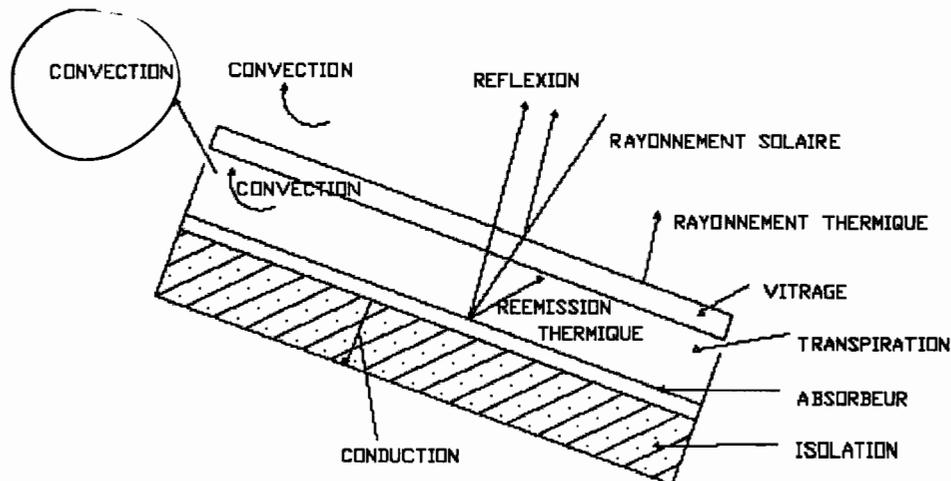


Figure3.1: Mécanisme des pertes dans un capteur solaire plan

3.1 Paramètres et caractéristiques de fonctionnement

3.1.a Les paramètres de fonctionnement

Nous classerons ces paramètres en deux catégories : les paramètres externes et internes

- Les paramètres externes
 - paramètres d'ensoleillement : éclairage énergétique dû au rayonnement global, position du soleil, durée d'insolation
 - température extérieure sèche
 - humidité relative
 - vitesse du vent autour du capteur
- les paramètres internes
 - paramètres géométriques (inclinaison, orientation du capteur, surface du capteur)

- paramètres de fonctionnement (température d'entrée du fluide caloporteur T_1 , les températures des différentes parties du capteur)

3.1.b Les caractéristiques de fonctionnement

Ces caractéristiques sont très importantes car elles permettent, en tenant compte du coût d'effectuer un choix parmi différents types de capteur. Ce sont :

- la température de sortie du fluide T_2
- puissance thermique du capteur :

$$\dot{q}_c = \dot{m}_f c_f (T_2 - T_1) \quad (3.1)$$

c_f : Chaleur massique du fluide caloporteur et

\dot{m}_f : débit du fluide caloporteur

- rendement du capteur :

$$\eta_c = \frac{\dot{q}_c}{AG_n} \quad (3.2)$$

avec G_n : composante normale de l'éclairement énergétique solaire

- rendement global de l'installation :

$$\eta_g = \frac{\dot{q}_r}{AG_n} \quad (3.3)$$

$$\dot{q}_r = \dot{q}_c - P \quad (3.4)$$

P = Pertes dans le réservoir de stockage et les canalisations

\dot{q}_r = Quantité de chaleur stockée dans le réservoir de stockage par unité de temps

3.2 Description du capteur : Aspect pratique

- Couverture transparente

C'est un châssis vitré réalisé par l'assemblage du verre entre 2 profils alu avec interposition d'un joint EPT pour éviter le pont thermique

En montage standard et expérimental, c'est du verre clair ordinaire d'épaisseur 3 ou 4 mm.

Le démontage du châssis doit être simple.

- Absorbeur

En réalisation expérimentale, le traitement de surface des tubes sera effectué par simple application d'une couche de peinture noire [coefficient d'absorption $\alpha = 0.92$ et coefficient d'émission $\varepsilon = 0.92$].

- Bac

Le fond est constitué d'une tôle en acier sur laquelle repose une couche d'isolant en aggloméré de 3cm d'épaisseur. Les parois latérales sont réalisées en profil aluminium.

- Dimensions

Les dimensions du prototype sont telles que la surface approximative du capteur soit 1 m². Cela correspond à un ensemble de 10 blocs de tubes avec une longueur de 1m.

- Mesures expérimentales :

Les températures de surface de chacun des 6 tubes absorbeurs en Cuivre seront mesurées par des thermocouples. De même que la puissance du rayonnement incident mesuré par le pyranomètre.

3.3 Les systèmes classiques

Si l'on veut concevoir un capteur solaire avec l'assurance qu'il fonctionne suffisamment bien, il faut connaître ce qui a été fait dans le passé, comprendre les lois de la physique nécessaires pour quantifier les performances de l'appareil, et savoir évaluer les performances de l'appareil.

Dans les systèmes classiques l'absorbeur dans sa forme la plus simple n'est rien de plus qu'une plaque noircie exposée au soleil. Ensuite la chaleur qu'elle collecte est transmise à un fluide à l'aide d'un échangeur de chaleur. Dans un chauffe-eau solaire simple, l'échangeur est une canalisation soudée à la plaque absorbante, l'eau circulant dans la canalisation servant à transférer la chaleur vers le point d'utilisation.

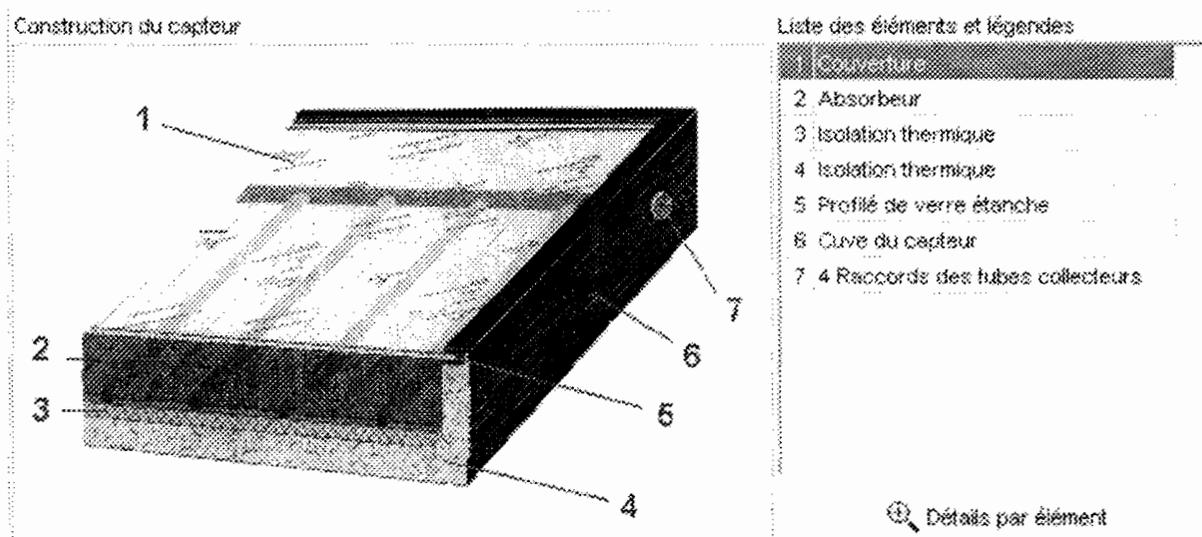


Figure3.2 : système classique

Les capteurs solaires peuvent être fixes ou à poursuite .Le capteur fixe ne bouge pas pendant ce qui est le cas des chauffe-eau solaires à usage domestique. Les capteurs fixes possèdent les avantages de simplicité, de fiabilité et de faible entretien, et ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur) comme illustrent les schémas suivants.

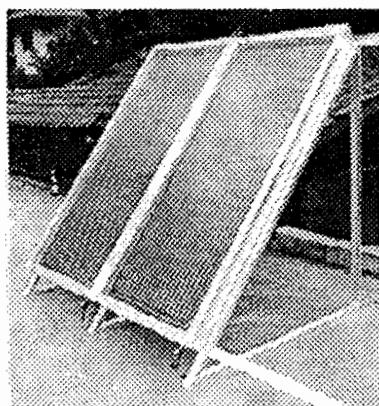
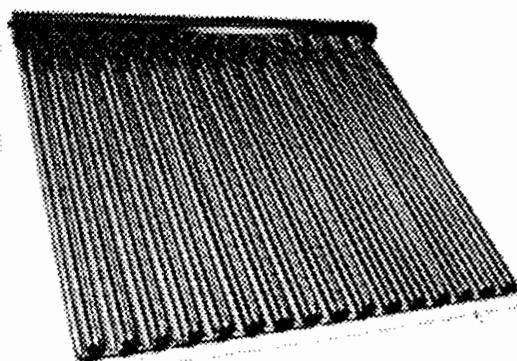
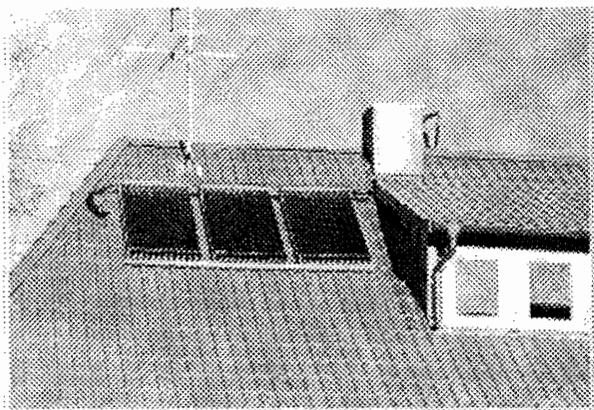


Figure3 .3 : capteurs fixes

Dans ces systèmes fixes le principal inconvénient est le fait que l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas très longtemps chaque jour à son maximum d'efficacité ; l'énergie solaire interceptée est proportionnelle à la surface d'absorbeur projetée sur un plan normal au rayonnement. Un montage permettant au capteur de faire toujours face au soleil l'expose au maximum d'irradiation. Si, en particulier, on a besoin d'obtenir des températures élevées, il est nécessaire que le capteur ou certains éléments du capteur suive le déplacement du soleil avec précision : c'est le cas des capteurs à poursuite.

3.4 Le nouveau système : Etude des échanges thermiques à l'intérieur de la cavité vitre absorbeur

Rappelons que le rendement instantané du capteur est égal à la puissance instantanée collectée divisée par la puissance solaire reçue à la surface du capteur. **(3.2)**

Plusieurs recherches ont été faites en vue d'optimiser le rendement des capteurs solaires.

Ici l'originalité du capteur réside dans la conception de l'absorbeur qui est ici constitué des tubes en cuivre qui servent à la circulation du fluide caloporteur. Contrairement aux systèmes classiques, où les tubes de circulation du fluide étaient séparés de l'absorbeur, ici l'absorbeur se confond avec les tubes, la forme cylindrique de la surface absorbante (facteur de forme favorable pour les échanges par rayonnement à l'intérieur de la cavité) ainsi que la configuration de tubes jointifs par soudage (pertes par conduction utiles) optimisent les apports calorifiques à l'eau de circulation.

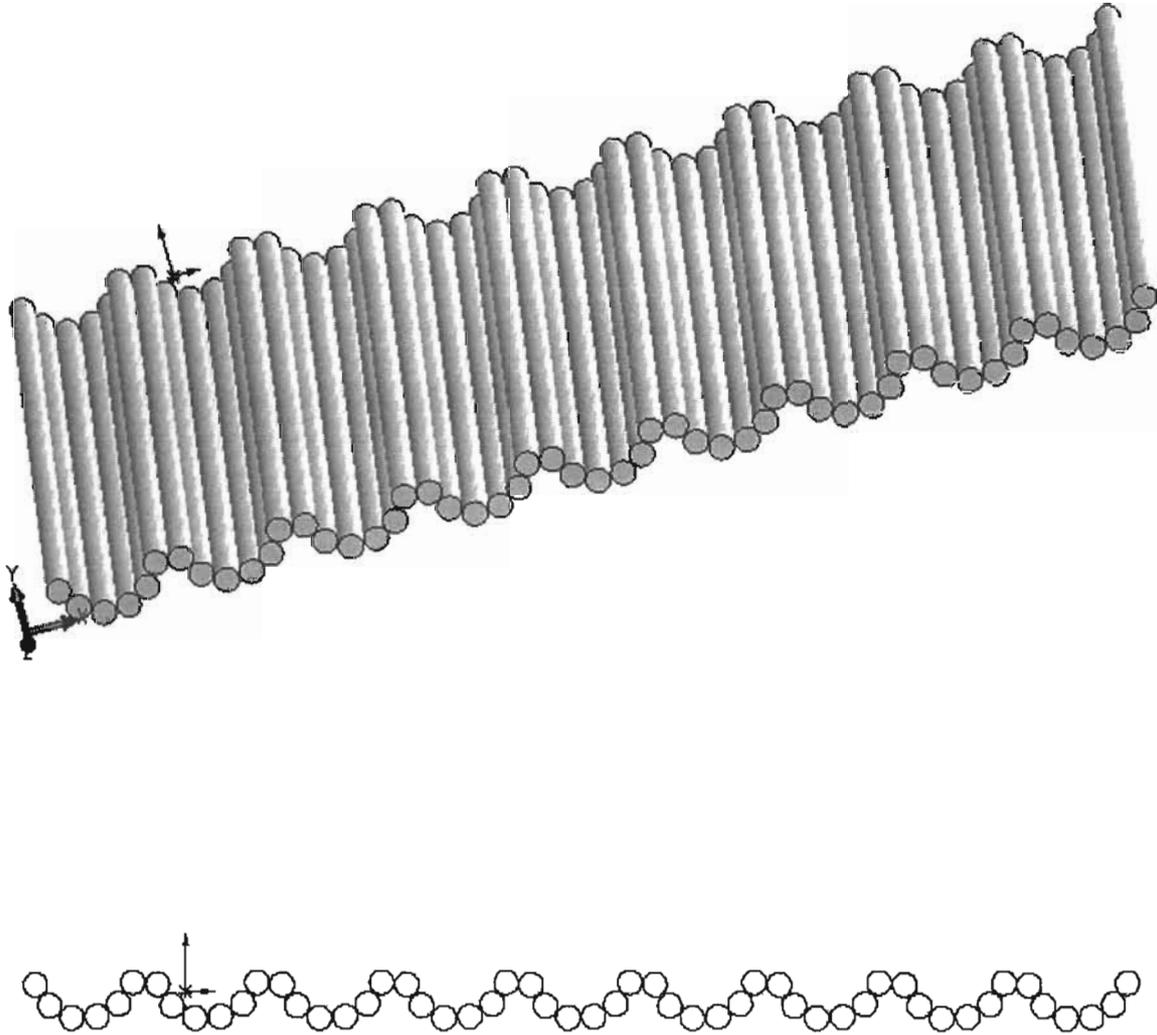


Figure 3.4 : Disposition des tubes du nouveau système

3.5 Détermination du flux absorbé dans les systèmes et dans le nouveau système

Quelque soit le système étudié, le rendement du capteur est égale à la puissance collectée divisée par la puissance solaire reçue à la surface du capteur (équation 3.2). La puissance absorbée diffère selon le type de système étudié.

3.5.a. Quantité de chaleur collectée dans le cas des systèmes classiques

Considérons un élément de capteur solaire classique représenté sur la figure suivante.

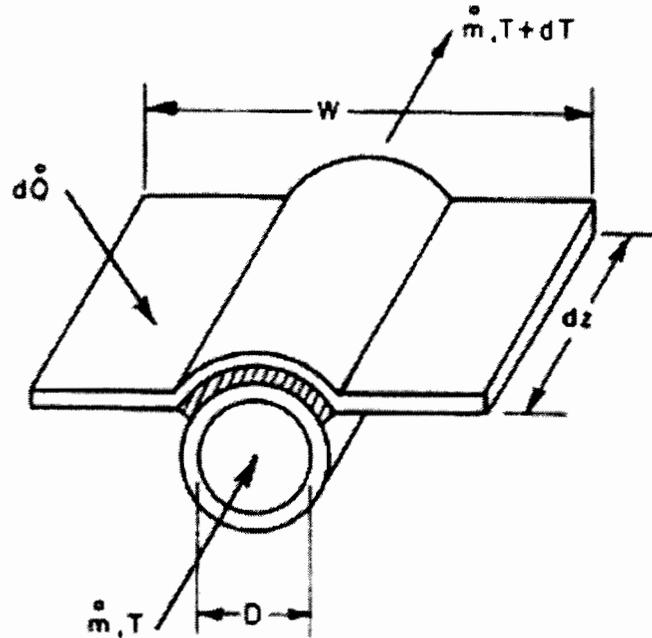


Figure 3.5 : un élément de capteur solaire classique

Le fluide de travail habituellement l'eau ou l'air, entre et sort de l'élément avec le débit \dot{m}_f (kg/sec). Si le fluide reste à l'état gazeux ou liquide (c'est-à-dire si l'eau n'entre pas en ébullition), la puissance thermique $d\dot{Q}$ (watt) collectée par le fluide est liée à l'augmentation de température dT du fluide par la relation :

$$d\dot{Q} = \dot{m} c_p dT \quad (3.5)$$

Où c_p est la chaleur massique à pression constante (j/kg °c)

La chaleur collectée est la puissance absorbée diminuée des pertes

$$d\dot{Q} = \alpha_s \tau_s (1 + a) G dA - P' \quad (3.6)$$

p' =pertes

α_s est coefficient d'absorption de l'absorbeur, τ_s le coefficient de transmission solaire du vitrage a la récupération des pertes par absorption du vitrage et G l'irradiation solaire. La surface élémentaire est le produit de la largeur de l'élément W par la longueur élémentaire dz .

3.5.b Quantité de chaleur collectée dans le cas du nouveau système :

L'absorbeur a la forme cylindrique comme indiquée dans le schéma suivant.

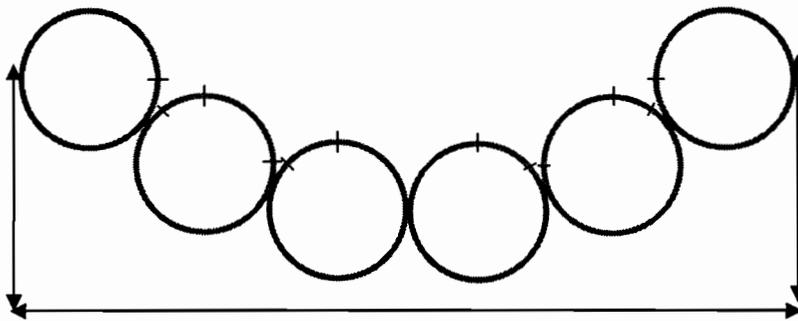


Figure 3.6 : l'absorbeur du nouveau capteur solaire

Cette forme cylindrique de l'absorbeur nous oblige de prendre en compte le flux de chaleur net échangé entre les tubes (facteur de forme favorable pour les échanges par rayonnement à l'intérieur de la cavité). D'autre part aussi contrairement aux systèmes classiques, où les tubes de circulation étaient espacés ici la configuration de tubes jointifs par soudage (pertes par conduction utiles) optimisent les apports calorifiques à l'eau de circulation.

Pour toutes ces raisons on peut penser que ce nouveau système serait plus performant que les systèmes classiques. Il faut attendre de faire les calculs et comparer avec le rendement maximum obtenu sur les systèmes classiques.

Cependant il faudra souligner que l'évaluation du flux total absorbé se complique beaucoup quand on doit tenir compte le flux de chaleur net échangé entre les tubes.

- Evaluation du flux net absorbé par les tubes

Si l'on considère un tube, pour évaluer le flux net qu'il absorbe, on doit tenir compte en plus du rayonnement direct reçu mais aussi du flux absorbé venant des autres tubes. C'est la raison pour laquelle la méthode utilisée pour évaluer le flux net absorbé par les tubes sera une discrétisation de la surface de l'absorbeur en élément de surface et sur chacune d'elle il sera

question de déterminer flux net absorbé en tenant compte du flux de chaleur net échangé entre les tubes et du rayonnement.

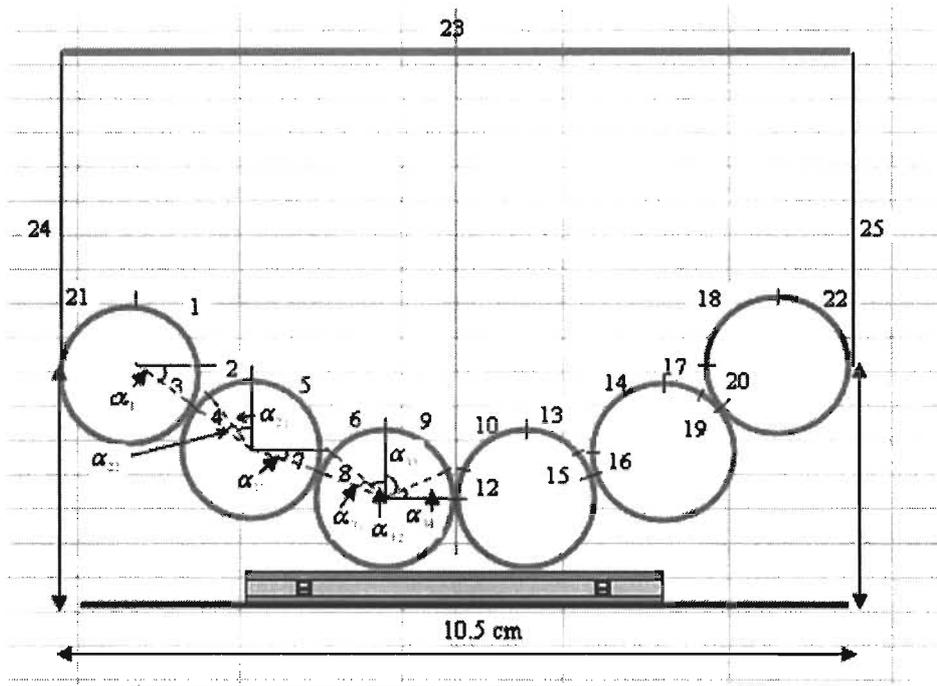


Figure 3.7 : discrétisation de la surface de l'absorbeur

Pour ce qui est des échanges radiatifs il faut noter que l'assimilation d'un capteur vitré à effet de serre à une cavité opaque n'est rigoureusement valable que pour les seules radiations infrarouges (de longueur d'onde supérieure à 3μ pour lesquelles le vitrage a un comportement opaque, cela implique aussi la particularisation des éléments soumis à l'irradiation solaire et la possibilité de séparer nettement les deux types de radiations solaires et infrarouges (ces dernières correspondant à des émissions dont les températures ne dépassent pas 4000K. Il est donc normal de tenir compte de la variation des facteurs d'émission et de réflexion en fonction du rayonnement pris en considération.

Ceci étant si le repérage des éléments de surface s'effectue au moyen de l'indice i ($1 < i < N$) et si on désigne par

- ✓ T_i la température absolue de l'élément i ,
- ✓ $\rho_i^p = 1 - \varepsilon_i^p$ son facteur de réflexion propre
- ✓ ρ_i^s son facteur de réflexion relativement aux radiations solaires
- ✓ e_i^s la densité de flux solaire irradiant directement la surface de l'élément i .

- ✓ q_i le gain radiatif (compté positivement s'il s'agit d'un apport) relatif à la surface unitaire de cet élément, c'est-à-dire l'écart entre l'énergie absorbée et l'énergie propre émise
- ✓ F_{ij} le facteur de formes relatives aux éléments i et j
- ✓ B_i^p la radiosité propre, c'est à dire ayant son origine dans les seules émissions propres au capteur et ainsi liée aux températures des différents éléments.
- ✓ B_i^s la radiosité solaire, c'est à dire ayant son origine dans le seul rayonnement solaire indépendamment du champ thermique interne au capteur
- ✓ B_i la radiosité total c'est-à-dire le flux total quittant l'élément i ($B_i = B_i^p + B_i^s$).

La formulation générale des radiosités et bilans s'exprime comme suit relativement à l'unité de surface de l'élément i , et ce compte tenu d'une part de la séparation des rayonnements et d'autre part des relations de réciprocité entre facteurs de forme :

$$B_i = B_i^p + B_i^s \quad (3.7)$$

$$B_i = \sigma \varepsilon_i^p T_i^4 + \rho_i^p \sum_{j=i}^N B_j^p F_{ij} + \rho_i^s \sum_{j=1}^N B_j^s F_{ij} \quad (3.8)$$

$$q_i = (1 - \rho_i^p) \sum_{j=1}^N B_j^p F_{ij} + (1 - \rho_i^s) \sum_{j=1}^N B_j^s F_{ij} - \sigma \varepsilon_i^p T_i^4 \quad (3.9)$$

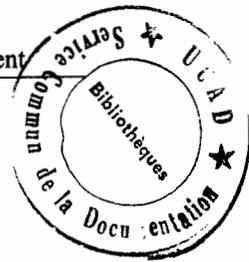
Ceci étant en introduisant les radiosités adimensionnelles :

- $\beta_j^{p(i)}$: Correspondant au quotient par σT_i^4 de la radiosité propre quittant l'élément j
Lorsque les températures de tous les éléments autres que i sont nulles.
- $\beta_j^{s(i)}$: Correspondant au quotient par σT_i^4 de la radiosité solaire quittant l'élément j
lorsque les températures de tous les éléments sont nulles et que seule la surface i est irradiée

Dans ces conditions, la radiosité totale relative à la surface i et correspondant à la superposition des états d'équilibre partiels est donnée par :

$$B_i = \sum_{k=1}^N [\beta_i^{p(k)} + \beta_i^{s(k)}] \sigma T_k^4 \quad (3.10)$$

La connaissance des $2n^2$ termes de radiosités adimensionnelles est obtenue par la résolution des systèmes linéaires suivants



$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{ij}^p = \rho_i^p \sum_{k=1}^N \beta_{kj}^p F_{ik} \quad \text{Pour } i \neq j \quad \text{avec } 1 < i < N ; 1 < j < N \\ \beta_{ij}^p = \varepsilon_j^p + \rho_i^p \sum_{k=1}^N \beta_{kj}^p F_{jk} \quad i=j \end{array} \right. \quad (3.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{ij}^s = \rho_i^s \sum_{k=1}^N \beta_{kj}^s F_{ik} \quad \text{Pour } i \neq j \\ \beta_{ij}^s = \rho_i^s \sum_{k=1}^N \beta_{kj}^s F_{ik} + \frac{\rho_j^s e_j^s}{\sigma T_j^4} \quad \text{Pour } i=j \end{array} \right. \quad (3.12) \quad \text{avec } 1 < i < N ; 1 < j < N$$

En reportant ces valeurs dans les équations dans l'équation 2°) tout en incluant les principes de conservation de l'énergie interne et des échanges radiatifs équivalents entre deux surfaces portées à la même température nous obtenons :

$$q_i = \frac{\varepsilon_i^p}{1 - \varepsilon_i^p} \sum_{k=1}^N \beta_i^{p(k)} \sigma (T_i^4 - T_k^4) - \frac{1 - \rho_i^s}{\rho_i^s} \sum_{k=1}^N \beta_i^{s(k)} \sigma T_k^4 \quad (3.13)$$

Ce résultat montre que pour connaître le flux net absorbé il faut d'abord avoir les radiosités solaires et propres. Et pour cela il nous faut résoudre les équations (3.11) et (3.12). Ces équations peuvent être réécrites sous forme matricielle.

- Ecriture matricielle des équations :

- Détermination des radiosités adimensionnelles propres β_i^p

Pour écrire ces équations sous forme matricielle, considérons les matrices F, β , A, et I définies comme suit :

$$F = \begin{pmatrix} \rho_1^p F_{11} & \dots & \rho_1^p F_{1n} \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \rho_n^p F_{n1} & & \rho_n^p F_{nn} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

$$\beta^p = \begin{pmatrix} \beta_{11}^p & \dots & \beta_{1n}^p \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \beta_{n1}^p & & \beta_{nn}^p \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

et la matrice diagonale A définie par $A_{ii} = \varepsilon_i$. Par exemple pour n=6,

$$A = \begin{pmatrix} \varepsilon_1^p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2^p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3^p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon_4^p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_5^p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_6^p \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

Notons I la matrice identité. L'équation (3.11) s'écrit sous la forme

$$\beta^p = A + F\beta^p \quad (3.16)$$

$$\beta^p - F\beta^p = A \quad (3.17)$$

$$(I - F)\beta^p = A \quad (3.18)$$

En posant la matrice $K=I-F$ on obtient :

$$K\beta^p = A \quad (3.19)$$

$$\beta^p = K^{-1}A \quad (3.20)$$

➤ Détermination des radiosités adimensionnelles solaires β_i^s

Pour les radiosités solaires on utilise les mêmes matrices. Mais on remplace ρ_i^p par ρ_i^s et

$$\varepsilon_i^p \text{ par } \frac{\rho_i^s e_i^s}{\sigma T^4}$$

$$\rho_i^s = 0,15 \text{ (pour la peinture noire)}$$

➤ Détermination des éléments de chaque matrice

- Pour la matrice A :

A est une matrice diagonale avec $A_{ii} = \varepsilon_i$

ε_i est le facteur d'émission du corps i. Notons que , le traitement de surface des tubes sera effectué par simple application d'une couche de peinture noire.

Pour le verre, $\varepsilon_i^p = 0,88$ et pour la peinture noire $\varepsilon_i^p = 0,95$

On a $1 < i < N$ avec $N=25$:

- $\varepsilon_i^p = 0,95$ pour $i=1$ à 22 (peinture noire)
- $\varepsilon_{23}^p = 0,88$ pour le verre
- $\varepsilon_{24}^p = 0$; $\varepsilon_{25}^p = 0$. En effet S_{24} et S_{25} sont des surfaces fictives .Du fait de la symétrie du problème thermique on peut attribuer à ces deux surfaces un caractère d'adiabacité (ce qui revient à considérer ces deux surfaces comme parfaitement réfléchissante donc le facteur d'émission nul)

- Pour la matrice F:

On a : $\rho_i^p = 1 - \varepsilon_i^p$

- $\rho_i^p = 0,05$ pour $i=1$ à 22 (peinture noire)
- $\rho_{23}^p = 0,12$ pour le verre
- $\rho_{24}^p = 1$; $\rho_{25}^p = 1$

➤ Calcul des facteurs de formes

Physiquement F_{1-2} représente la fraction du rayonnement total émis par A_1 et intercepté

Par A_2 et F_{2-1} la fraction d'énergie tombant sur A_1 à partir de A_2

L'égalité $A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1}$ est connue sous le nom de théorème de réciprocité.

Remarque

Si A_1 ne peut pas se « voir » lui-même $F_{11}=0$

Si A_i est convexe telle qu'aucun rayonnement émis par elle ne vient la frapper directement, tout le rayonnement émis par A_i est intercepté par les n surfaces de l'enceinte .Les facteurs de forme par rapport à la surface A_i doivent obéir à la relation :

$$\sum_{k=1}^{k=N} F_{ik} = 1 \quad (3.21)$$

Méthode utilisée pour le calcul des facteurs de forme :

Considérons l'enceinte complexe dont la section droite est représentée par les traits continus de la figure suivante :

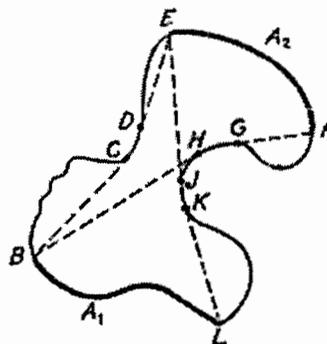


Figure3.8:Enceinte complexe pour le calcul des facteurs des formes

On désire soit calculer l'échange de chaleur par rayonnement entre les surfaces définies par les lignes en traits gras A_1 et A_2 soit à déterminer A_1F_{12} .

La ligne en pointillé BCDE représente sur la surface une ligne de longueur minimale reliant l'extrémité B de A_1 à l'extrémité E de A_2 ; de même la ligne LKJHGF est une ligne minimum depuis l'extrémité L de A_1 jusqu'à l'extrémité F de A_2 .

La méthode classique de Hottel permet de déterminer A_1F_{12} à partir de la relation suivante :

$$A_1F_{12} (\equiv A_2F_{21}) = \frac{(LKJE + BHGF) - (BCDE + LKJHGF)}{2} \quad (3.22)$$

Autrement dit, C'est la demi différence des longueurs croisées et non croisées. Pour déterminer les facteurs de forme on voit donc que la connaissance des différentes surfaces actives $A_i, i=1$ à 25 est impérative.

- Détermination des surfaces actives

Angles utiles pour le calcul des surfaces actives

Par raison de symétrie seule les angles appartenant aux trois premiers tubes seront déterminer.

Angles	α_1	α_{21}	α_{22}	α_{23}	α_{31}	α_{32}	α_{33}	α_{34}
Valeurs (rad)	0,634	0,636	0,301	0,281	0,850	0,336	0,164	0,406

Tableau 3.1: Angles utiles pour le calcul des surfaces actives

- les surfaces actives

Chaque secteur angulaire sera déterminé par la relation ; $S = R \times \alpha$ avec :

R= rayon et α étant l'angle

Pour des raisons de symétrie on aura :

$S_1 = S_{18} = 1,414$	$S_3 = S_{20} = 0,571$	$S_{21} = S_{22} = 1,414$	$S_2 = S_{17} = 0,572$
$S_4 = S_{19} = 0,271$	$S_5 = S_{14} = 1,414$	$S_7 = S_{16} = 0,253$	$S_6 = S_{13} = 0,765$
$S_8 = S_{15} = 0,303$	$S_9 = S_{10} = 1,048$	$S_{11} = S_{12} = 0,366$	$S_{23} = 10,29$

Tableau 3.2: les surfaces actives

- détaillons le calcul de $A_1 F_{1-18}$

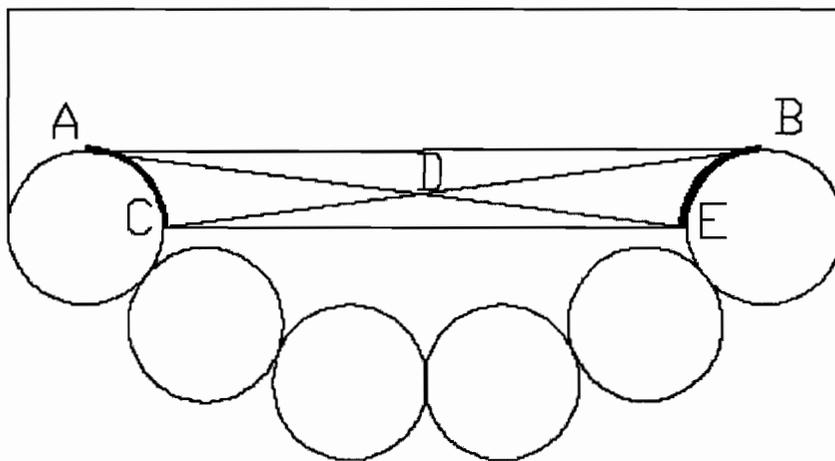


Figure 3.9 : détail du calcul de $A_1 F_{1-18}$

$$A_1 F_{1-18} (\equiv A_{18} F_{18-1}) = \frac{(ADE + CDB) - (AB + CE)}{2} \quad (3.23)$$

L'ensemble des facteurs de forme sera déterminé en adoptant cette procédure.

3.6 Résultats obtenus : Bilan radiatifs total relatif aux tubes :

Le bilan radiatif relatif à la surface unitaire de cet élément c'est-à-dire l'écart entre l'énergie absorbée et l'énergie propre émise est donnée par la relation :

N=25 surfaces élémentaires $n' = 1,2,5,6,9,10,13,14,17,18,21,22$ surfaces qui reçoivent le rayonnement solaire.

Tube	Bilan relatif aux tubes
1	$q_1 + q_2 + q_3$ $\beta_{1i}^p, \beta_{3i}^p, \beta_{21,i}^p : i = 1, N - 2$ $\beta_{1i}^s, \beta_{3i}^s, \beta_{21,i}^s : i = 1,2,5,6,9,10,13,14,17,18,21,22$
2	$q_2 + q_4 + q_5 + q_7$ $\beta_{2i}^p, \beta_{4i}^p, \beta_{5i}^p, \beta_{7i}^p : i = 1, N - 2$ $\beta_{2i}^s, \beta_{4i}^s, \beta_{5i}^s, \beta_{7i}^s : i = 1,2,5,6,9,10,13,14,17,18,21,22$
3	$q_6 + q_8 + q_9 + q_{11}$ $\beta_{6i}^p, \beta_{8i}^p, \beta_{9i}^p, \beta_{11i}^p : i = 1, N - 2$ $\beta_{6i}^s, \beta_{8i}^s, \beta_{9i}^s, \beta_{11i}^s : i = 1,2,5,6,9,10,13,14,17,18,21,22$

Tableau 3.3: Bilan radiatifs total relatif aux tubes

- Écoulement du fluide de travail

Pour obtenir le débit voulu on peut utiliser deux moyens principaux :

- ✓ Une pompe de circulation
- ✓ Un thermosiphon

Dans le premier cas il faut employer une pompe capable d'assurer le débit voulu compte tenu des pertes de charges du système de circulation. Le thermosiphon, quand on peut l'utiliser, constitue un moyen bien adapté d'assurer une circulation sans moyens mécaniques et sans besoins d'énergie.

- Un deuxième phénomène est à considérer lors de la variation de température du capteur, c'est le processus de diffusion de l'énergie incidente vers le fluide caloporteur

.En effet une forte diffusivité thermique : $a = \frac{\lambda_a}{\rho_a c_a}$ (λ_a = conductivité de l'absorbeur

ρ_a = masse volumique, c_a = chaleur massique de l'absorbeur) favorise la transmission de chaleur par conduction vers le fluide caloporteur.

- Niveau d'énergie – Niveau de température

Considérons un système quelconque qui fournit de l'énergie thermique à un fluide caloporteur.

L'énergie utilisable que véhicule le fluide dépend :

- ✓ de son débit,
- ✓ de sa température,
- ✓ de sa chaleur massique,

mais aussi du niveau énergétique de référence, c'est-à-dire de la nature de la source de Chaleur qui va recevoir l'énergie.

En effet, soit \dot{m} le débit de fluide caloporteur à la température T_1 qui cède sa chaleur à un milieu à la température T_2 .

La quantité de chaleur maximale utilisable prélevée au fluide caloporteur est donnée par l'équation (3.1).

Cette équation montre que l'on peut obtenir des quantités d'énergie très fortes avec de faibles températures de fluide, en particulier si on met en jeu des débits forts.

Il est préférable de caractériser les niveaux d'énergie par les niveaux de températures plutôt que par les quantité d'énergie. En effet, si on se rapporte à l'unité de masse d'un corps quelconque, on sait qu'une forte énergie est caractérisée par une forte température (notion d'enthalpie).

On classe les applications thermiques de l'énergie solaire de la manière suivante.

- ✓ Application à basse température (<100°C) : capteurs avec concentration
- ✓ Application à moyennes températures (100-500°C)

- ✓ Application à haute température (>500°C) : capteurs avec concentration.

3.7 Modélisation du nouveau système

Deux systèmes sont dits être analogues lorsqu'ils obéissent aux mêmes équations et possèdent aussi des conditions aux limites identiques. Cela signifie que l'équation traduisant un des systèmes peut être transformée, pour exprimer le deuxième système, par simple changement des symboles des différentes variables.

3.7.a Analogie entre le flux thermique et le flux électrique

Le flux de chaleur à travers une résistance thermique est analogue à l'intensité de courant dans un circuit électrique à courant continu car ces deux types d'écoulement obéissent aux mêmes équations.

Si nous remplaçons dans l'équation du flux de chaleur

$$q = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (3.24)$$

le symbole ΔT des températures (potentiel de température) par symbole du potentiel électrique, c'est-à-dire la différence de potentiel, ΔE et le symbole de la résistance R_{th} par celui de la résistance électrique R_e , nous obtenons l'équation du débit de quantité d'électricité, c'est-à-dire le courant i

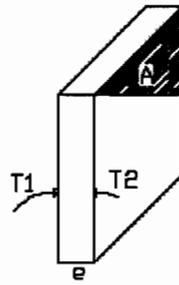
$$i = \frac{\Delta E}{R_e} \quad (3.25)$$

La base analogique ayant été établie, nous pouvons appliquer certaines propriétés de la théorie du courant continu aux problèmes de transmission de chaleur.

3.7.b Analogie thermique électrique en conduction

Pour la figure suivante d'aire A et d'épaisseur faible par rapport aux dimensions latérales, la loi de fourrier stipule que :

$$q = \frac{\lambda}{e} (T_1 - T_2) A \quad (\text{Watt}) \quad (3.26)$$



Le flux surfacique (ou densité de flux de flux de chaleur) s'écrit :

$$\frac{q}{A} = \frac{\lambda}{e}(T_1 - T_2) \text{ en (W/m}^2\text{)}$$

En posant $\varphi = \frac{q}{A}$ on a $\varphi = \frac{\lambda}{e}(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{e/\lambda}$

Cette équation montre qu'il existe une analogie entre le flux de chaleur et l'intensité du courant. Si on considère que $(T_1 - T_2)$ joue le rôle de différence de potentiel et e/λ celui de la résistance thermique de la paroi entre 2 nœuds aux potentiels T_1 et T_2 le flux de chaleur net serait analogue à l'intensité du courant dans un réseau analogue. (Voir schéma)

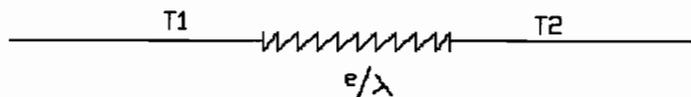


Figure3.10 : Analogie thermique en conduction

- La conductance thermique de la paroi est $K = \lambda/e$
- La résistance thermique de la paroi est $R_{th} = e/\lambda$

3.7.c Analogie thermique électrique en convection

Le flux d'échange convectif entre une paroi à la température T_1 et un fluide à la température T_2 en mouvement est donné par la loi de NEWTON

$$\phi_{conv} = h_c (T_1 - T_2) \quad (3.27)$$

Cette relation de Newton (équation 3.27) peut être sous la forme :

$$\phi_{conv} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_c}} \quad (3.28)$$

La résistance thermique pour la convection : $R_{conv} = \frac{1}{h_c}$

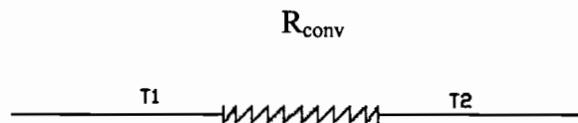


Figure3.11: Analogie thermique en convection

3.7.d Analogie thermique électrique en rayonnement

Pour inclure le rayonnement dans le réseau thermique où la conduction et le rayonnement jouent un rôle, il est commode de définir l'unité de conduction thermique relative au rayonnement, ou le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement h_r . L'introduction dans les calculs des coefficients d'échange par rayonnement identique au coefficient d'échange de chaleur par convection permet d'exprimer le flux de chaleur en fonction de la simple différence des températures et d'incorporer directement dans un réseau thermique pour lequel la température est le potentiel moteur.

- Rayonnement réciproque entre un plan et une masse gazeuse

Certains gaz sont transparents vis-à-vis du rayonnement en particulier les gaz monoatomiques. D'autres gaz, tels que la vapeur d'eau et le gaz carbonique absorbent réfléchissent et émettent. Cependant l'absorption, par exemple n'est pas continue sur tout le spectre incident, mais a eu lieu suivant des bandes de longueurs d'onde.

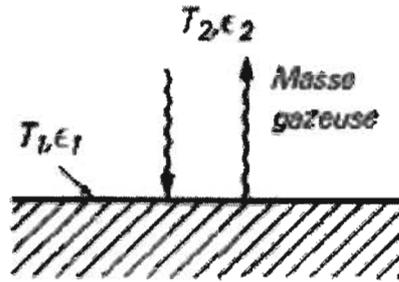


Figure3.12: Rayonnement réciproque entre un plan et une masse gazeuse

Quand la surface considérée a des dimensions faibles par rapport à l'espace environnant (rayonnement réciproque entre un objet et le ciel par exemple) on montre que :

$$q_{12} = \sigma A \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.29)$$

- Définition du coefficient d'échange par rayonnement entre une surface et une masse gazeuse

Plaçons nous dans le cas précédent et soit A l'aire de contact solide gaz.

La quantité de chaleur échangée par rayonnement, par unité de temps a pour expression

$$q_r = \sigma A \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.30)$$

On introduit, par analogie avec la loi de Newton relative à la convection un coefficient par rayonnement h_r tel que

$$h_r = \frac{q_r}{A(T_1 - T_2)} = \frac{\sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)} \quad (3.31)$$

On peut alors écrire :

$$q_r = h_r (T_1 - T_2) A \quad (3.32)$$

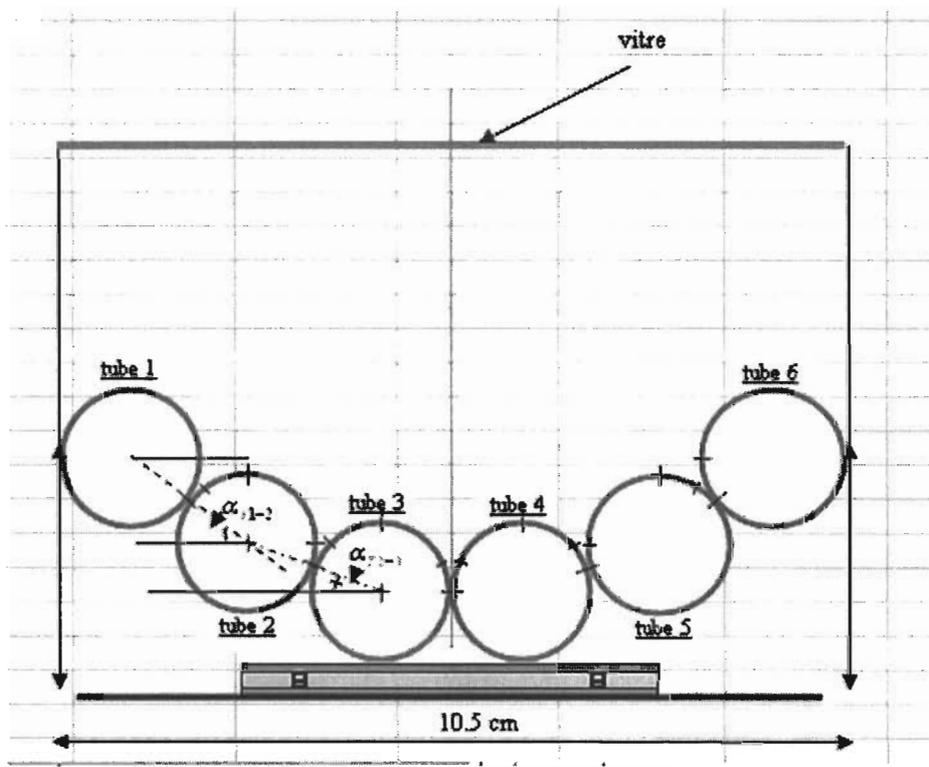
3.7.e Modélisation électrique du capteur

Pour modéliser le système nous allons faire correspondre à un point de température T en Kelvin une tension V en volt. Une température imposée sera donc équivalente à une tension imposée, c'est-à-dire à un générateur de tension.

A un flux thermique en watts on fera correspondre un générateur de courant électrique en ampères.

Avant de faire la modélisation du capteur solaire nous allons développer les échanges thermique au niveau de celui-ci.

Schéma du capteur



Considérons les notations suivantes :

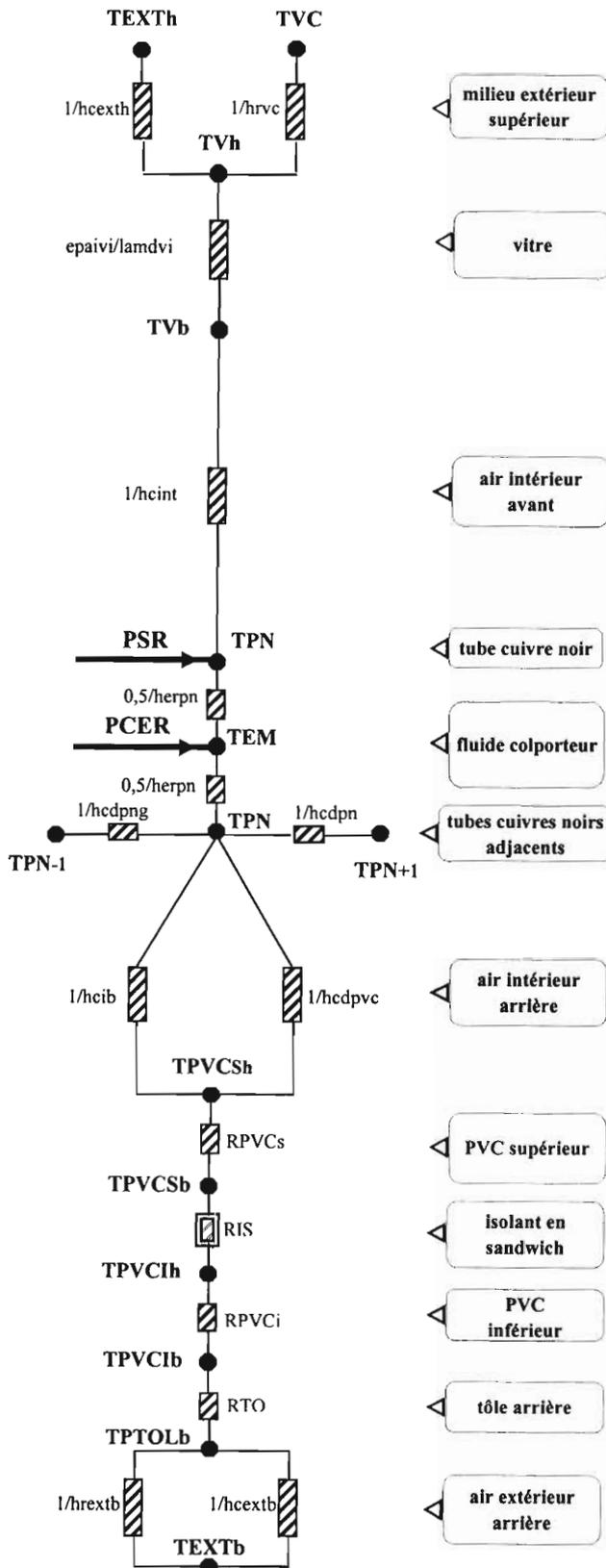
TEXT_h : température extérieure haute

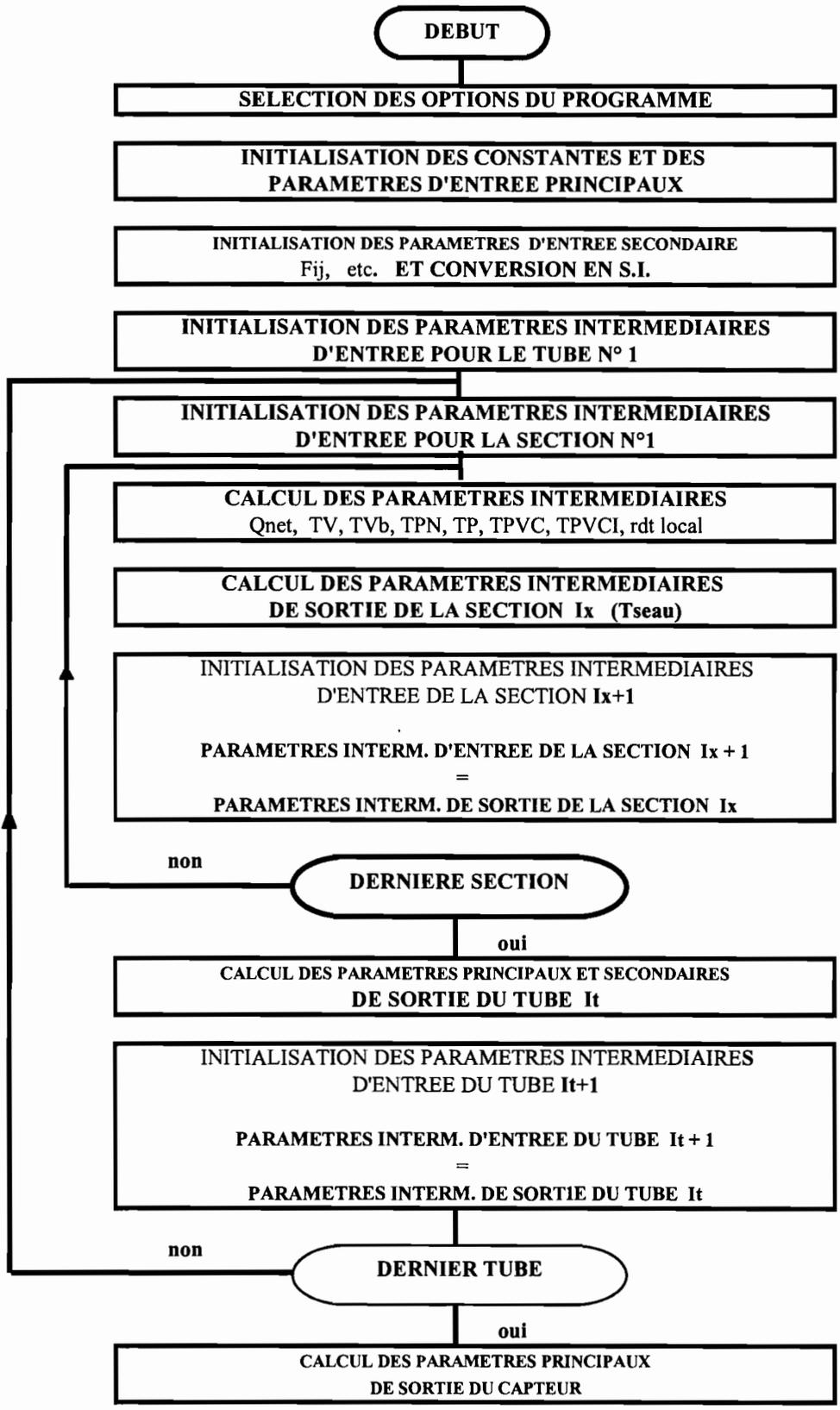
TVC : température de voûte céleste

TV_h : température du vitrage haut

TVb : température vitrage bas
PSR : température solaire rayonnante
TPN : température plane noire
PCER :
TPN₋₁, TPN₊₁ : températures des tubes cuivres noirs adjacents
TPVCS_h : température PVC supérieur haut
TPVCS_b : température PVC supérieur bas
TPVCI_h : température PVC intérieur haut
TPVCI_b : température PVC intérieur bas
TPTOLB : température de la tôle situé en bas
TEXT_b :

Le capteur modélisé est représenté dans le schéma suivant.





DEBUT

SELECTION DES OPTIONS DU PROGRAMME

INITIALISATION DES CONSTANTES ET DES
PARAMETRES D'ENTREE PRINCIPAUX

INITIALISATION DES PARAMETRES D'ENTREE SECONDAIRE
Fij, etc. ET CONVERSION EN S.I.

INITIALISATION DES PARAMETRES INTERMEDIAIRES
D'ENTREE POUR LE TUBE N° 1

INITIALISATION DES PARAMETRES INTERMEDIAIRES
D'ENTREE POUR LA SECTION N°1

CALCUL DES PARAMETRES INTERMEDIAIRES
Qnet, TV, TVb, TPN, TP, TPVC, TPVCI, rdt local

CALCUL DES PARAMETRES INTERMEDIAIRES
DE SORTIE DE LA SECTION Ix (Tseau)

INITIALISATION DES PARAMETRES INTERMEDIAIRES
D'ENTREE DE LA SECTION Ix+1

PARAMETRES INTERM. D'ENTREE DE LA SECTION Ix + 1
=
PARAMETRES INTERM. DE SORTIE DE LA SECTION Ix

non

DERNIERE SECTION

oui

CALCUL DES PARAMETRES PRINCIPAUX ET SECONDAIRES
DE SORTIE DU TUBE It

INITIALISATION DES PARAMETRES INTERMEDIAIRES
D'ENTREE DU TUBE It+1

PARAMETRES INTERM. D'ENTREE DU TUBE It + 1
=
PARAMETRES INTERM. DE SORTIE DU TUBE It

non

DERNIER TUBE

oui

CALCUL DES PARAMETRES PRINCIPAUX
DE SORTIE DU CAPTEUR

• **Calcul des différents coefficients :**

La température extérieure (ambiante) est une grandeur imposée au système, on la modélisera par un générateur on a

$$T_a(t) = (T_{amax} + T_{amin})/2 + (T_{amax} - T_{amin})/2 \cdot \sin(15(t-9)) \quad 0 < t < 24 ; \quad T_a = 25^\circ\text{C}$$

TVC = température de la voûte céleste

TEXT_h : température extérieure haute : On a $TVC = 0,0552TEXT_h^{1,5}$

$h_{cesxth} = 5,7 + 3,8v$: c'est le coefficient de convection à la surface du vitrage.

Dans l'expression de h_{cesxth} v représente la vitesse du vent. $v = 4\text{m/s}$

$hrvc$: Coefficient par rayonnement
$$h_r = \frac{\sigma \varepsilon_v (T_{vh}^4 - T_{vc}^4)}{(T_{vh} - T_{vc})}$$

$$\sigma = 5,6710^{-8} \text{ w / m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$\varepsilon_v = 0.865$$

Tableau 3.3

Masse volumique ρ , conductivité thermique λ_f ,
chaleur massique C_p et viscosité dynamique μ
de quelques liquides et gaz utilisés en thermique

Liquides	Température (°C)	ρ kg/m ³	λ_f W/m, °C	C_p kJ/kg, °C	μ 10 ⁻⁵ Pl
Eau à la pression atmosphérique ...	20	999	0,599	4,18	100,4
	90	971	0,680	4,22	31,5
	100	958	0,680	4,22	28,3
Fuel oil domestique	20	840	0,134		600
	50	840	0,134	2,01	
Léger	20	910	0,128		2 900
	50	910	0,128	1,92	1 000
Lourd n°1	20	940	0,122		21 500
	50	940	0,122	1,88	6 000
Lourd n°2	20	950	0,122	1,84	
	50	950	0,122	1,84	25 000
Fréon n°12	-30	1 480	0,094	0,896	48,0
	0	1 390	0,084	0,934	28,5
	40	1 250	0,070	1,002	24,0
Sodium	200	900	81,5	1,34	45,0
	600	800	82,5	1,26	21,0

Gaz à la pression atmosphérique	Température (°C)	ρ kg/m ³	λ_f W/m, °C	C_p kJ/kg, °C	μ 10 ⁻⁵ Pl
Air	0	1,293	0,0242	1,004	1,72
	100	0,94		1,009	
	200	0,74	0,0382	1,025	2,57
	300	0,61		1,046	
	400	0,52	0,0509	1,067	3,25
CO ₂	0	1,97	0,0145	0,820	1,37
	100	1,44	0,0224	0,921	1,81
	200	1,13	0,0322	0,996	2,22
	300	0,93	0,0401	1,067	2,59
	400	0,85	0,0467	1,122	2,32
NH ₃	0	0,77	0,0221	2,055	0,93
	100	0,56	0,0326	2,206	1,29
	200	0,44	0,0454	2,388	1,85
H ₂	0	0,0899	0,168	14,231	0,812
	100	0,0658	0,216	14,440	1,04
	200	0,0519	0,260	14,524	1,22
O ₂	0	1,428	0,0246	0,917	1,92
	100	1,048	0,0328	0,933	2,43
	200	0,825	0,0401	0,963	2,88

Masse volumique ρ , conductivité thermique λ et chaleur massique C_p
de quelques métaux et isolants utilisés en thermique

Métaux	Température (°C)	ρ kg/m ³	λ W/m, °C	C_p kJ/kg, °C
Aciers non alliés	20 400	800 800	53,5 42,5	0,460 0,627
Aciers alliés	20 500	800 800	47,6 36,0	0,460 0,627
Aluminium ..	20 300	2700 2700	204,0 233,0	0,879 1,025
Cuivre	20 300	8900 8900	384,0 366,0	0,398 0,419
<i>Cupronickel</i>				
70 Cu - 30Ni	20	8900	29,1	0,38
90 Cu - 10Ni	20	8900	44,7	0,38
<i>Monel</i>				
30 Cu - 70Ni	20 500	8900 8900	22,1 37,2	0,54 0,54

Isolants	Température (°C)	ρ kg/m ³	λ W/m, °C	C_p kJ/kg, °C
<i>Amiante</i>				
feutre léger	100	116	0,047	0,80
fibre ou	0	470	0,151	0,80
brique	350 0 400	470 700 700	0,180 0,232 0,291	0,80 0,80 0,80
<i>Laine de roche</i>	20 100 200 20 100 200	40 40 40 90 90 90	0,040 0,058 0,093 0,035 0,050 0,070	0,84 0,84 0,84 0,84 0,84 0,84
<i>Laine de ve verre</i>	20 100 200 20 100 200 20 100 200	20 20 20 40 40 40 70 70 70	0,040 0,058 0,093 0,036 0,050 0,074 0,040 0,048 0,065	0,84 0,84 0,84 0,84 0,84 0,84 0,84 0,84 0,84
<i>Vermiculite agglomérée .</i>	20	250	0,105	1,25
<i>Réfractaires</i>	500	8000	0,349	1,05

Conclusion



A travers ce travail, On a examiné la physique des pertes de chaleur dans les capteurs solaires et les moyens mis en œuvre pour les réduire, en incluant les fondements de la sélectivité spectrale et les notions d'absorptance ,et de transmittance pratiques. Puis l'attention a été portée sur le transfert de chaleur de l'absorbeur solaire au fluide de travail qui absorbe et transporte cette chaleur à son point d'utilisation. Cependant on a surtout travaillé sur l'optimisation de la conception de l'absorbeur qui se confond avec les tubes, et a une forme cylindrique.

On a également mis l'accent sur le fait que l'énergie solaire n'est pas entièrement « gratuite », son utilisation nécessite un investissement de départ souvent lourd, en ce sens qu'il faut mettre en jeu certains moyens pour la récupérer.

Au terme de Cette étude nous espérons avoir atteint les objectifs visés par le projet dans la mesure ou on a pu déterminer l'expression du flux net absorbé par les tubes. La modélisation du capteur a été également faite.

Nous espérons également qu'on peut tirer profit de ce travail pour entreprendre la conception d'un capteur solaire pour son usage personnel.

Notre recommandation porte sur la mise sous programme informatique du système. Celle ci sera bonne si autant que possible le concerné l'oriente vers l'organigramme que nous avons préconisé.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DEMBA, Paul. Cours de Plomberie industrielle,
Professeur à l'ESP de thiès,
- [2] GAYE, Salif. Cours de transmission de chaleur.
Professeur à l'ESP de thiès,
- [3] BERNARD, R. MENGUY, G. SCHWARTZ, M.
Le rayonnement solaire: Conversions thermiques et applications.
2^e édition, 1980
- [4] A, Alexandre et J. Martinet. Revue de physique appliquée « aspects théoriques et pratique des échanges thermiques dans la cavité vitre-absorbeur d'un capteur à haut Rendement »

Annexes

Annexes 1

Tableau du degré d'émissivité de quelques matériaux

L'émissivité du corps, noté ε révèle sa capacité à absorber et à émettre de l'énergie

Matériau	Température	Emissivité
Aluminium, nu après laminage	170°C	0,04
Aluminium, anodisé noir	50°	0,98
Béton	20°C	0,93
Glace, lisse	0°C	0,97
Fer poncé	20°C	0,24
Verre	90°C	0,94
Cuivre, légèrement ternis	20°C	0,04
Cuivre, oxydé	130°C	0,76
Acier, trempé	200°C	0,52
Acier, oxydé	200°C	0,79
Vernis, noir mat	80°C	0,97

Annexes 2

La conductivité thermique. Ses valeurs expérimentales

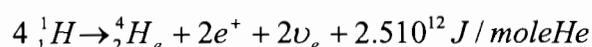
Ordre de grandeur de λ à 20 °C	$W m^{-1} K^{-1}$
Gaz à la pression atmosphérique	0,006 - 0,18
Matériaux isolants	0,025 - 0,25
Liquides non Métalliques	0,1 - 1,0
Solides non métalliques	0,025 - 3
Liquides métalliques	8,5 - 85
Alliages métalliques	10 - 150
Métaux purs	20 - 400

Ag	418	Silice	8	H ₂	0,18
Cu	390	Béton brut	1,75	He	0,15
Al	238	Verre	~ 1	Ne	0,05
Laiton	120	Plâtre	0,46	O ₂	0,027
Fe	82	Bois	0,25 à 0,12	N ₂	0,026
Pt	69	Laine de verre	0,04	Air	0,025
Graphite	46	Polystyrène	0,04	Ar	0,018
Pb	35	Eau	0,6	CO ₂	0,017
Ti	20	Alcool	0,17	Kr	0,01
Inox	14	Huile minérale	0,13		

Annexes 3

Aperçu de la ressource : Constitution physique du soleil

Le soleil est une sphère gazeuse de 1 391 000 km de diamètre, dont la distance moyenne à la terre est de 149 450 000 km .L'énergie qu'il émet provient d'une suite de réactions thermonucléaire et exothermiques compliquées (dite «cycle de Bethe »), qui s'écrit globalement :



Mais on intervient des noyaux de ${}^7\text{Be}$ et de ${}^7\text{Li}$. e^+ désigne l'électron positif, ν_e le neutron électronique .

Cette énergie est suffisante pour entretenir une température élevée.

En effet, la masse du soleil est 2.510^{30} kg et il contient 30%H soit 0.610^{33} moles. Si tout l'hydrogène solaire était transformé en hélium, on aurait une production d'énergie de :

$$\frac{1}{4} * 2.510^{12} * 6.10^{12} = 3.75.10^{44} \text{ J}$$

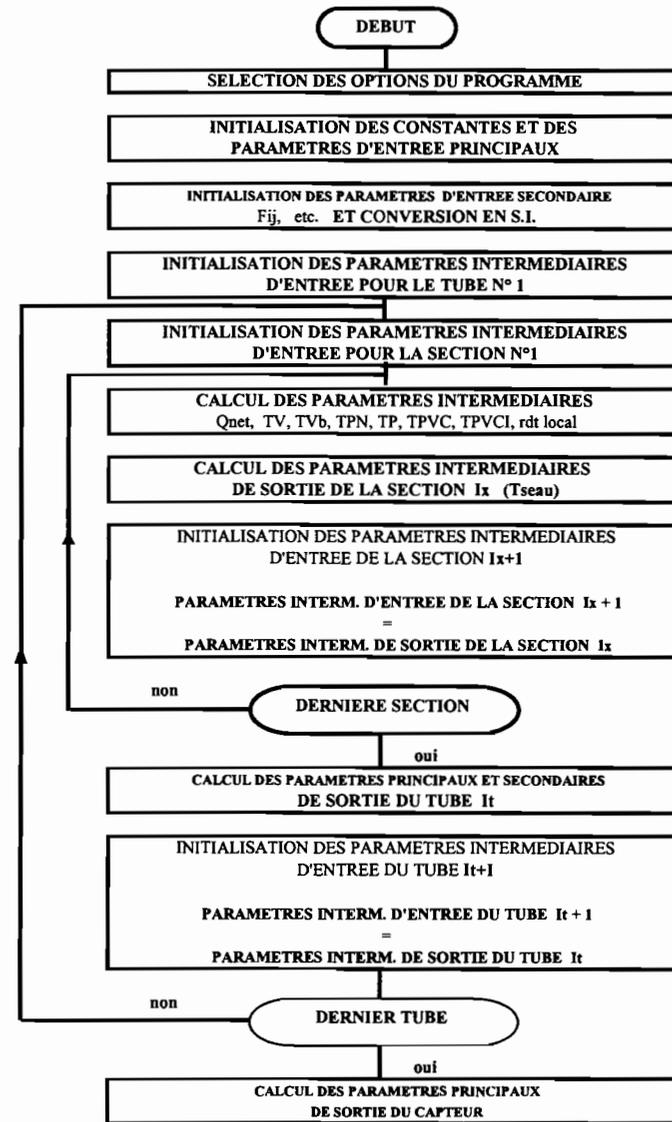
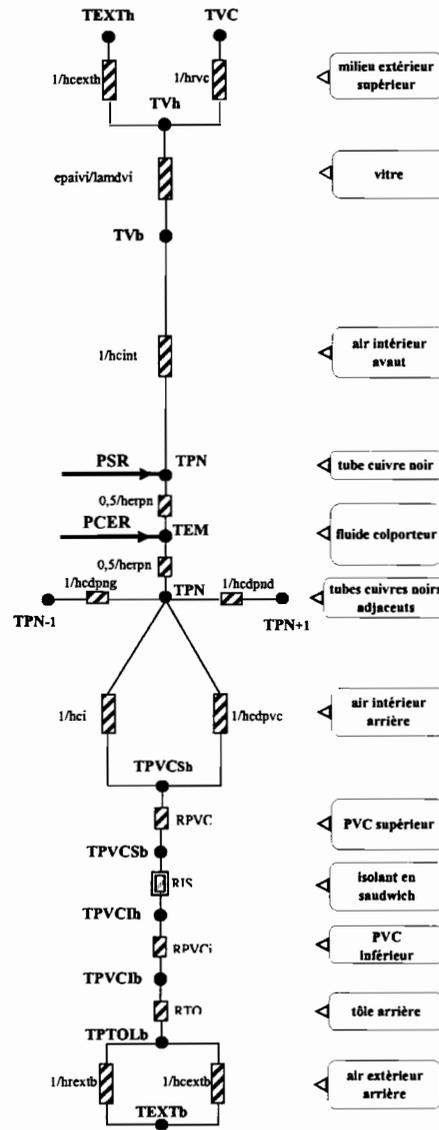
La terre reçoit une puissance de 1.35kWm^{-2} et sa distance moyenne au soleil est 1.510^{11} m ; le soleil rayonne donc :

$$4\pi (1.510^{11})^2 \times 1350 = 3.810^{26} \text{ J /s}$$

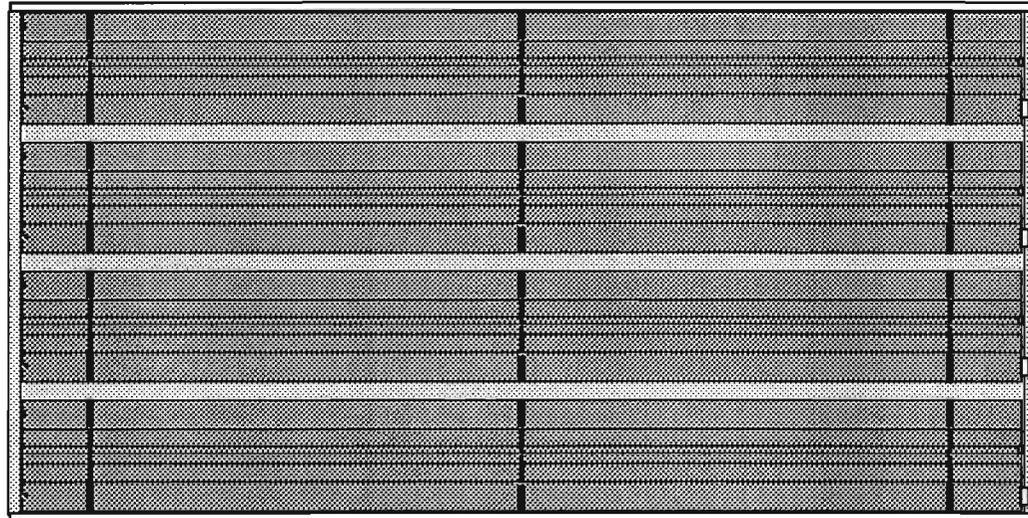
Il peut rayonner pendant $\frac{3.7510^{44}}{3.810^{26}} = 9.8710^{17}$ secondes = $3,13.10^{10}$ ans soit environ 30

milliards d'années.

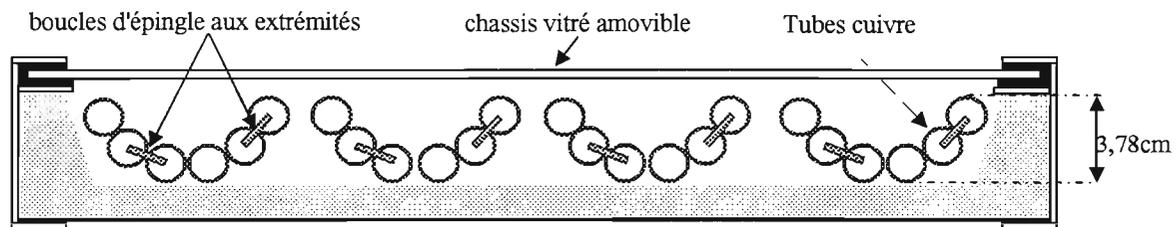
L'age du soleil est estimé a 5.10^9 ans .Pendant toute sa vie il n'a dépense que 14% de ses réserves énergie.

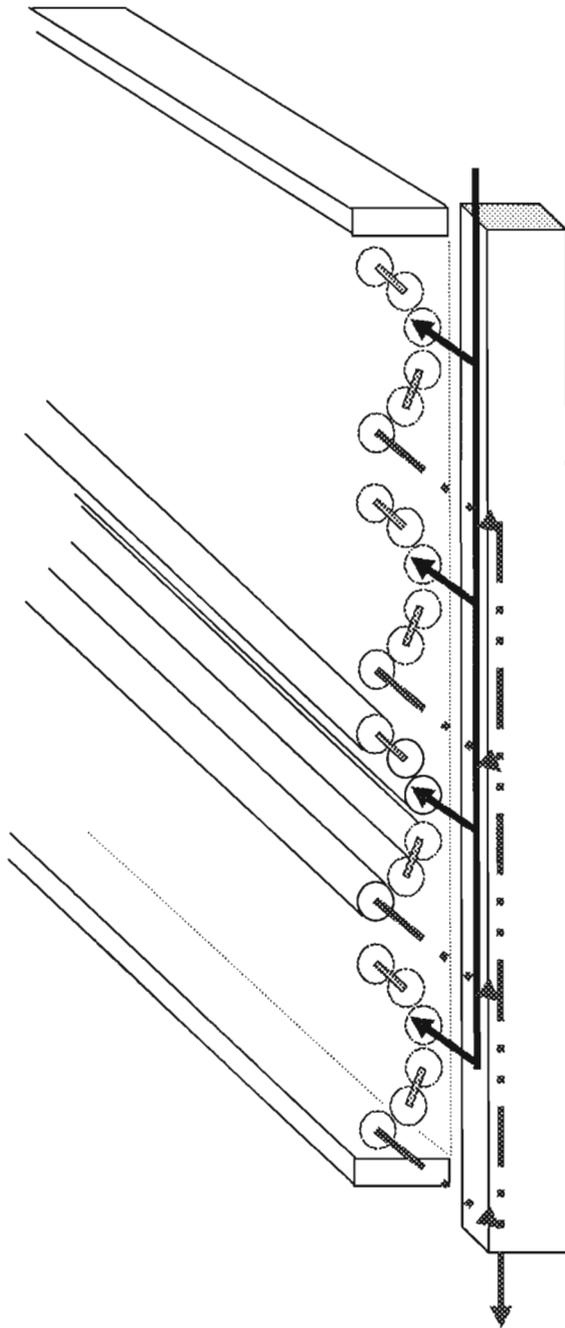


FACE



COUPE





HE 2

- 1 couverture en verre trempé
- 2 tube en cuivre noir chrome
- 3 isolant thermique
- 4 profilé en Alu
- 5 tôle
- 6 joint EPT
- 7 boucles d'épingle aux extrémités

